

Modellierung und Entwicklung einer opto-mechatronischen Beleuchtung mit **LASER-Lichtquelle**

für die Prüfung

Modul T3200

des Studiengangs Mechatronik

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von

Johannes Ströbel

Mai 2025

Bearbeitungszeitraum
Matrikelnummer, Kurs
Betreuer

12 Wochen
9589176, TMT22A
Prof. Dr. Wolfgang Nießen

Erklärung

gemäß § 5 (3) der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“
vom 29. September 2017.

Ich versichere hiermit, dass ich meine
mit dem Thema
Modellierung und Entwicklung einer opto-mechatronischen Beleuchtung mit
LASER-Lichtquelle
selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel
benutzt habe.
Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten
Fassung übereinstimmt.



Stuttgart, Mai 2025

Johannes Ströbel

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Listings	VIII
1. Motivation und Zielsetzung	1
2. Stand der Technik	2
2.1. Eigenschaften von Licht	2
2.2. LASER	4
2.3. Sicherheit optischer Strahler	5
2.4. Menschliche Wahrnehmung	5
2.5. DMX-Protokoll	6
3. Entwicklung	7
3.1. Methodisches Vorgehen	7
3.1.1. Anforderungen	7
3.1.2. V-Modell	8
3.1.3. FMEA	8
3.2. Optik	9
3.2.1. LASER-Sicherheit	11
3.3. Mechanik	12
3.4. Elektronik	14
3.4.1. LASER-Modul	15
3.4.2. Motorregler	20
3.4.3. Spannungsversorgung und Platine	22
3.5. Programmierung	25
4. Validierung und Test	26
5. Zusammenfassung und Ausblick	27
Literatur	28
Glossar	30
A. FMEA	31
Anhang	32

Abkürzungsverzeichnis

a		Abschwächung der Strahlungsintensität
\vec{B}	$\frac{A}{m}$	Magnetischer Feldvektor
c	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit
d	mm	Durchmesser
D		Schaltverhältnis
\vec{E}	$\frac{V}{m}$	Elektrisches Feldvektor
E_{Photon}	eV	Photonenenergie
f	Hz	Frequenz
f_r	$\frac{1}{m}$	Raumfrequenz
h	eV s	Planck'sches Wirkungsquantum
I	A	Gleichstrom
I_{Max}	A	Maximalstrom
I_S	A	Sättigungsstrom
I_{Th}	A	Schwellstrom
i	A	Wechselstrom
l	m	Länge
k	$\frac{J}{K}$	Boltzmann Konstante
L	H	Induktivität
MZB	$\frac{W}{m^2}$	maximal zugängliche Bestrahlung
N		Emissionskoeffizient
n		Brechungsindex
OD		optische Dichte
P	W	Leistung
P_{Ph}	W	Optische Leistung
R	Ω	Widerstand
R_θ	$\frac{K}{W}$	Wärmewiderstand
q	C	Elementarladung
R_S	Ω	Reihenwiderstand

U	V	Spannung
u_{min}	m	Minimaler Strahlenabstand
w	m	Strahlradius

α	rad	Eintrittswinkel
β	rad	Austrittswinkel
η		Wirkungsgrad
λ	mm	Wellenlänge
θ	rad	Divergenzwinkel
ϑ	°C	Temperatur

BA	Basisanforderung
BE	Begeisterungsanforderung
BLDC	bürstenloser Gleichstrommotor
DMX	Digital Multiplex
ESD	Elektrostatische Entladung
FET	Feld-Effekt-Transistor
FEM	Finite-Elemente-Methode
FLT	Fehler
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
IC	Integrated Circuit
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation-Lichtquelle
LE	Leistungsanforderung
PWM	Pulsweitenmodulation
RDM	Remote Device Management
RS485	Recommended Standard 485
TTL	Transistor-Transistor-Logik

Abbildungsverzeichnis

1.1. KI-generiertes Funktionsziel der Beleuchtung [1].	1
3.1. Konzeptzeichnung.	12
3.2. Schnittansicht der Konstruktion ohne Elektronik.	13
3.3. Schnittansicht Festkörpergelenk; rot schraffiert Spiegel.	14
3.4. Simulation des Festkörpergelenks.	14
3.5. Lasermodul von eBay [8].	15
3.6. P_{Ph} - I - U -Kennlinien nach Thorlabs [9]–[11].	17
3.7. Schaltung in <i>LTSpice</i>	18
3.8. Fehlende Totzeit und Beispiel Messung von $\Delta I_{Max} \approx 2,7 \text{ mA}$	19
3.9. Ober- und Unterseite der Platine.	24

Listings

1. Motivation und Zielsetzung

In einer technisch geprägten und immer technischer werdenden Welt stellen sich viele Menschen die Frage nach dem Sinn dieser Entwicklung. Einerseits kann technischer Fortschritt Probleme lösen, wie z.B. die Ernährung von acht Milliarden Menschen oder Krankheiten heilen, andererseits ist er auch der Ursprung vielen Leids, bspw. neue Waffentechnologien oder psychologische Belastungen durch soziale Medien.

Dabei wird Technologie immer für einen Zweck genutzt, aber muss sie das? In dieser Arbeit wird gezeigt wie der Stand der Technik für den Selbstzweck der Ästhetik verwendet wird. Aus technischer Sicht ist dieser Selbstzweck dabei nicht weniger interessant, insbesondere weil das Projekt alle mechatronischen Disziplinen vereint. Es ergeben sich interessante Anforderungen an das Gesamtsystem und darauf angepasste Lösungen.

Eine Hauptkomponente des optischen Systems soll ein wiederverwendetes Bauteil, ein Parabolspiegel, aus einem Leopard A1 Panzer sein. Das ist Teil des Konzepts, Technologie für nichtfunktionale und vor allem menschenfreundliche Zwecke einzusetzen. So bekommt dieses Bauteil ein zweites, sinnvoller Leben.

Die Arbeit gründet auf der Idee, eine Lichtquelle mit koaxialem, zylinderförmigem Strahlengang zu bauen. Dabei soll die Farbe des Lichts aus dem Weißlichtspektrum wählbar sein. Die Verwendung ist als Kunstinstallation oder Beleuchtung für audiovisuelle Darbietungen gedacht. Das gewünschte Ergebnis wird in nachfolgender Abbildung [1.1](#) dargestellt.



Abbildung 1.1.: KI-generiertes Funktionsziel der Beleuchtung [\[1\]](#).

2. Stand der Technik

Die notwendigen Grundlagen der Optik und Elektronik werden hier zusammengefasst.

2.1. Eigenschaften von Licht

Abhängig von den Anforderungen an ein optisches System kann es physikalisch in beliebiger Tiefe betrachtet werden. Nachfolgende Betrachtungen stammen primär von Wolfgang Demtröder [2] und werden stellenweise ergänzt. Für einfache optische Aufbauten mit $d, l \gg \lambda$ ist oft die Strahlenoptik ausreichend. In ihr wird Licht als eine Summe einzelner vektorieller Strahlen dargestellt. Zur Formung des Lichts werden primär brechende Elemente verwendet. An Grenzflächen mit Gradienten des optischen Index wird das Licht nach dem Gesetz von Snellius (2.1) gebrochen (Dispersion).

$$\cos(\alpha) \cdot n_1 = \cos(\beta) \cdot n_2 \quad (2.1)$$

Der optische Index von Materialien $n(\lambda)$ ist nach Sellmeier [3] von der Wellenlänge λ abhängig.

Ein weiteres elementares Gesetz der Optik ist die Reflexion. Sie erfolgt für direkte Reflexion nach dem Gesetz Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel

$$\alpha = \beta \quad (2.2)$$

Bei diffuser Reflexion wird durch eine gegenüber der Wellenlänge klein strukturierten Oberfläche das Licht ungerichtet reflektiert. Für reflektierende Oberflächen mit Rauigkeit $r < \frac{\lambda}{10}$ ergibt sich üblicherweise gerichtete Reflektion.

Für die Anwendung von Optik ergeben sich relevante Fehler, sog. Aberrationen. Bei der Verwendung sphärischer Elemente, ergibt sich die sphärische Aberration. Zur optischen Achse parallele, aber weit entfernte Strahlen, verlaufen bei einer Sammellinse nicht in einem Fokuspunkt, sondern überlagern sich in dessen Nähe. Es ergibt sich eine Kaustik. Nicht parallele Strahlen, die außerhalb der optischen Achse ein Bild ergeben, treffen sich nicht in einem Punkt. Dieser Fehler wird als Koma bezeichnet.

Bei polychromatischem, also mehrfarbigem Licht ergibt sich bei der Bildgebung ebenfalls ein Versatz durch den Brechungsindex $n(\lambda)$.

Mit der Strahlenoptik lassen sich zwei charakteristische Lichtquellen definieren. Ein Kollimator (kollimiertes Licht) ist eine Lichtquelle, bei dem auf einer Seite alle Strahlen in die gleiche Richtung zeigen. Bei einer Punktlichtquelle kreuzen alle Strahlen einen infinitesimalen Punkt und divergieren von dort.

Einige Phänomene lassen sich nicht strahlenoptisch erklären. Dazu gehören bspw. Beugung und Interferenz. Sie werden wellenoptisch betrachtet. Die Wellenoptik widerspricht dabei nicht der Strahlenoptik, sondern erklärt und ergänzt viele strahlenoptische Gesetze (Winkeländerung der Wellenfront durch Versatzzeit (2.1), Wellenfrontüberlagerung von Elementarwellen (2.2)). Grundlage dafür ist der Elektromagnetismus. Licht wird als senkrecht zueinander stehendes, schwingendes elektrisches \vec{E} und magnetisches Feld \vec{B} beschrieben. Die Frequenz f steht dabei

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

über die Lichtgeschwindigkeit mit der Wellenlänge in Relation.

Kohärenz beschreibt die Eigenschaft des Lichts zur gleichphasigen Ausbreitung. Dies ist eine wichtige Charakteristik für Lichtquellen, weshalb diese in kohärente und inkohärente Lichtquellen unterschieden werden.

Polarisation beschreibt die Ausrichtung der Schwingungsrichtung der transversalen Wellen (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung). An dielektrischen Grenzflächen, also Medienübergängen (z.B. Atmosphäre zu Glas), mit Transmission wird Licht reflektiert. Die Intensität des reflektierten Lichts ist dabei vom Reflexionswinkel abhängig, wenn die Polarisationsrichtung nicht in einer Parallelebene zur Grenzfläche liegt (s- & p-Polarisation). Für den Brewster-Winkel wird die Intensität der Reflexion von P-polarisiertem Licht null. Vollständig reflektierende Oberflächen haben in beide Polarisations Ebenen die gleiche Intensität.

Eine weitere Art der Beschreibung von Licht ist die Quantenoptik. Licht verhält sich dabei als einzelne Teilchen, als Lichtquanten. Die Energie eines solchen Teilchen wird durch

$$E_{Photon} = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4)$$

beschrieben.

Der Ansatz für die Modellierung eines optischen Systems hängt von der notwendigen Genauigkeit ab. Viele Systeme können vereinfacht strahlenoptisch betrachtet werden, wenn die Dimensionen des Systems groß gegenüber der Wellenlänge des Lichts sind und die Genauigkeitsanforderungen größer als die Wellenlänge sind.

2.2. LASER

Eine besondere Art der Lichtquelle sind Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation-Lichtquelle (**LASER**). Ihre Eigenschaften werden nach Sigrist [4] erklärt. Ihre Funktion basiert auf der erzwungenen Emission durch Anregung aus einem Medium. Sie sind optische Resonatoren, üblich mit zwei planparallelen Spiegeln. Ein Spiegel ist dabei teildurchlässig, das austretende Licht kann als Lichtquelle verwendet werden. Durch die wellenoptischen Effekte der Lichterzeugung ergibt sich ideal ein charakteristisches Strahlprofil mit gaußscher Intensitätsverteilung und gekrümmter Wellenfront. Für die Divergenz θ des Strahlprofils gilt

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (2.5)$$

mit dem Radius der Strahltaile w_0 .

Eine Bauart für **LASER** sind Diodenlaser (Halbleiterlaser). Sie sind p-n-dotierte Halbleiter mit charakteristischer Übergangsenergie E_{Photon} . Aufgrund weiterer physikalischer Effekte liegen emittierte Photonen in einem schmalen Frequenzband. Für unterschiedliche, weiter entfernte Wellenlängen müssen verschiedene Substrate verwendet werden.

Das Verhalten einer **LASER**-Diode im Durchlassbereich des Gleichstrom-Großsignalverhalten wird durch die Shockley-Dioden-Gleichung

$$I = I_S \left(\exp \left(\frac{U_D}{NU_T} \right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

mit dem Zusammenhang

$$U_T = \frac{k\vartheta}{q} \quad (2.7)$$

und einem Widerstand R_S

$$U_R = R_S \cdot I \quad (2.8)$$

in Reihenschaltung beschrieben.

Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens ergibt sich bei kleiner Spannungsänderung eine große Stromänderung. Ein spannungsgesteuerter Betrieb ist deshalb störanfälliger und oft ungenauer als ein stromgesteuerter Betrieb. Deshalb werden Dioden-**LASER** üblicherweise mit einer Stromquelle betrieben, die Spannung stellt sich entsprechend ein.

Für den Betrieb mit einer realen Stromquelle (z.B. ein stromgeregelter Tiefsetzsteller) ist die Schaltfrequenz durch Kapazitäten des PN-Übergangs beschränkt. Erst wenn sich dort eine ausreichend große Spannung aufbaut, können Photonen emittiert werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft zur Beschreibung des optischen Verhaltens ist der Schwellstrom I_{Th} , ab welchem die Betriebsart von spontaner Emission zur erzwungenen

Emission übergeht. Erst ab diesem Betriebspunkt funktioniert die Diode als **LASER**. Ab dem Schwellstrom ergibt sich ein weitestgehend linearer $P_{Ph} \propto i$ Zusammenhang.

Eine weitere charakteristische Eigenschaft von Diodenlasern ist das Strahlprofil. Aufgrund ihrer Bauform und der Beugung divergiert das Strahlprofil unterschiedlich in x- bzw. y-Richtung, wobei z die optische Achse darstellt. Das Strahlprofil ist elliptisch, die Achsen werden mit *fast* und *slow* bezeichnet.

2.3. Sicherheit optischer Strahler

Da Strahlung schädlich für Menschen sein kann, ist die Sicherheit von optischen Strahlern ein wichtiger Aspekt, insbesondere bei **LASERn** aufgrund der hohen Leistungsdichte.

Eine Metrik für die Sicherheit optischer Strahler ist die maximal zugängliche Bestrahlung (MZB). Sie definiert einen Standard zur Berechnung des Leistungseintrags und liefert vergleichbare Ergebnisse, abhängig von Wellenlänge und Bestrahlungszeit. Es muss die Bedingung

$$\text{MZB} \leq \text{MZB}_{\max} \quad (2.9)$$

erfüllt sein.

Zum sicheren Umgang während des experimentellen Betriebs müssen ggf. **LASER**-Schutzbrillen verwendet werden. Für diese ist für Bandspektren ein OD-Wert angegeben, welcher die logarithmische Reduzierung der Leistung angibt.

$$P_{\text{nach}} = P_{\text{vor}} \cdot 10^{-\text{OD}} \quad (2.10)$$

Zur Kategorisierung von gefährlichen Lichtquellen werden deshalb einheitliche Bezeichnungen verwendet. Sogenannte **LASER**-Schutzklassen sind in der [5] definiert. Eine häufig angewendete Kategorie bei der Verwendung in der Beleuchtungstechnik ist die *Klasse 3B*. Sie beschreibt **LASER**-Systeme mit maximaler Leistung $P = 0,5 \text{ W}$.

2.4. Menschliche Wahrnehmung

Das menschliche Auge nimmt mit drei unterschiedlichen Arten von „Sensoren“ für jeweilige Wellenlängenbereich Licht wahr. Das ermöglicht, 3 monochromatische Lichtquellen zu verwenden und so die Illusion eines vollspektralen Lichts zu erzeugen. Dies funktioniert

allerdings nur für additive Farbmischung gut, weil das Spektrum nahezu unverändert das Auge erreicht. Wird dagegen subtraktiv eine Farbe erzeugt, z.B. diffuse Reflexion auf Oberflächen, kann dies zur Wahrnehmung von unvollständigen Farben führen. Bei selektiver Absorption von Materialien kann die Wellenlänge der Beleuchtung mehr absorbiert werden, als ähnliche Wellenlängen. Es kommt zu einer falschen Farbwahrnehmung. Dagegen wird bei vollspektraler Beleuchtung die Absorption des Materials korrekt in Form der Reflektion wiedergegeben.

Die Verarbeitung des Auges von Lichtimpulsen ist träge. Ab einer Frequenz $f \geq 24 \text{ Hz}$ können pulsierende von Konstant leuchtenden Lichtquellen nicht mehr unterschieden werden. Für schnelle Bewegungen erhöht allerdings eine höhere Frequenz die „Flüssigkeit“ der Bewegung.

2.5. DMX-Protokoll

Der Digital Multiplex (DMX)-Bus ist ein Standard zur seriellen, differentiellen Übertragung von Daten. Er ist der übliche Standard in der Veranstaltungstechnik zur Ansteuerung von Lichtern und ist in ANSI E1.11-2008 [6] definiert. Basierend auf dem Recommended Standard 485 (RS485)-Bus werden in der Norm weitere Standards festgelegt. Zur Auslegung von Systemen sind folgende Parameter relevant.

Parameter	Spezifikation
Übertragungsrate	250 kbit/s
Wellenwiderstand	110 Ω
Wiederholrate	max 44,1 Hz
Datenframe	512 B
Wertebereich	8 bit
Steckverbindungen	5-poliger XLR-Stecker

Tabelle 2.1.: DMX-Bus Spezifikation nach ANSI [6].

Eine Erweiterung stellt Remote Device Management (RDM) dar. Dabei können die Geräte auf einem Bus durch Empfangen/Senden identifiziert werden. Dafür ist Hardware zur bidirektionalen Kommunikation notwendig.

3. Entwicklung

Zur Entwicklung des Beleuchtungssystems ist ein strukturiertes, methodisches Vorgehen wichtig. So kann die erfolgreiche Funktion mit Erfüllung aller Anforderungen sichergestellt werden.

3.1. Methodisches Vorgehen

Die Methodik ist dabei das Erstellen einer Anforderungsliste, die Anwendung des **V-Modells** und einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (**FMEA**) zur Absicherung von Risiken. Sie sind nachfolgend in dieser Reihenfolge aufgezählt, jedoch erfolgt die Anfertigung und Ergänzung von **V-Modell** und **FMEA** parallel. Beide sind voneinander abhängig.

3.1.1. Anforderungen

Zur Entwicklung nach Anforderungen müssen diese zuerst festgelegt werden. Nachfolgend sind deshalb die Anforderungen aufgelistet. Dabei wird in Basisanforderung (**BA**), Leistungsanforderung (**LE**) und Begeisterungsanforderung (**BE**) unterschieden. **BA** müssen zum Erfolg des Projekts erfüllt werden. Bei der Erfüllung von **LE** steigt mit dem Grad der Erfüllung der Erfolg des Projekts. **BE** sind optionale Anforderungen, welche auf den Erfolg des Projekts nicht wirklich notwendig sind. Sie stellen dennoch eine schöne Erweiterung dar.

ID	Anforderung	Beschreibung	Typ
A1	Kollimierter Strahlengang	durchgängige Zylindermantelfläche, $d \geq 250 \text{ mm}$	LE
A2	Produktsicherheit	Erfüllung der Anforderungen für Klasse 3B-Laser	BA
A3	Ansteuerung	DMX-Bus	LE
A4	Farbspektrum	Wählbarer Farbbereich aus dem Weißlichtspektrum	BA
A5	Umgebung	Betrieb bis $\vartheta < 40^\circ$	LE

Tabelle 3.1.: Anforderungen an das Gesamtsystem.

3.1.2. V-Modell

Zur Struktur der Entwicklung wird das **V-Modell** genutzt. Es eignet sich besonders gut für die Entwicklung mechatronischer Systeme, da es die Komplexität des Projekts verteilt. Dabei können die verschiedenen Disziplinen einzeln gelöst werden und anschließend für die interdisziplinäre Gesamtlösung zusammengebracht werden. Zu Beginn werden aus den Anforderungen an das Gesamtsystem 3.1 die jeweiligen Anforderungen für einzelne Subsysteme (Baugruppen) abgeleitet. Dabei ergeben sich folgende Subsysteme.

Nr.	Name	Beschreibung
S1	Grundrahmen	Halterung für Parabolspiegel, Motor, Lasermodule und Elektronik
S2	Rotationsspiegel	Angetriebener, rotierender Spiegel
S3	Halterung Lasermodule	Positionierung des LASERs im Strahlengang, Wärmeabfuhr
S4	Ansteuerung	logische Ansteuerung der drei Farbkanäle des Lasertreibers
S5	Lasertreiber	Leistungswandlung der Ansteuerung

Tabelle 3.2.: Auflistung der Subsysteme.

Aus den Subsystemen ergeben sich Anforderungen an die einzelnen Komponenten. Die Entwicklung der einzelnen Komponenten erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln. Durch entsprechende Abhängigkeiten wird ein Querlesen der entsprechenden Kapitel empfohlen.

Anschließend werden die einzelnen Bauteile und Subsysteme integriert und getestet. Danach folgt die Gesamtintegration der Subsysteme und die Überprüfung der Anforderungen an das Gesamtsystem.

3.1.3. FMEA

Das **V-Modell** eignet sich nur begrenzt zur Analyse von Risiken. Deshalb wird es durch eine Design-FMEA (auch Konstruktions-FMEA) ergänzt. Diese Methode ist für die Entwicklung sicherheitskritischer Systeme wie Flugzeuge, Fahrzeuge oder Atomkraftwerke elementar. Sie ist eine Entwicklung des US-Militärs. Mögliche Fehler von Bauteilen und Systemen sowie der Einfluss der Fehler werden in ihr sichtbar und bewertet. Sie liefert kritische Verbesserungen und sorgt für ein sicheres Produkt.

In die FMEA fließen die Arbeiten der nachfolgenden Kapitel ein. Gleichmaßen beruhen die nachfolgenden Kapitel auf der FMEA. Sie wird laufend während der Entwicklung

aktualisiert. Hilfreiche Erklärungen zu den Systemen und Bauteilen liefern nachfolgende Kapitel. Die gesamte FMEA findet sich im Anhang A.

FMEA einfügen im Anhang

3.2. Optik

Als Lichtquelle wird ein LASER-Modul von Emma Technology Company [7] genutzt. Der Verkäufer des Produkts liefert begrenzte Information zum Produkt, weil er nicht der Hersteller ist. Gleichzeitig wird aber auch nicht der Hersteller angegeben. Bekannte Informationen finden sich in 3.5. Das Modul integriert dabei die Lichtquelle und die Leistungselektronik zur Einsteuerung. Das monochromatische Licht der drei einzelnen LASERn wird mit drei dichroischen Plättchen kombiniert. Sie reflektieren und transmittieren selektiv durch Interferenz der Wellen.

Eigenschaft	Wert
Optische Leistung	50 mW(650 nm), 50 mW(520 nm), 100 mW(450 nm)
Divergenz	< 2 mrad
Strahlform	slow: 5 mm, fast: 1,5 mm
Leistungstoleranz	± 10 mW
Arbeitstemperatur	11 – 35 °C
Frequenz	max 20 kHz (Schaltfrequenz TTL)
Leistungsaufnahme	DC 12 V; max 0,8 A 10 W

Tabelle 3.3.: Eigenschaften des LASER-Moduls.

Maßgeblich für das Optiksystem sind Anforderungen A1 für kollimierten Strahlengang und A4 für das Farbspektrum (Tabelle 3.1). Ein idealer Kollimator ist nicht realisierbar, da keine infinitesimale kleine Punktlichtquelle existiert. Nachfolgend wird deshalb ein realer Kollimator mit Restfehler beschrieben.

Zur Erfüllung der Lichtform einer Zylindermantelfläche wird das Licht der LASER-Quelle von einem schnell rotierenden, schräg gestelltem Spiegel reflektiert. Der durch eine volle Rotation entstehende Lichtkegel wird dann entsprechend gesammelt, dass sich ein möglichst kollimierter Strahlengang ergibt. Durch die Trägheit des Auges der menschlichen Verarbeitung ergeben sich durchgehende Formen des Strahlengangs, auch wenn die Ausleuchtung sequentiell erfolgt. Eine ausreichend schnelle Rotationsfrequenz ist $f > 24$ Hz. Für eine flüssige menschliche Wahrnehmung wird die Frequenz auf $f_{Mot} = 60$ Hz gelegt.

Zum Sammeln der Strahlen wird ein Parabolspiegel verwendet. In diesem werden alle den Fokuspunkt kreuzende Strahlen, welche die Spiegelfläche schneiden, kollimiert reflektiert. Für Strahlen, die den Fokuspunkt nicht kreuzen und reflektiert werden, entsteht eine Koma-Aberration. Durch die gaußsche Strahlenform der Quelle entsteht diese bei unverändertem Strahlengang also zwangsläufig.

Zur Verbesserung der Kollimation kann der Lichtstrahl weiter geformt werden. Problematisch ist bei der Verwendung von Linsen die chromatische Aberration, die aus der Dispersion entsteht. Anders als bei abbildenden Systemen kann dieser Fehler nicht durch einen Achromat (z.B. Kombination verschiedener Linsen und Brechungsindizes) vermieden werden, da nicht nur die Überlagerung im Bildpunkt, sondern im Gesamtstrahlengang von Bedeutung ist.

Zur Vermeidung der chromatischen Aberration kann stattdessen ein Spiegel verwendet werden, der gleichzeitig als Rotationsspiegel verwendet wird. Abhängig von der Form ergeben sich neue Fehler. Einen Parabolspiegel resultiert bei schräger Lage der optischen Achse zum eintreffenden Licht in einer Koma, ein sphärischer Spiegel in sphärischer Aberration. Der Strahl kann durch solche Elemente aufgeweitet werden, wobei die Divergenz $\theta \propto \frac{1}{w_0}$ abnimmt. Weitere Bauelemente können nur die Genauigkeit verbessern, aber keine ideale Lösung liefern.

Ein zweiter Ansatz ist der Verzicht auf den großen Parabolspiegel, der die ideale Punktquelle für ideale Kollimation erfordert. Der **LASER**-Strahl wird zuerst für alle Wellenlängen einzeln durch asphärische Linsen kollimiert. Auch hier ist zu beachten, dass diese Kollimation nicht ideal erfolgen kann. Anschließend können die verschiedenfarbigen Strahlen dichroisch kombiniert werden. Die Plättchen wirken dabei nur als Versatzplättchen und ändern idealerweise nicht die Divergenz. Anschließend wird der kombinierte Strahl über einen Planspiegel rotiert. Der große Spiegel hat nun statt Parabolform ebenfalls Zylinderform.

Das Grundproblem der idealen zur realen Kollimation bleibt weiterhin bestehen. Die Divergenz des Strahls wird nun nur durch die Divergenz des gaußschen Strahlenprofils (2.5) begrenzt, statt auch durch die Koma. Da bei beiden Ansätzen die Lichtquelle klein im Vergleich zum Gesamtsystem ist, kann vereinfachend von einer Punktlichtquelle und hinreichend genauer Kollimation ausgegangen werden.

Weiterhin bleibt zu erwähnen dass Kollimation durch Beugung begrenzt ist. Bei einem realisierbaren System mit endlichem Durchmesser d ergeben sich Beugungsordnungen. Diese sind aber bei $d \gg \lambda$ vernachlässigbar.

Tabelle 3.5 gibt ein elliptisches Strahlprofil an. Durch die Rotation des Strahls ergibt sich für die Zylindermantelfläche ein entsprechend ungleichmäßige Randstärke, also Kreisringdurchmesser der Zylinderwand. Dieses Problem kann durch zylindrische Linsen, Kor-

rektionsprismen oder eine Rotation des Lasers um die optische Achsen behoben werden. Aufgrund der Kosten können beide Ansätze nicht ins Projekt integriert werden.

Die kleine Divergenz von $\theta = 2 \text{ mrad}$ ergibt bei einer Verwendung mit Strahlenlänge von $l = 10 \text{ m}$ folgende Änderung des Strahlenradius $\Delta w_D(10 \text{ m}) = 2 \cdot 0,02 \text{ m}$

$$\Delta w(l) = l \tan \theta. \quad (3.1)$$

Weiter ergibt sich durch den Parabolspiegel mit nicht idealer Punktlichtquelle ein erheblicher Fehler. Er wird in der Konstruktion auf $\Delta w_P(10 \text{ m}) = 2 \cdot 0,45 \text{ m}$ berechnet. Durch Ausrichtung des Spiegels zu leichter Konvergenz kann die Abweichung auf $\Delta w_P(10 \text{ m}) = 2 \cdot 0,06 \text{ m}$ reduziert werden. Dieser Wert ist im Budget akzeptabel. Er kann in Zukunft insbesondere durch eine Fokussierung des Strahls in den Fokuspunkt des Parabolspiegels noch verbessert werden.

3.2.1. LASER-Sicherheit

Zur Vermeidung von optischem Feedback dürfen keine breiten direkt reflektierenden optischen Grenzflächen senkrecht zum Strahlengang stehen. Kein Material ist vollständig transparent, entsprechend kann Lichtleistung in die Laserdiode zurück reflektiert werden und dort für einen höheren, nicht abführbaren Wärmeleistungseintrag führen. Auch gering reflektierende Elemente werden deshalb leicht schräg im Strahlengang verbaut.

Durch die Rotation des Strahls beschränkt sich der Leistungseintrag für eine Fläche auf einen zeitlich kurzen Moment. Es wird eine maximale Leistung P für alle drei Wellenlängen angenommen. Da alle Wellenlängen im sichtbaren Bereich liegen, ist mit einer Apertur von $d_A = 7 \text{ mm}$ zu rechnen [4, S. 414], auch wenn der Strahldurchmesser kleiner ist. Bei einer Frequenz $f = 60 \text{ Hz}$ wird mit

$$t = (U_{Sp} f d_A)^{-1} = \left(\frac{\pi d f}{d_A} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

die maximale Bestrahlungsdauer $t \approx 0,15 \text{ ms}$ für vollständige Überdeckung der Apertur berechnet. Für sie gilt $\text{MZB}_{max} = 200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

$$\text{MZB} = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d^2}. \quad (3.3)$$

Es gilt $\text{MZB} = 5200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \not\leq \text{MZB}_{max}$, die Bedingung (2.9) wird also nicht erfüllt.

Bei Ausfall des Motors kann es zudem noch zu einer zeitlich konstanten Bestrahlung kommen. Da das Licht im sichtbaren Spektrum liegt, ist von einem Blenden des Nutzers und

Entfernen aus dem Strahlengang innerhalb von der Expositionsdauer $t = 10\text{ s}$ auszugehen. Ein neues $\text{MZB}_{\max} = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ wird bestimmt. Nun gilt umso mehr $\text{MZB} \not\leq \text{MZB}_{\max}$, die notwendige Bedingung ist verletzt.

In beiden Fälle ist die Bedingung für schadensfreie Bestrahlung verletzt. Das System ist mit seiner Gesamtleistung $P < 500\text{ mW}$ als Produkt der *Klasse 3B* zu Kennzeichnen. Damit einhergehend *müssen* Laserschutzbrillen getragen werden, es muss ein Schlüsselschalter, Notaus, sowie eine Warnleuchte verbaut und eine Laserschutzzone ausgewiesen werden. Bei diffuser Reflexion ist von keiner Gefahr auszugehen.

Zur Reduzierung der MZB unter den zulässigen Wert $\text{MZB}_{\max} = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ wird eine Abschwächung

$$a = \frac{\text{MZB}}{\text{MZB}_{\max}} \quad (3.4)$$

benötigt. Für die Abschwächung $a = 520$ bei stehendem Motor ist nach (2.10) mindestens $\text{OD} = 3$ notwendig.

Die Anforderung A2 an die Lasersicherheit wird bei Einhaltung der Maßnahmen erfüllt.

3.3. Mechanik

Der prinzipielle Aufbau wird durch den verwendeten Parabolspiegel bestimmt. Die Konstruktion erfolgt um diesen herum. Nachfolgende Konzeptzeichnung 3.1 zeigt symbolisch die Funktion.

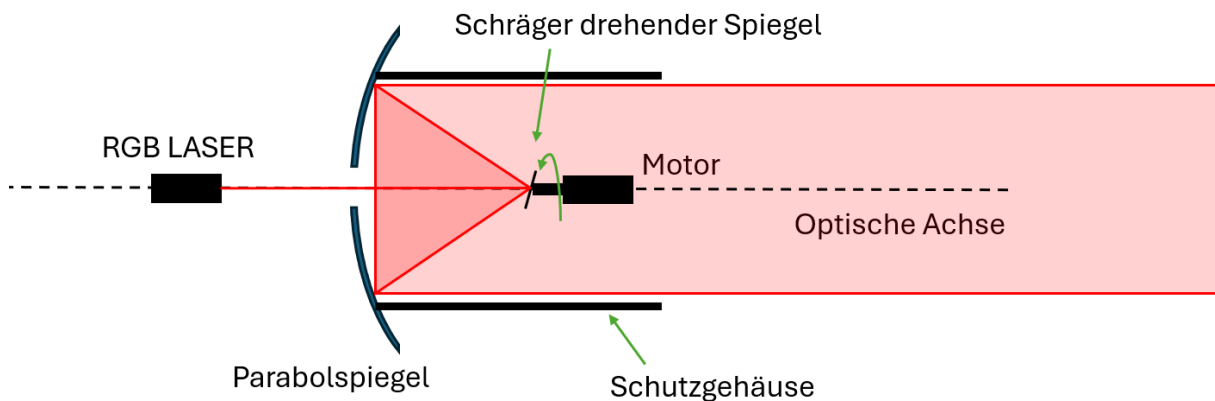


Abbildung 3.1.: Konzeptzeichnung.

Nachfolgende Abbildung 3.2 zeigt die Konstruktion als Schnittansicht, in der Vereinfachung ohne Elektronik. Dabei wird in magenta das **LASER**-Modul, in grün die Halterung dessen, in rot die Verbindung von der Halterung zum Spiegel, in schwarz der Motor, in cyan die

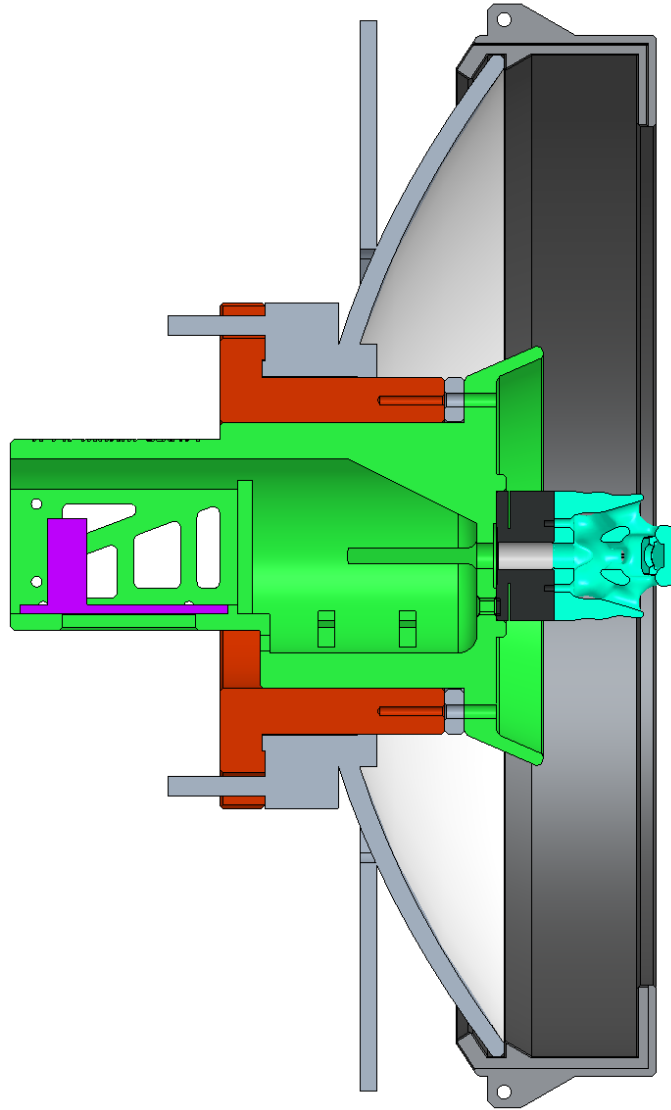


Abbildung 3.2.: Schnittansicht der Konstruktion ohne Elektronik.

rotierende Spiegelhalterung, in hellgrau der Spiegel und in dunkelgrau die Strahlblockade zur Seite dargestellt.

Die rotierende Spiegelhalterung ist zur Reduzierung von Verformungen während der Rotation auf Eigenmoden optimiert. Die niedrigste Eigenmode liegt bei $f \approx 4000$ Hz. Bei erzwungener Anregung mit $f_{Mot} = 60$ HzIn sie wird der Spiegel eingeklebt und anschließend durch ein Festkörpergelenk als Absicherung mechanisch gehalten. Das Festkörpergelenk ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Zum in Position bringen ist eine Kraft von $F = 11$ N erforderlich, um die Verformung zum Einführen zu erwirken. Die zulässigen Spannungen werden durch eine statische Finite-Elemente-Methode (FEM)-Analyse nachgewiesen. Es treten in kleinen Volumen Spannungsspitzen auf (Abb. 3.4). An diesen Stellen ist die Verformung aber deutlicher unter Bruchgrenze, es kommt also zu einer lokalen plastischen Verformung.

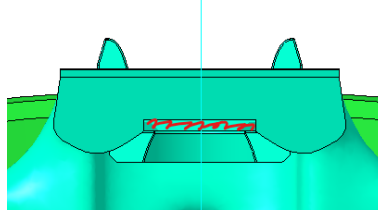


Abbildung 3.3.: Schnittansicht Festkörpergelenk; rot schraffiert Spiegel.

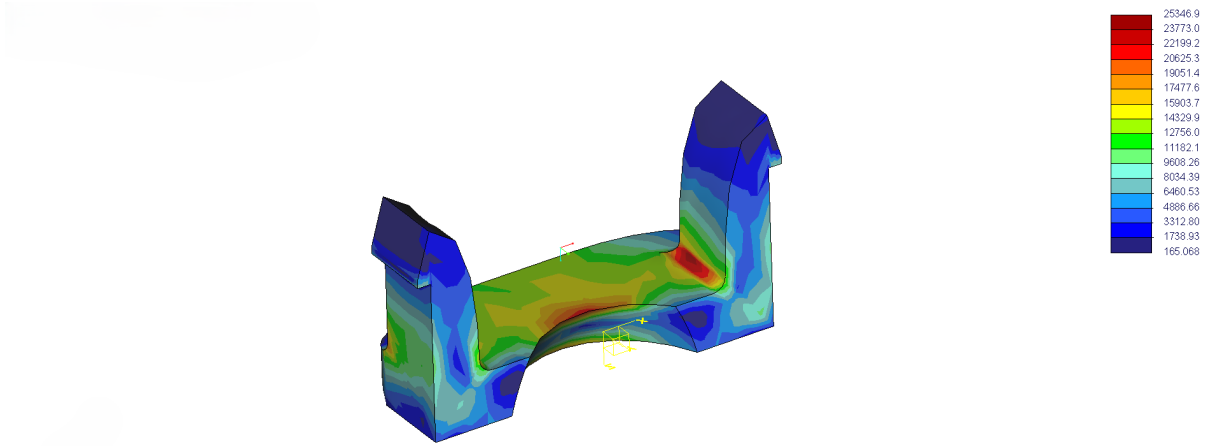


Abbildung 3.4.: Simulation des Festkörpergelenks.

3.4. Elektronik

Für eine ästhetische Ansteuerung des Lichtstrahls wird ein Dimmen und idealerweise auch eine räumliche Segmentierung umgesetzt. Für nachfolgende Betrachtung wird der Strahldurchmesser als klein angenommen. Er ist in der Umsetzung durch die Kollimationsoptik begrenzt. Durch einen großen Strahldurchmesser gibt es örtliche Überlagerungen, also Unschärfen in der Segmentierung. Zur Minimierung und zukünftigen Erweiterungsmöglichkeit mit besseren **LASER**-Modulen wird deshalb eine räumlich genaue Auflösung angestrebt. Für das Dimmen gibt es zwei Optionen, einerseits kann durch Pulsweitenmodulation (**PWM**) der *Diode* die Helligkeit über die Trägheit der Wahrnehmung eingestellt werden. Da der Strahl konstant in Bewegung ist, muss die Zeitfrequenz dafür entsprechend hoch liegen, dass sich eine nicht mehr wahrnehmbare Raumfrequenz ergibt. Die notwendige Frequenz lässt sich nachfolgend berechnen

$$f_{Steuer} = f_{Mot} f_{r,Seg} f_{r,PWM} \quad (3.5)$$

Mit einem vollen Datenframe als Raumfrequenz für die Segmente $f_{r,Seg} = 170$ (jeweils drei Farbkanäle) und Dimmerauflösung von 8 bit mit entsprechender Raumfrequenz $f_{r,PWM} = 256$, ergibt sich für die Ansteuerung des bewegten Strahls eine notwendige Zeitfrequenz

$f_{\text{Steuer}} \approx 2,6 \text{ MHz}$. Der Strahlenabstand u_{\min} ist die Inverse der Raumfrequenz und berechnet sich mit

$$u_{\min} = \frac{d\pi}{f_{r,\text{Seg}} f_{r,\text{PWM}}} \quad (3.6)$$

zu $u_{\min} \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ und liegt damit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze.

Bei stromgesteuertem Dimmen der Diode gibt es keine Anforderung an die Raumfrequenz, abgesehen von schnellen Übergängen für die einzelnen Segmente. Durch die Verwendung digitaler Logik gibt es für die Stromsteuerung zwei Optionen. Einerseits durch Digital-Analog-Wandlung, oder Nutzung des Verzögerungsverhaltens des Stromreglers durch

3.4.1. LASER-Modul

Als Lichtquelle wird ein **LASER**-Modul mit Dioden-LASER (Halbleiterlaser) von Emma Technology Company [7] genutzt (Abbildung 3.5). Der Verkäufer liefert die begrenzten

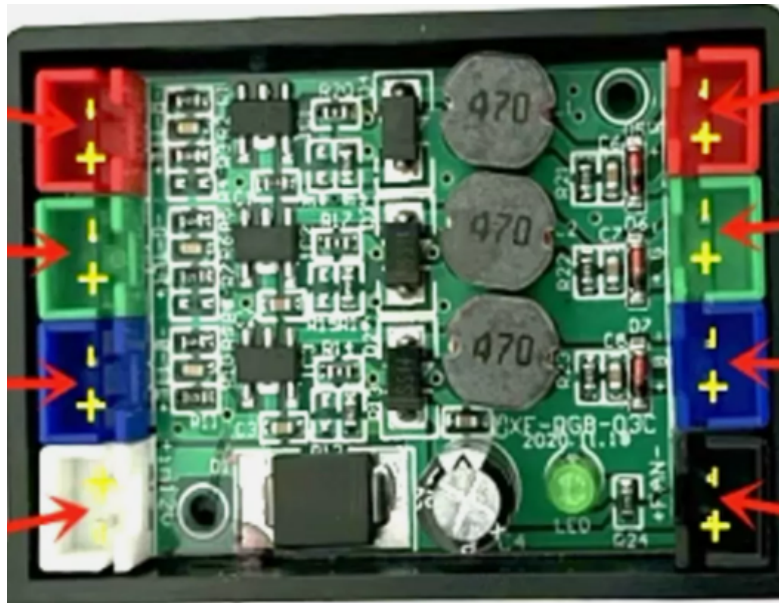


Abbildung 3.5.: Lasermodul von eBay [8].

Information 3.5 zum Produkt. Das Modul integriert dabei die Lichtquelle und die Leistungselektronik zur Ansteuerung. Durch die verwendete Transistor-Transistor-Logik (TTL)-Bauweise kann das Modul nicht gedimmt werden. Diese Anforderung ist kritisch für das Projekt, weshalb ein eigener **LASER**-Treiber verbaut wird.

Zur Auslegung der Schaltung werden vergleichende Produkte von Thorlabs [9]–[11] herangezogen und als ähnlich angenommen. Für die **LASER**-Diode mit Wellenlänge $\lambda = 650 \text{ nm}$ wird als Referenz ein Bauteil $\lambda = 638 \text{ nm}$ verwendet. Aufgrund der fehlenden Modelle der **LASER**-Dioden werden diese selbst erstellt. Aus den Kenndaten von [9]–[12] mit

Eigenschaft	Wert
Optische Leistung	50 mW(650 nm), 50 mW(520 nm), 100 mW(450 nm)
Divergenz	< 2 mrad
Strahlform	slow: 5 mm, fast: 1,5 mm
Leistungstoleranz	± 10 mW
Arbeitstemperatur	11 – 35 °C
Frequenz	max 20 kHz (Schaltfrequenz TTL)
Leistungsaufnahme	DC 12 V; max 0,8 A 10 W

Tabelle 3.4.: Eigenschaften des [LASER](#)-Moduls.

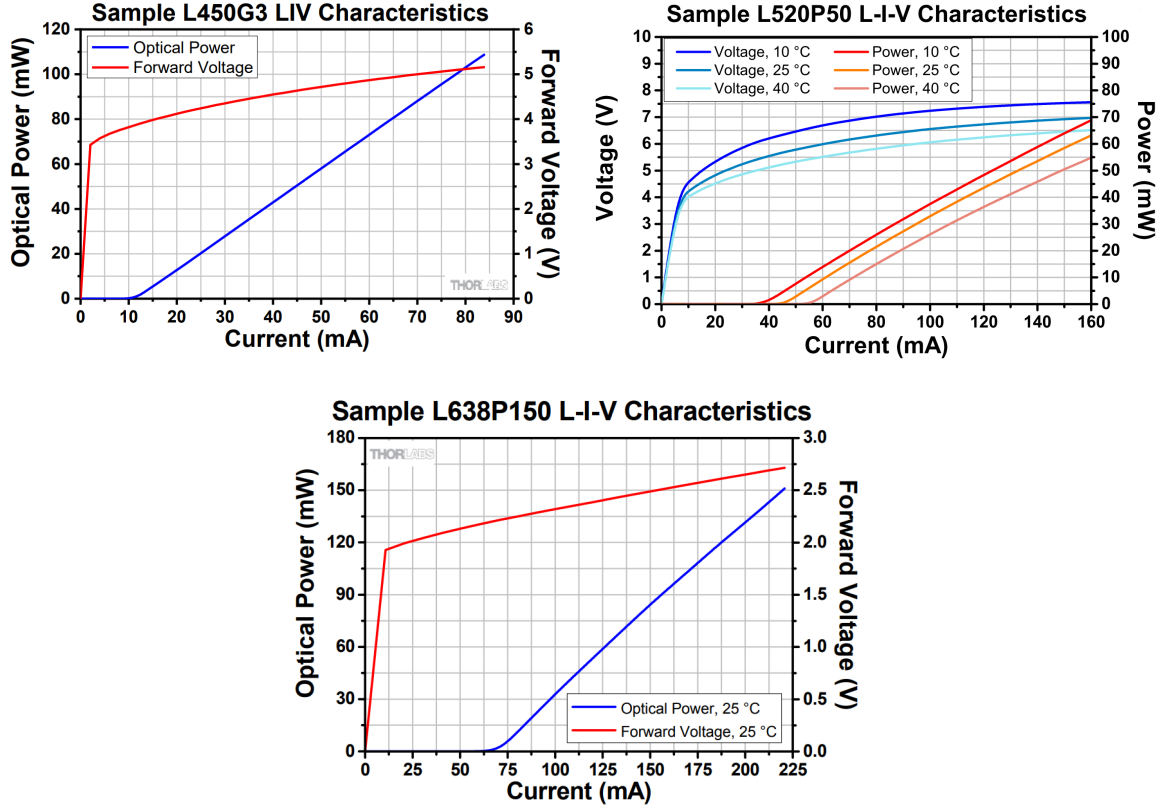
Reihenwiderstand ergeben sich die Parameter aus Tabelle 3.5. Zur genauen Modellierung

λ	$I_S \approx$	$N \approx$	$R_S \approx$	$I_{Th} \approx$	$I_{Max} \approx$
450 nm	$2,93 \cdot 10^{-9}$ A	9,57	11,0 Ω	12 mA	78 mA
520 nm	$1,24 \cdot 10^{-4}$ A	36,9	8,46 Ω	45 mA	123 mA
650 nm	$1,63 \cdot 10^{-6}$ A	8,75	3,06 Ω	21 mA	73 mA

Tabelle 3.5.: Gerundete Simulationsparameter der [LASER](#)-Dioden.

werden die Messdaten der Beispieldioden (Abbildung 3.6) [9]–[11] verwendet. Die Parameter des SPICE-Diodenmodells werden durch Kurvenanpassung bestimmt [13], [14]. Aufgrund der vorhandenen Daten können nur die Parameter I_{Th} , N^* (kombiniert N , U_T), R_S bestimmt werden [14, Tabelle 3.2]. Dafür wird eine Implementierung von Yapo [15] in *Python* verwendet. Sie optimiert die Parameter der Diodengleichung im Durchlassbereich in Gleichung (2.6) zur Fehlerminimierung zu den Messdaten (Abb. 3.6). Für den Betrieb im Sperrbereich werden die Standardparameter verwendet, da dieser für die Anwendung nicht interessant ist.

Für die Dioden mit Wellenlängen 450 nm und 520 nm können direkt die Messwerte von Thorlabs verwendet werden, da diese Dioden von gleicher Leistungsklasse sind. Für die Wellenlänge 650 nm wird das Modell durch lineare Skalierung 1/3 der Stromwerte I und optischen Leistung P_{Ph} interpoliert. Dafür werden die Daten der Diode [11] verwendet. Jede [LASER](#)-Diode D hat für den Lichtstrom einen Schwellwert $I_{th,D_n} > 0$ A durch die Stabilität des Resonators gegeben. Überlicherweise gibt es auch bei den Stromreglern eine Untergrenze des linearen Dimmbereichs. Für den maximalen Stromregelbereich muss deshalb für 0%-


 Abbildung 3.6.: P_{Ph} - I - U -Kennlinien nach Thorlabs [9]–[11].

100% optischer Dimmung das Dynamikverhältnis des Stromregler-Integrated Circuits (ICs)

$$\max_{\substack{D_1 \dots D_n \\ \vartheta_{min} \leq \vartheta \leq \vartheta_{max}}} \left(\frac{I_{max,D_n}(\vartheta)}{I_{th,D_n}(\vartheta)} \right) \leq \frac{I_{max,R}}{I_{min,R}} \quad (3.7)$$

$$6, \bar{6} \leq \frac{I_{max,R}}{I_{min,R}}$$

gelten. Für die Umsetzung muss außerdem für den Maximalstrom $I_{max,R_n} \leq I_{max,D_n}(\vartheta)$ erfüllt sein. Das notwendige Dynamikverhältnis in (3.8) ergibt sich durch Datenblatt [12]. Die untere Grenze des lineares Dimmbereichs muss also $I_{min,R} \leq 0.15 \cdot I_{max,R}$ erfüllen. Die Schaltung wird mit dem Stromregler AL8862 [16] von Diodes Inc. mit einem Dynamikverhältnis 10 umgesetzt.

Zur Erzeugung der analog modulierten Spannung wird ein RC-Tiefpassfilter verwendet. Dafür wird ein Widerstand $\frac{U}{I} = 165 \Omega < 169 \Omega = R$ zur Strombegrenzung am Arduino

ergänzt. Der Kondensator wird mit $C = 15 \text{ nF}$ gewählt. Es ergibt sich für die Grenzfrequenz

$$f_G = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \approx 62 \text{ kHz.} \quad (3.8)$$

Die Simulation erfolgt mit nachfolgender Schaltung (Abbildung 3.7) in *LTSpice*.

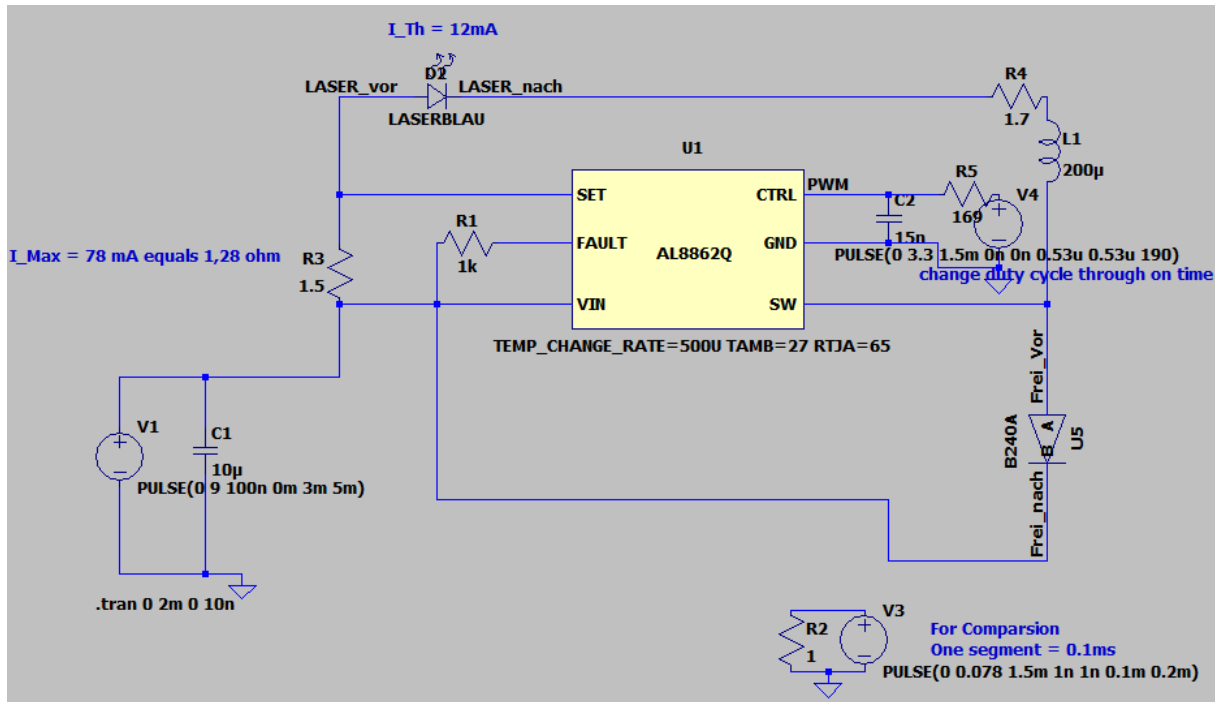


Abbildung 3.7.: Schaltung in *LTSpice*.

Zur Verifikation der Schaltung werden pro Farbkanal die jeweiligen Grenzwerte mit den Simulationsergebnissen in Tabelle 3.6 verglichen. Zum vollständigen Dimmen bis zur unteren Grenze $P_{Ph} = 0 \text{ W}$ wird das Unterschreiten des Schwellstroms I_{Th} bei Schaltverhältnis $D = 0,130$ getestet. Zum Test des Maximalstroms wird das maximale Schaltverhältnis $D = 1$ gesetzt. Der Strom bei minimaler Dimmung des blauen LASER liegt knapp über

λ	R_{Shunt}	L	$I_{Th}(D = 0,13)$	$I_{Max}(D = 1)$	P_{Ges}
450 nm	$1,5 \Omega$	$200 \mu\text{H}$	$15,4 \text{ mA}^* > 12 \text{ mA}$	$75,5 \text{ mA}^* \leq 78 \text{ mA}$	384 mW
520 nm	$0,953 \Omega$	$200 \mu\text{H}$	$12 \text{ mA}^* \leq 45 \text{ mA}$	$120 \text{ mA}^* \leq 123 \text{ mA}$	887 mW
650 nm	$1,74 \Omega$	$200 \mu\text{H}$	$13,3 \text{ mA}^* \leq 21 \text{ mA}$	$69,4 \text{ mA}^* \leq 73 \text{ mA}$	203 mW

Tabelle 3.6.: Simulationsergebnisse der LASER-Treiberschaltungen.

der Grenze I_{Th} .

Bei der Simulation lassen einige Parameter auf Ungenauigkeiten im Modell schließen. Die Totzeit von Auslösen des Komparators bis zum Schalten $t_{PD} = 100\text{ ns}$ des Datenblatts wird nicht berücksichtigt. Dies wird durch die fehlende Verzögerung zwischen Strom- und Spannungsänderung in Abbildung 3.8 sichtbar. Während dieser Zeit steigt/fällt der

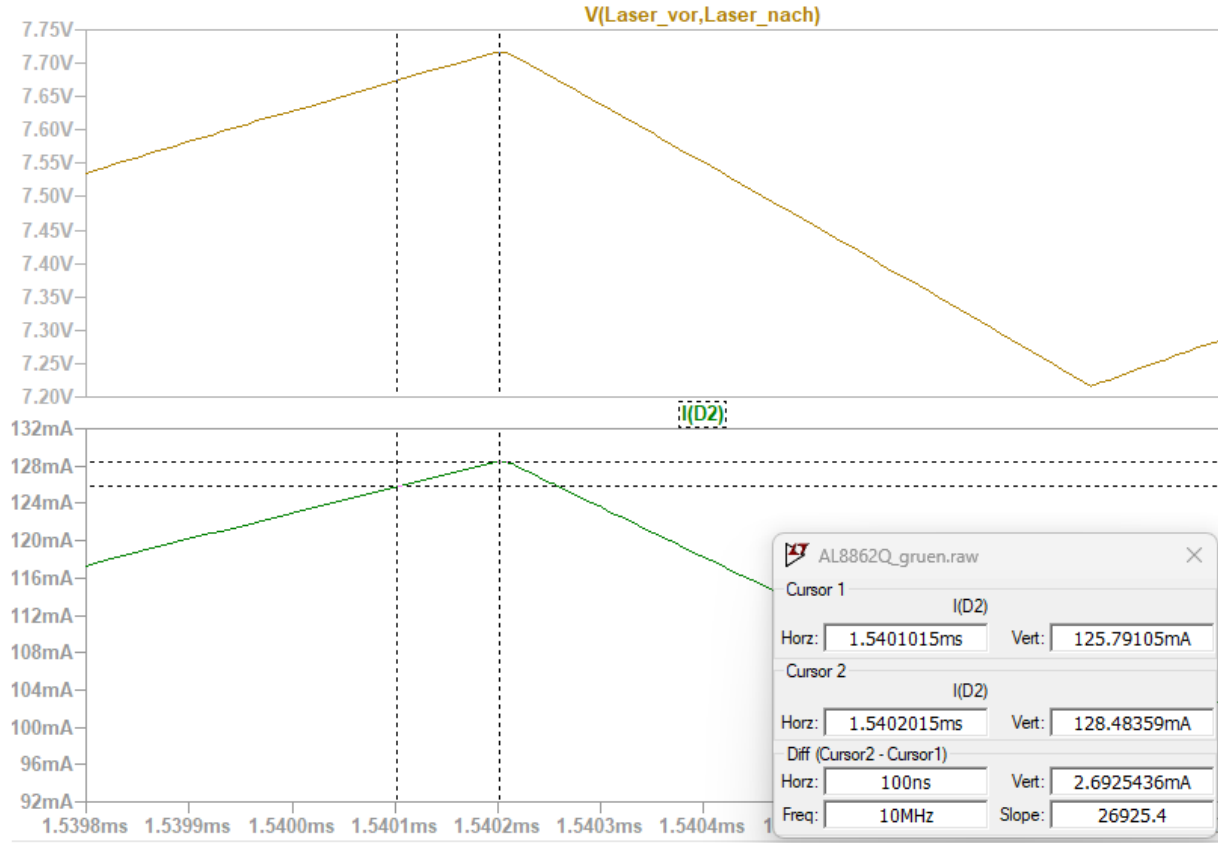


Abbildung 3.8.: Fehlende Totzeit und Beispiel Messung von $\Delta I_{Max} \approx 2,7\text{ mA}$.

Strom weiterhin. Aus diesem Grund sind in der Tabelle mit * markierte Werte um ein $\Delta I_{Max}(t = t_{PD})$ ergänzt. Es wird in guter Näherung unmittelbar vor dem Schaltzeitpunkt gemessen, weil der Anstieg nichtlinear ist.

Weiter ist der Strom $I_{VIN} = 0\text{ A}$ vernachlässigt, aber die interne Spannungsversorgung wird von ihm gespeist.

Dieses Verhalten wird auch mit der Kalkulationstabelle des Herstellers verglichen [17]. Die dort angegebenen Werte für I_{Max} liegen unter den Ergebnissen der Simulation. Bei Verwendung dieser Ergebnisse, könnte der Maximalstrom durch andere Bauteilparameter näher an die Grenze gelegt werden. Mit diesen Parametern wird in der Simulation der Maximalstrom überschritten, was zur Zerstörung der Diode führt. Deshalb wird die konservative Auslegung über die Simulation mit Korrektur gewählt.

An den Strommesswiderständen gilt für die maximale Verlustleistung $P_V = 0,125\text{ W} > (123\text{ mA})^2 \cdot 1,65\Omega$. Über die Freilaufdiode entstehen kurze Stromspitzen. Diese liegen unterhalb der Grenze für zulässige

Für den Stromregler ergibt sich die Verlustleistung mit der Simulation mit m Zeitschritten

$$P_{V,avg} = \frac{1}{m} \sum_{t=0}^{t=t_{Per}} (P_{SW}(t) + P_{CTRL}(t) + P_{SET}(t)). \quad (3.9)$$

Für die drei Dioden ergeben sich Verlustleistungen $P_{V,avg}(\lambda) \approx \{16,8 \text{ mW}; 21,2 \text{ mW}; 25,7 \text{ mW}\}$. Über den Wärmewiderstand $R_{\theta JA}$ Junction-Ambient [16] berechnet sich die Erwärmung des IC innerhalb der zulässigen Werte zu

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta &= R_{\theta JA} \cdot P_{V,avg} \\ &= 58 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 25,7 \text{ mW} \approx 1,49 \text{ K}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Die Verlustleistung über die Freilaufdiode aus der Simulation ergibt

$P_{V,avg}(\lambda) \approx \{15,9 \text{ mW}; 3,9 \text{ mW}; 11,1 \text{ mW}\}$ und liegt deutlich unter der angegebenen Leistung im Datenblatt [18]. Die auftretenden Stromspitzen $I_{Max} = 27 \text{ A} < 50 \text{ A}$ mit Dauer 1,2 ns liegen unterhalb der Grenze [18].

Die Wirkungsgrade ergeben sich für die drei Schaltungen zu $\eta_B \approx 0,92$, $\eta_G \approx 0,95$, $\eta_R \approx 0,83$.

3.4.2. Motorregler

Zum Betrieb des bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC)-Motors GM3506 wird der Motorregler *TI MCF8315CQ1* verbaut [19]. Er erlaubt eine Ansteuerung ohne mechanischen Sensor. Die Kommunikation zum Mikrocontroller erfolgt über I²C und direkt über den Fehler (FLT)-Ausgang für eine fehlersichere Unterdrückung des LASER.

Die Verlustleistung über den Motorregler berechnet sich als Summe der einzelnen Verlustleistungen. Diese sind die Feld-Effekt-Transistor (FET) im jeweils leitenden Zustand und während des Schaltvorgangs, der interne Linearregler, der Tiefsetzsteller und die Standby-Leistung.

Die Verlustleistungen über den Motorregler sind im Datenblatt [19] angegeben. Der Motorregler benötigt eine interne Versorgungsspannung U_{AVDD} . Diese stellt ein interner Linearregler bereit. Da bei Versorgung mit $U_{VM} = 24 \text{ V}$ eine hohe Verlustleistung im Linearregler auftritt, wird der optimale interne Tiefsetzsteller verwendet. Mit ihm wird der Linearregler mit $U_{BK} = 5 \text{ V}$ versorgt. Die Verlustleistung über den Linearregler ist

$$\begin{aligned} P_{V,LDO} &= (U_{BK} - U_{AVDD}) \cdot I_{AVDD} \\ &= (5 \text{ V} - 3,3 \text{ V}) \cdot 20 \text{ mA} \approx 36 \text{ mW}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

für den Tiefsetzsteller bei $\eta = 0,9$

$$\begin{aligned} P_{V,BK} &= \frac{1}{\eta} \cdot U_{BK} \cdot I_{BK} \\ &= \frac{1}{0,9} \cdot 5 \text{ V} \cdot 20 \text{ mA} \approx 11 \text{ mW}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Im Standby-Modus tritt die Verlustleistung

$$\begin{aligned} P_{V,ST} &= U_{VM} \cdot I_{VMS} \\ &= 24 \text{ V} \cdot 29 \text{ mA} \approx 0,700 \text{ W}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Für die FET im leitenden Zustand ergibt sich eine Verlustleistung von

$$\begin{aligned} P_{V,CON} &= 3 \cdot (I_{RMS(FOC)})^2 \cdot R_{ds,on} \\ &= 3 \cdot (1 \text{ A})^2 \cdot 430 \text{ m}\Omega \approx 1,29 \text{ W}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Für das Schalten der FET berechnet sich die Verlustleistung zu

$$\begin{aligned} P_{V,SW} &= 3 \cdot I_{PK(FOC)} \cdot U_{PK(FOC)} \cdot t_{rise/fall} \cdot f_{PWM} \\ &= 3 \cdot \sqrt{2} \cdot 1 \text{ A} \cdot 16 \text{ V} \frac{0,6 \cdot 24 \text{ V}}{125 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}} \cdot 25 \text{ kHz} \approx 195 \text{ mW}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Die Summe der Verlustleistungen ist

$$\begin{aligned} P_{V,MCF} &= P_{V,LDO} + P_{V,BK} + P_{V,ST} + P_{V,CON} + P_{V,SW} \\ &\approx 2,43 \text{ W}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta = 40^\circ\text{C}$ ergibt sich mit dem Wärmeübergangswiderstand $R_{\theta JA}$

$$\begin{aligned} \vartheta_J &= R_{\theta JA} \cdot P_{V,avg} + \vartheta_{A,max} \\ &= 28 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 2,43 \text{ W} + 40^\circ\text{C} \approx 108^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Der Wärmeübergangswiderstand $R_{\theta JA}$ ist ein Wert aus einem Testaufbau mit einer Testplatte nach Norm, die nicht der Platine in diesem Projekt entspricht. Die Vereinfachung wird aber als hinreichend genau angenommen, da der Unterschied zur maximalen Übergangstemperatur $\vartheta = 150^\circ\text{C}$ ausreichend groß ist. Auch der angenommene Widerstand $R_{ds,on}$ ist schon an der maximalen Obergrenze bei $\vartheta_J = 150^\circ\text{C}$. In der Umsetzung ist er wie vorher bewiesen niedriger.

Der Motor hat eine Scheinleistung S von

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} \cdot I \cdot U \\ &= \sqrt{3} \cdot 12 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \\ &= 20,8 \text{ W}. \end{aligned} \tag{3.18}$$

Der Wirkungsgrad ergibt sich dann im Lastfall zu

$$\begin{aligned} \eta_{Reg} &= \frac{S}{S + P_{V,MCV}} \\ &= \frac{20,8 \text{ W}}{2,43 \text{ W} + 20,8 \text{ W}} \\ &\approx 0,90 \end{aligned} \tag{3.19}$$

und im Fall von keiner Last durch ein anderen $P_{V,MCV}(U = 16 \text{ V}, I = 0,17 \text{ A})$ zu

$$\begin{aligned} \eta_{Reg} &= \frac{S}{S + P_{V,MCV}} \\ &= \frac{4,71 \text{ W}}{0,82 \text{ W} + 4,71 \text{ W}} \\ &\approx 0,85. \end{aligned} \tag{3.20}$$

3.4.3. Spannungsversorgung und Platine

Zum Schutz der Schaltung wird die Spannungsversorgung mit der Elektrostatiscche Entladung ([ESD](#))-Diode *Diodes D24V0S1U2TQ-7* geschützt. Diese beschränkt die Versorgung unter die maximal zulässige Spannung des Motortreibers $U_{VM,max} = 35 \text{ V}$ und Tiefsetzstellers U_{LD} mit $U_{max} = 42 \text{ V}$. Sie begrenzt die Spannung bei Eintreten einer [ESD](#) auf $U_{CLMP} = 33 \text{ V}$ bei einer Durchbruchspannung von $U_{CLMP} = 25,5 \text{ V}$.

Da die Versorgungsspannung der Platine $U = 24 \text{ V}$ beträgt, muss sie für die Versorgung einiger Bauteile runtergeregelt werden. Auf der Platine wird deshalb ein Tiefsetzsteller zur Spannungsversorgung mit $U = 5 \text{ V}$ verbaut. Der Arduino hat einen Power-Management-[IC](#) verbaut, welcher mit $U = 5 \text{ V}$ über das Netz VIN [\[20, S. 7, 10\]](#) versorgt wird. Die gleiche Spannung benötigt der MAX485 (M485). Die notwendige Leistung berechnet sich mit Werten aus den Datenblättern [\[21\]](#), [\[22\]](#)

$$\begin{aligned} P_{\mu C} &= \sum P = U_{M485} \cdot I_{M485} + U_{H7} \cdot I_{H7} \\ &= 5 \text{ V} \cdot 900 \mu\text{A} + 5 \text{ V} \cdot 230 \text{ mA} \approx 1,15 \text{ W}. \end{aligned} \tag{3.21}$$

Diese Leistung liefert ein Tiefsetzsteller mit dem IC *Rohm BD9G101G*. Für diesen Strom ist der Wirkungsgrad $\eta_{5V}(I_{Out}) = 0,82$ [23]. Die abgegebene Leistung ist dabei deutlich unter der maximalen thermischen Leistung $1,15 \text{ W} \cdot (1 - 0,82) = 207 \text{ mW} < 600 \text{ mW}$.

Die Spule muss für den Spitzenstrom $I_{L,PK}$ mit

$$\begin{aligned} I_{L,PK} &= I_{Out} + \frac{\Delta I_L}{2} \\ &= I_{Out} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(U_{In} - U_{Out})}{L} \cdot \frac{U_{Out}}{U_{In}} \cdot \frac{1}{f} \\ &= 230 \text{ mA} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(24 \text{ V} - 5 \text{ V})}{4,7 \mu\text{H}} \cdot \frac{5 \text{ V}}{24 \text{ V}} \cdot \frac{1}{1,5 \text{ MHz}} \approx 318 \text{ mA} \end{aligned} \quad (3.22)$$

geeignet sein.

Der gleiche IC wird auch zur Spannungsversorgung der *LASER*-Treiber genutzt. Wenn die *LASER*-Treiber direkt bei $U = 24 \text{ V}$ betrieben werden, haben sie dann eine größere Stromabweichung als bei einer niedrigeren Betriebsspannung. Deshalb wird ein zweiter Tiefsetzsteller mit der Ausgangsspannung $U_{LD} = 9 \text{ V}$ verwendet. Die notwendige Leistung $P_{9V} \approx 1,4 \text{ W}$ berechnet sich aus der maximalen Leistung aus Tabelle 3.6. Der maximale Strom ergibt sich nach 3.22 mit $I_{Out} = \frac{P_{9V}}{U} \approx 156 \text{ mA}$ und $U_{Out} = 9 \text{ V}$ zu $I_{L,PK} = 364 \text{ mA}$. Es ergibt sich der Wirkungsgrad durch lineare Interpolation zwischen η_{5V} und η_{12V} zu $\eta_{9V}(I_{Out}) = 0,84$ [23]. Die abgegebene Leistung ist dabei deutlich unter der maximalen thermischen Leistung $1,4 \text{ W} \cdot (1 - 0,84) = 224 \text{ mW} < 600 \text{ mW}$.

Die Softstart-Funktion des ICs erhöht beim Start die Spannung von 0 V auf U_{LD} innerhalb von $t = 3 \text{ ms}$. Der Ladestrom der *LASER*-Kondensatoren wird durch eine Simulation auf $I_{Start} \approx 3 \cdot 30 \text{ mA}$ geschätzt und liegt damit unter dem normalen Betriebsstrom $I_{Start} < I_{Out}$.

Die Platine benötigt ein Netzteil mit $U = 24 \text{ V}$ und einer Wirkleistung von

$$\begin{aligned} P_{24} &= \sum P = \frac{P_{\mu C}}{\eta_{5V}} + \frac{P_{LASER}}{\eta_{9V}} + P_{MOT} + P_{V,MCF} \\ &= \frac{1,15 \text{ W}}{0,82} + \frac{1,4 \text{ W}}{0,84} + 2,43 \text{ W} + 25 \text{ W} \\ &\approx 30,5 \text{ W}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Abbildung 3.9 zeigt die Oberseite der Platine. Die großflächigen Via-Stitches rechts dienen der Schirmung der *LASER*-Ansteuerung. Die Dupont-Steckverbinder dienen dem Testbetrieb der Platine in Segmenten. Im Betrieb werden sie mit Steckbrücken geschlossen. Die Schraubklemme links dient dem Anschluss eines Notaus Knopfes. Er wird als Öffner betrieben als Kabelbruchsicherung. Er wird durch eine ESD-Diode vor Überspannung

durch EMV geschützt und mit einem Kondensator stabilisiert und steuert den *Enable*-Pin des 9V-Tiefsetzstellers an.

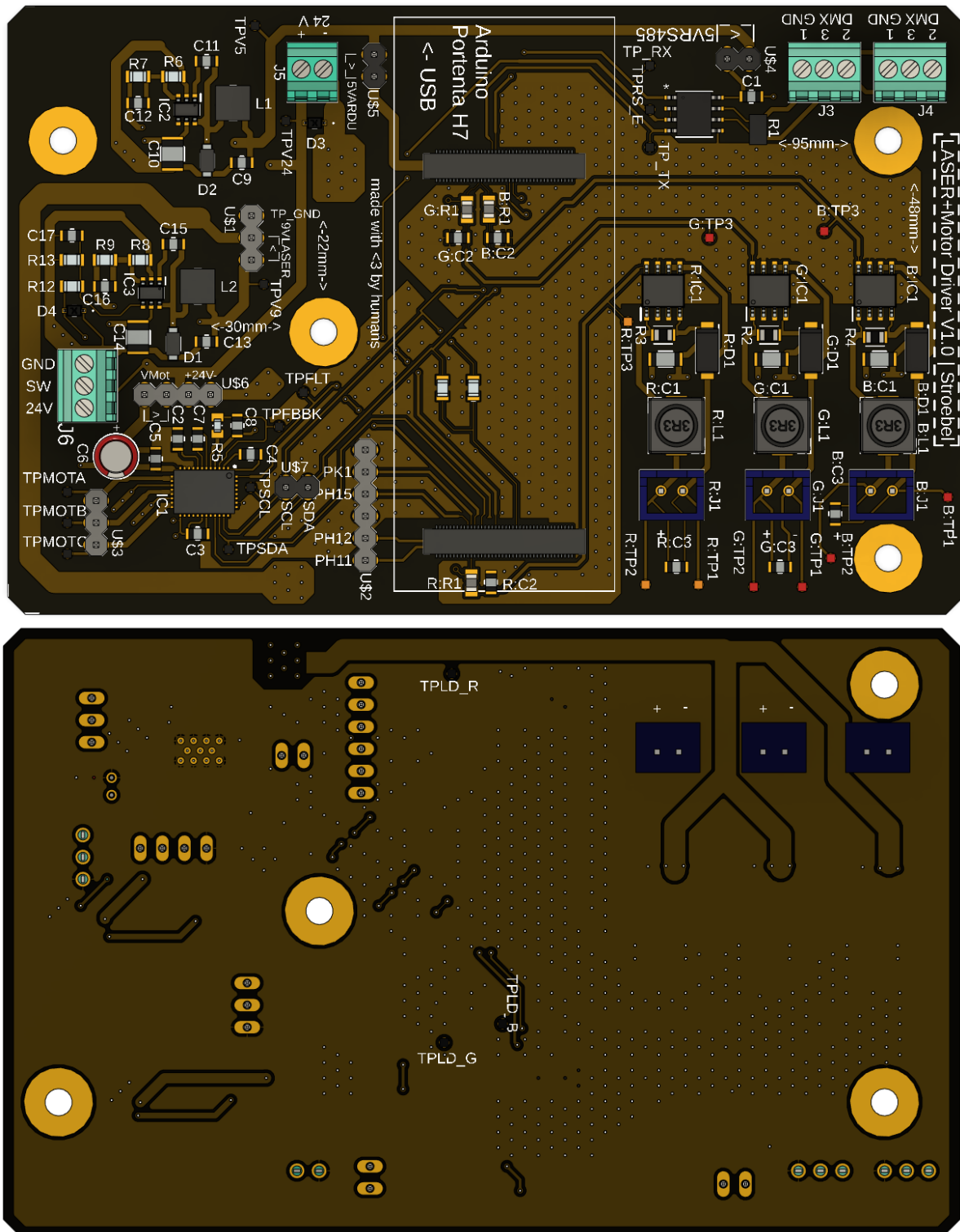


Abbildung 3.9.: Ober- und Unterseite der Platine.

3.5. Programmierung

Eine Schwierigkeit stellt die Varianz der DMX Wiederholfrequenz dar. Sie beträgt nicht immer $f = 44 \text{ Hz}$, sondern kann auch niedriger liegen. Entsprechend darf das Timing der Ansteuerung nicht von ihr abhängen.

4. Validierung und Test

5. Zusammenfassung und Ausblick

Literatur

- [1] „DALL · E 3“. (), Adresse: <https://openai.com/index/dall-e-3/> (besucht am 30.04.2025).
- [2] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer, 2017, ISBN: 978-3-662-55789-1 978-3-662-55790-7. DOI: 10.1007/978-3-662-55790-7. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-55790-7> (besucht am 03.02.2025).
- [3] Sellmeier, „Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen“, *Annalen der Physik*, Jg. 219, Nr. 6, S. 272–282, 1871, ISSN: 1521-3889. DOI: 10.1002/andp.18712190612. Adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.18712190612> (besucht am 03.02.2025).
- [4] M. W. Sigrist, *Laser: Theorie, Typen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, ISBN: 978-3-662-57514-7 978-3-662-57515-4. DOI: 10.1007/978-3-662-57515-4. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-57515-4> (besucht am 05.02.2025).
- [5] I. E. Commission, *IEC 60825-1:2014: Safety of laser products*. Adresse: <https://webstore.iec.ch/en/publication/3587> (besucht am 06.02.2025).
- [6] A. N. S. Institute, *ANSI E1.11-2008 (R2018) - Entertainment Technology – USITT DMX512-A – Asynchronous Serial Digital Data Transmission Standard for Controlling Lighting Equipment and Accessories*, 2018. Adresse: <https://webstore.ansi.org/standards/esta/ansie1112008r2018> (besucht am 07.02.2025).
- [7] „DiodeLaser 200mw 638nm/520nm/450nm Red/Green/Blue RGB Laser Diode Module Stage Lighting TTL“, eBay. (), Adresse: <https://www.ebay.com/itm/126737848855> (besucht am 05.02.2025).
- [8] „300mW RGB Stage Light Animation Light Source Module Infrared Laser Head“, eBay. (), Adresse: <https://www.ebay.com/itm/126589546432> (besucht am 05.02.2025).
- [9] Thorlabs, *450nm Laser Diode L450G3*. Adresse: <https://www.thorlabs.de/drawings/e4e542e2e6991025-F9AACB5C-D3E0-C25D-B707B3B439FDA8A4/L450G3-SpecSheet.pdf> (besucht am 08.02.2025).
- [10] Thorlabs, *520nm Laser Diode L520P50*. Adresse: <https://www.thorlabs.de/drawings/e4e542e2e6991025-F9AACB5C-D3E0-C25D-B707B3B439FDA8A4/L520P50-SpecSheet.pdf> (besucht am 08.02.2025).

- [11] Thorlabs, *638nm Laser Diode L638P150*. Adresse: <https://www.thorlabs.de/drawings/e4e542e2e6991025-F9AACB5C-D3E0-C25D-B707B3B439FDA8A4/HL6364DG-SpecSheet.pdf> (besucht am 08.02.2025).
- [12] Thorlabs, *473nm Laser Diode L473P100*. Adresse: <https://www.thorlabs.de/drawings/e4e542e2e6991025-F9AACB5C-D3E0-C25D-B707B3B439FDA8A4/L473P100-SpecSheet.pdf> (besucht am 08.02.2025).
- [13] L. Sturm, *Rechnerunterstützte Auswertung von Diodenkennlinien*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente, 22. Okt. 2022. Adresse: https://www10.cs.fau.de/publications/theses/2010/Sturm_SA_2010.pdf.
- [14] H. T. Russell, *The SPICE Diode Model*, 4. Aug. 1991. Adresse: <https://ltwiki.org/files/SPICEdiodeModel.pdf>.
- [15] T. Yapo, *Tedyapo/Led-Modeling*, 20. Feb. 2024. Adresse: <https://github.com/tedyapo/led-modeling> (besucht am 20.03.2025).
- [16] Inc. Diodes, *AL8862 Datenblatt*, Sep. 2022. Adresse: <https://www.mouser.de/datasheet/2/115/AL8862-1274720.pdf> (besucht am 14.02.2025).
- [17] Inc. Diodes, *AL8862Q Design Calculator*. Adresse: <https://www.diodes.com/part/view/AL8862Q> (besucht am 22.02.2025).
- [18] Inc. Diodes, *B220/A - B260/A Datasheet*, Juli 2015. Adresse: https://eu.mouser.com/datasheet/2/115/DIOD_S_A0001756908_1-2512586.pdf (besucht am 22.02.2025).
- [19] T. Instruments, *MCF8315C-Q1 Sensorless Field Oriented Control (FOC) Integrated FET BLDC Driver*, 2024. Adresse: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mcf8315c-q1.pdf?ts=1743363162430&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F.
- [20] A. S.r.l., *Arduino® Portenta H7 Pinout*, 24. Jan. 2025. Adresse: <https://docs.arduino.cc/resources/schematics/ABX00042-schematics.pdf> (besucht am 25.01.2025).
- [21] A. S.r.l., *Arduino® Portenta H7 Collective Datasheet*, 24. Jan. 2025.
- [22] A. Devices. „MAX485 Datasheet and Product Info“. (), Adresse: <https://www.analog.com/en/products/max485.html> (besucht am 26.02.2025).
- [23] R. Semiconductor, *BD9G101G - Simple Step-down Switching Regulators with Built-in Power MOSFET*, 28. Dez. 2022. Adresse: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/power/switching_regulator/bd9g101g-e.pdf.
- [24] N. Blessing, *Vorlage FMEA*, 5. Okt. 2021.

Glossar

V-Modell

Methode zur Entwicklung komplexer, oft disziplinübergreifender Systeme; Aufteilung des Gesamtsystems in Einzelsysteme und jeweilige Komponenten; Test und Zusammenführung von Komponenten zur Erfüllung der Anforderungen an das Gesamtsystem.

A. FMEA

Nachfolgend befindet sich die vollständige FMEA. Sie wurde nach einer Vorlage von Nico Blessing [\[24\]](#) erstellt.

Anhang