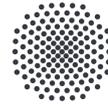




**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**
German Aerospace Center



University of Stuttgart
Germany

Bachelorarbeit

Entwurf und Erprobung eines optischen Sensors für die relative Druckmessung in der Luftfahrt

Design and testing of an optical sensor for relative pressure measurement in aviation

Vorgelegt von
Tobias Janke

Fakultät 6: Luft- und Raumfahrttechnik
Matrikelnr.: 3536597

Prüfer

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Dekorsy
Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR)
Universität Stuttgart
und

Institut für Technische Physik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Betreuer

M.Sc. Hugo Uittenbosch
Institut für Technische Physik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

23. Mai 2024

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine Bachelorarbeit zum Thema

Entwurf und Erprobung eines optischen Sensors für die relative Druckmessung in der Luftfahrt

in der Institutsbibliothek des Instituts für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt öffentlich zugänglich aufbewahrt und die Arbeit auf der Institutswebseite sowie im Online-Katalog der Universitätsbibliothek erfasst wird. Letzteres bedeutet eine dauerhafte, weltweite Sichtbarkeit der bibliographischen Daten der Arbeit (Titel, Autor, Erscheinungsjahr, etc.). Nach Abschluss der Arbeit werde ich zu diesem Zweck meinem Betreuer neben dem Prüfaxemplar eine weitere gedruckte sowie eine digitale Fassung übergeben. Der Universität Stuttgart übertrage ich das Eigentum an diesen zusätzlichen Fassungen und räume dem Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt an dieser Arbeit und an den im Rahmen dieser Arbeit von mir erzeugten Arbeitsergebnissen ein kostenloses, zeitlich und örtlich unbeschränktes, einfaches Nutzungsrecht für Zwecke der Forschung und der Lehre ein. Falls in Zusammenhang mit der Arbeit Nutzungsrechtsvereinbarungen des Instituts mit Dritten bestehen, gelten diese Vereinbarungen auch für die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Arbeitsergebnisse.

.....

Ort, Datum, Unterschrift

Hiermit versichere ich, dass ich diese Masterarbeit selbstständig mit Unterstützung des Betreuers angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die Arbeit oder wesentliche Bestandteile davon sind weder an dieser noch an einer anderen Bildungseinrichtung bereits zur Erlangung eines Abschlusses eingereicht worden. Ich erkläre weiterhin, bei der Erstellung der Arbeit die einschlägigen Bestimmungen zum Urheberschutz fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen, etc.) enthält, habe ich diese Beiträge als solche gekennzeichnet (Zitat, Quellangabe) und eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt. Mir ist bekannt, dass ich im Falle einer schuldhaften Verletzung dieser Pflichten die daraus entstehenden Konsequenzen zu tragen habe.

.....

Ort, Datum, Unterschrift

Lizenzen:

CC BY-NC 3.0 DEED: Alexander Franzen. ComponentLibrary. 2009. [1]

Kurzzusammenfassung

Entwurf und Erprobung eines optischen Sensors für die relative Druckmessung in der Luftfahrt

Aktuell wird bei Luftfahrzeugen der Druck für die Flughöhenbestimmung über Static Ports gemessen. Diese Aufgabe soll von einem Lasersensor, basierend auf dem Prinzip eines Dispersionsinterferometers, übernommen werden. Dieser Lasersensor soll bei Störungen durch äußere Einflüsse wie beispielsweise Vereisung ein besser einsehbares Verhalten aufweisen. Jedoch ist er nur in der Lage, den relativen Druck zu messen. Deswegen ist zu Beginn eines Flugs ein von einer Bodenstation zur Verfügung gestellter Absolutwert nötig, um den absoluten Druck zu jedem Zeitpunkt festzustellen. In einem Labor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ist ein solcher Dispersionsinterferometerlaboraufbau in der Größe eines Labortisches erfolgreich getestet worden [2].

Nun folgt der nächste Schritt in Richtung Sensor, die Integration des Versuchsaufbaus in eine kompakte Form, welche den Schwerpunkt dieser Arbeit ausmacht. Dabei werden in einem CAD-Programm mehreren Komponenten erstellt, diese über Rapid-Prototyping aus Polyactiden 3D-gedruckt und mit den optomechanischen Komponenten des Dispersionsinterferometers zum vollständigen Sensor zusammengebaut. Anschließend folgt eine Druckmessung unter Laborbedingungen, deren Ergebnisse dokumentiert werden. Vorgestellt werden drei Prototypen, von denen nur der zweite gebaut und getestet wurde. Der erste diente zum Sammeln von Erfahrung mit Filament-3D-Druck und der dritte stellt eine noch nicht realisierte Weiterführung des zweiten dar. Es folgen die Messergebnisse und eine abschließende Bewertung des Forschungsprojekts.

Schlagwörter: Dispersionsinterferometer, Michelson-Interferometer, Akustooptische Modulation, Druckmessung, Rapid-Prototyping, Frequenzverdopplung, Phasenverschiebung, Festkörperlaser, Strahlteiler, D-Spiegel, Retrospiegel, Photo-Detektor

Abstract

Design and testing of an optical sensor for relative pressure measurement in aviation

Currently, the pressure for the altitude determination for aircrafts is measured by static ports. This task is supposed to be taken over from a laser sensor based on the principle of a dispersion interferometer. This laser sensor is supposed to show a more understandable performance in situations of external disturbance. It is just able to measure relative pressure. Hence at the beginning of a flight there is an absolute value from a ground station necessary to determine the absolute pressure at any time. In a laboratory at the Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) has been successfully tested a setup of a dispersion interferometer in the size of a laboratory bench [2]. Now comes the next step towards the sensor, the integration of the experimental setup in a compact shape, which is the main focus in this work. In a CAD-software are developed several components, which are rapid-prototyp-printed out of Polyactides and with the optomechanical components of the dispersion interferometer assembled to the complete sensor. Next up comes a pressure measurement under laboratory conditions whose results will be documented. There will be presented three prototypes, of these only the second one was built and tested. With the first one there was just collected experience with filament 3D printing and the third one is a not realized advancement of the second one. Following the measurement results and a final evaluation of the research project.

Keywords: dispersion interferometer, Michelson-interferometer, acousto-optic modulation, pressure measurement, rapid prototyping, frequency doubling, phase shift, solid state laser, beam splitter, D-mirror, retro mirror, photo detector

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Symbole and Akronyme	XI
Symbole	XI
Akronyme	XII
1 Einleitung	1
2 Theorieteil	3
2.1 Grundlagen der Interferometrie	3
2.1.1 Heterodyne Interferometrie	4
2.2 Akustooptische Modulation	5
2.3 Dispersionsinterferometrie (DI)	6
2.3.1 Zweifarbmessung	7
2.4 Druckmessung mittels DI	8
3 Experimentaltteil	9
3.1 Versuchsaufbau	9
3.1.1 Übersicht mit Skizze	9
3.1.2 Komponentenwahl	10
3.1.3 Strahlüberlagerung (Quadriga)	11
3.1.4 AOM-Ausrichtung	13
3.1.4.1 Beam-Picking - Problemstellung	13
3.1.4.2 Beam-Picking - Rechnung	13
3.2 Verschiedene Iterationsstufen	16
3.2.1 Erster Prototyp	16
3.2.2 Zweiter Prototyp	17
3.2.2.1 Lasersockel	18
3.2.2.2 Hauptplatte Quadriga	19
3.2.2.3 Sockel Quadriga	22
3.2.2.4 Hauptplatte AOM	24
3.2.2.5 Sockel AOM	25
3.2.2.6 Deckel	26
3.2.2.7 Werkzeuge für die Justage	28
3.2.2.8 Verbesserung der AOM-Justage	29
3.2.2.8.1 Basisstück	30
3.2.2.8.2 Drehplattform	30
3.2.2.8.3 Fixierring	33
3.2.2.8.4 AOM-Zange	33

3.2.2.9	Wände und Fülldichte	34
3.2.2.10	Beobachtungen	35
3.2.3	Dritter Prototyp (Ausblick)	35
3.3	Vorversuche und Tests	36
3.3.1	Durchmesser Passlöcher für M4-Gewindeeinsätze	36
3.3.2	Laserstrahlausbreitung	37
3.3.3	Justage auf Tisch oder Lochplatte	38
3.3.4	Durchmesser Lötgewindeeinsätze	39
3.4	Thermalmanagement	40
3.4.1	Zweiter Prototyp	40
3.4.2	Dritter Prototyp (Ausblick)	41
4	Ergebnisse	43
4.1	Finale Iteration des Prototyps	43
4.2	Charakterisierung und Messung	43
4.3	Ergebnisse Messung Laserstrahlausbreitung	43
5	Diskussion	47
5.1	Interpretation der Messergebnisse aus Kap. 4.2	47
5.2	Was wurde bzgl. Strategien beim Rapid Prototyping gelernt	47
5.3	Welche Tricks entdeckt wurden	47
5.4	Mechanische Stabilität	48
6	Fazit und Ausblick	49
	Referenzen	51
7	Anhang	55
A.	Datenblatt AOM	55
B.	Technische Zeichnungen Metallkühlungen	58
C.	AO Modulation (Auszug)	61

Abbildungsverzeichnis

2.1	Michelson-Interferometer	3
2.2	Akustooptischer Modulator (AOM): Funktionsweise symbolisch	6
2.3	DI Drachev	7
2.4	Zweifarbmessung	8
3.1	Skizze Versuchsaufbau Dispersionsinterferometer (DI)	9
3.2	Parallelversatz Strahlteiler	12
3.3	D-Spiegel	14
3.4	Winkelskizze D-Spiegel Zweiter Prototyp	15
3.5	Erster Prototyp	15
3.6	Zusammenbau Erster Prototyp	16
3.7	Erster Prototyp Einzelteile	17
3.8	Zweiter Prototyp Zusammenbau	18
3.9	Lasersockel	19
3.10	Hauptplatte Quadriga	20
3.11	Module Mirror Mount M532	20
3.12	Hauptplatte Quadriga Hinterseite	21
3.13	Modul-Mirror-Mount-1064	22
3.14	Sockel Quadriga	23
3.15	Hauptplatte AOM	24
3.16	Hauptplatte AOM Hinterseite	25
3.17	Sockel AOM	26
3.18	Deckel Quadriga	27
3.19	Deckel AOM	27
3.20	Justagewerkzeug Zweiter Prototyp 1	28
3.21	Justagewerkzeug Zweiter Prototyp 2	29
3.22	Zweiter Prototyp vergrößert	30
3.23	Foto Zweiter Prototyp	31
3.24	Basisstück	32
3.25	Drehplattform	33
3.26	Fixierring	33
3.27	AOM-Zange	34
3.28	Dritter Prototyp	36
3.29	Testteil Durchmesser Gewindeeinsätze	37
3.30	Aufbau Laserstrahlausbreitungsmessung	38
3.31	Testteil Lötgewindeeinsätze	40
3.32	Metallkühlungen	41
4.1	Messergebnisse	44
4.2	Plot Laserstrahlausbreitungsmessung	45

Tabellenverzeichnis

3.1	Testdurchmesser M6-Stifte ohne Fasen [mm]	39
3.2	Testdurchmesser M6-Stifte mit Fasen [mm]	39

Symbole and Akronyme

Symbole

Lateinische Symbole

A	V m^{-1}	elektrische Amplitude
c	m s^{-1}	Lichtgeschwindigkeit
c_0	m s^{-1}	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
E	V m^{-1}	elektrische Feldstärke
f	Hz	(elektrische) Frequenz
g	m s^{-2}	Gravitationsbeschleunigung
m	–	Beugungsordnung
n	–	Brechungsindex
p	Pa	Druck
R	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Gaskonstante
T	K	Temperatur

Griechische Symbole

η_c	ppm	CO ₂ -Gehalt
Λ	m	akustische Wellenlänge
λ	m	optische Wellenlänge
ν	Hz	(optische) Frequenz
ρ	kg m^{-3}	Dichte
Ω	Hz	(elektrische) Frequenz

Akronyme

AOM Akustooptischer Modulator. 5–10, 13, 15, 17, 18, 21–27, 29–36, 40, 41, 43, VII

BS engl. Beam Splitter - Strahlteiler. 8

DI Dispersionsinterferometer. 1, 8, 9, 43, 44, 47, 49, VII

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. 1, III

DPSSL engl. Diode Pumped Solid State Laser - diodengepumpter Festkörperlaser. 8

FV Frequenzverdoppler. 7

HBS engl. Harmonic Beam Splitter - harmonischer Strahlteiler. 8, 10, 11

OF Optischer Filter. 7

PD Photodetektor. 4, 5, 7–9, 11, 17–19, 21, 22, 24, 25, 27, 31, 36, 43

PLA Polylactid. 1, 9, 10, 16, 30, 31, 35, 39, 47–49

SDI Synthetisches Dispersionsinterferometer. 7, 8

SHG engl. Second Harmonic Generation - Frequenzverdopplung. 7, 8

1 Einleitung

Eines der wichtigsten Langstreckenfortbewegungsmittel sind die Flugzeuge. In allen Bereichen des Transports von Passagieren oder Fracht sind sie heutzutage ein unverzichtbares Werkzeug. Sie sind mit modernster Technik ausgestattet, um einen sicheren und zuverlässigen Flug zu gewährleisten. Dazu gehören auch Sensoren, die die Eigenschaften der Umgebung oder des Flugzeugs, wie zum Beispiel die Temperatur, den Druck, die Geschwindigkeit und die Ruderausschläge messen. Aus diesen Werten werden die Position und die Lage in der Luft ermittelt. Zu diesen Parametern gehört auch die Flughöhe des Flugzeugs über dem Grund oder dem Meeresspiegel. Die Flughöhe wird bei der Landung per Radar-Höhenmesser ermittelt, während des restlichen Flugbetriebs über eine Berechnung, die vom Umgebungsdruck [3] abhängt. Dieser besteht aus dem statischen sowie dem Staudruck. Beide werden von Pitot-Statik-Systemen ermittelt. Diese bestehen aus Static Ports, einem Pitot-Rohr sowie barometrischen Anzeigen im Cockpit für unter anderem die Flughöhe. Das Pitot-Rohr misst den Staudruck, die Static Ports den statischen Druck. Die Messunsicherheit der Sensoren führte zur Einführung von Sicherheitsabständen der Flugrouten, die diese Ungenauigkeiten ausgleichen [4, S. 937-938 und S. 1456]. Bei Fehlzuständen wie zum Beispiel Vereisung [5] oder Fremdkörper im Sensorbereich misst ein Barometer weiter und gibt falsche Werte an die Piloten aus, die nicht immer als Falschwerte identifiziert werden können, da sie dem erwarteten Flugverhalten ähneln können. Eine präzisere und zuverlässigere Druckmessung soll ein Lasersensor, der nach dem Prinzip eines Dispersionsinterferometers arbeitet, ermöglichen. Dieser misst jedoch nur den relativen Druck, also den Druckunterschied zwischen zwei Zuständen zu verschiedenen Zeitpunkten. Um an einen absoluten Druckwert zu gelangen wird ein Startwert benötigt. Hier bietet sich an, den absoluten Druck des Startflughafens als Ausgangswert zu nehmen, da dieser mit einem Absolutdruckmessinstrument, wie zum Beispiel einem Barometer, auf dem statischen Flughafen präzise gemessen werden kann. Ein weiterer Vorteil ist das Verhalten bei Vereisung oder Fremdkörper im Sensor. Hier gibt der Sensor keinen Wert an das Cockpit weiter, was von Computer und Piloten sofort als Fehlermeldung erkannt werden kann. Ein derartiger Lasersensor befindet sich beim DLR in der Forschung [2, 6]. Ende 2023 war ein Aufbau vorhanden, der sich über einen Labortisch erstreckte und mit dem bereits der Druck gemessen werden konnte. Der nächste Schritt in der Forschung war die Integration in einen kompakten, mobilen Aufbau, der grundsätzlich Messungen auch außerhalb des Labors ermöglichen sollte. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Integration der optomechanischen Komponenten. Dabei wurde im CAD ein mehrteiliges Gehäuse entwickelt, in das alle für die Funktion des Sensors benötigten Komponenten integriert wurden. Die fertigen Konstruktionselemente wurden mit Rapid-Prototyping aus Polylactid (PLA) 3D-gedruckt und über Schraubverbindungen miteinander verbunden.

Als erstes werden die physikalischen Grundlagen, auf denen das Prinzip des DI's beruht, erläutert. Es folgen der allgemeine Aufbau des Sensors und die Vorstellung von drei Prototypen. Der erste diente als Vortest, der zweite als vollständiger Sensor und der dritte als Konzept für weitere Iterationen in der Zukunft. Auf den zweiten Prototyp wird detailliert eingegangen, die Komponenten vorgestellt und gezeigt, welche Form er annimmt. Im Anschluss wird eine Messung der relativen Druckänderung präsentiert, die anschließend bewertet wird. Abschließend erfolgt eine Gesamtbewertung und ein Rückblick auf die gemachten Erfahrungen.

2 Theorieteil

2.1 Grundlagen der Interferometrie

Im Bereich der Optik gibt es ein Wellenphänomen, die Interferenz, der das Interferometer zugrunde liegt. Interferenz beschreibt die Überlagerung zweier Wellen nach dem Superpositionsprinzip. Hierbei kann es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz kommen. Dabei bauen die beiden Wellen aufeinander auf oder löschen sich gegenseitig aus. Diese Vorgänge kann man durch einen optischen Versuchsaufbau namens Michelson-Interferometer veranschaulichen [7, S. 42-45]. Ein Laser, passenderweise mit einer Wellenlänge im für den Menschen sichtbaren Bereich, steht an Position 1 und schickt sein Licht auf einen Strahlteiler (Position 5), der im 45° -Winkel zur Ausbreitungsrichtung des Lasers steht (siehe Abb. 2.1). Dieser lässt die Lichtmenge zur einen Hälfte bis auf einen kleinen Parallelversatz [8, S. 43, 7, S. 38] unbeeinflusst hindurch und reflektiert die andere Hälfte in Richtung Position 2. Beide Strahlen treffen jeweils auf einen planen Spiegel (Positionen 2 und 3), der sie zurück auf den Strahlteiler wirft. Hier wird jeweils wieder die Hälfte des Lichts hindurch gelassen und die andere reflektiert. Die optischen Elemente sind so zu positionieren und auszurichten, dass die Lichtanteile, die den Strahlteiler in die letzte freie Richtung (Position 4) verlassen, exakt ineinander liegen. Dieser Strahl wird jetzt auf eine weiße Wand o.Ä. gerichtet.

Nun kann man teilweise und vollständige konstruktive bzw. destruktive Interferenz beobachten, je nachdem wie groß der Weglängenunterschied der beiden Arme ist. Bei Weglängenunterschieden, die jeweils exakt einem Vielfachen der Wellenlänge entsprechen, kommt es zu konstruktiver Interferenz. Ist der Weglängenunterschied so groß, dass die Phasen nach dem zweiten Durchlaufen des Strahlteilers um π verschoben sind, kommt es zu destruktiver, in allen anderen Fällen zu teilweiser konstruktiver oder destruktiver Interferenz. Bei einem

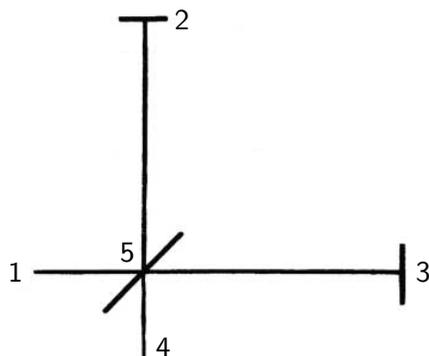


Abbildung 2.1: Michelson-Interferometer. Veränderte Darstellung nach Michelson, 1887 [9, S. 335]

kohärenten Laser kann das elektrische Feld (E-Feld) mit der Definition

$$E(t) = A \cdot \sin(\nu \cdot t) \quad (2.1)$$

dargestellt werden. Dabei sind A die Amplitude, ν die Frequenz des Lichts sowie t die Zeit. Bezogen auf das Michelson-Interferometer, bei dem zwei Laserstrahlen, die zueinander phasenverschoben sind, vorliegen, ergeben sich die zwei Gleichungen

$$E_R(t) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \sin(\nu \cdot t) \quad (2.2)$$

für den Referenzstrahl sowie

$$E_T(t) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \sin(\nu \cdot t + \phi) \quad (2.3)$$

mit der Phasenverschiebung ϕ für den Teststrahl. Nach [7, S. 42–43] ist das Signal am Photodetektor (PD)

$$S \propto |E_R + E_T|^2. \quad (2.4)$$

Setzt man nun $E_R(t)$ und $E_T(t)$ in S ein, setzt zum Vereinfachen $A = 2$, so erhält man

$$S \propto [\sin(\nu t) + \sin(\nu t + \phi)]^2 \propto \sin^2(\nu t) + 2 \cdot \sin(\nu t) \cdot \sin(\nu t + \phi) + \sin^2(\nu t + \phi). \quad (2.5)$$

Weiter gelten die drei trigonometrischen Beziehungen

$$\sin^2(\nu t) = \frac{1}{2} \cdot [1 - \cos(2\nu t)], \quad (2.6)$$

$$2 \cdot \sin(\nu t) \cdot \sin(\nu t + \phi) = \cos(\phi) - \cos(2\nu t + \phi) \quad (2.7)$$

und

$$\sin^2(\nu t + \phi) = \frac{1}{2} \cdot [1 - \cos(2\nu t + 2\phi)]. \quad (2.8)$$

Es folgt das Einsetzen von Gl. 2.6 - Gl. 2.8 in Gl. 2.5. Gängige PDs können Schwebungssignale maximal im Gigahertz-Bereich messen. Die Frequenz, die beispielsweise grünes Licht der Wellenlänge $\lambda = 532 \cdot 10^{-9}$ m hat, ergibt sich mit $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹ und

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.9)$$

zu $\nu = 5,639 \cdot 10^{14}$ Hz, was dem PD nicht mehr möglich ist zu messen. Deswegen fallen die Terme mit $\geq \nu$ raus. Übrig bleibt nun

$$S \propto 1 + \cos(\phi). \quad (2.10)$$

Erkennbar ist nun die Abhängigkeit der Signalintensität von der Phasenverschiebung der beiden Lichtstrahlen. Da die Intensität mit PDs messbar ist, lässt sich daraus die Phasenverschiebung ϕ ermitteln. Nicht mehr vorhanden ist die Abhängigkeit von der Zeit t .

2.1.1 Heterodyne Interferometrie

Nun wird einer der beiden elektrischen Felder mit einer elektrischen Frequenz $\Omega \cdot t$ moduliert. Ein Verfahren hierfür wird in Kap. 2.2 vorgestellt. Im Argument des Sinus von $E_R(t)$ kommt die Frequenzmodulation $\Omega \cdot t$ hinzu und die elektrischen Felder ergeben sich zu

$$E_R(t) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \sin(\nu \cdot t + \Omega \cdot t) \quad (2.11)$$

und

$$E_T(t) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \sin(\nu \cdot t + \phi). \quad (2.12)$$

Auch hier ist das Signal am PD

$$S \propto |E_R + E_T|^2. \quad (2.13)$$

Mit $E_R(t)$ und $E_T(t)$ ergibt sich

$$S \propto |E_R + E_T|^2 \propto \frac{1}{4} A^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos(\nu t + \Omega t)) + \frac{1}{4} A^2 \cdot 2 \cdot \sin(\nu t + \Omega t) \sin(\nu t + \phi) + \frac{1}{4} A^2 \cdot \sin^2(\nu t + \phi). \quad (2.14)$$

Einsetzen der drei trigonometrischen Beziehungen

$$\sin^2(\nu t + \Omega t) = \frac{1}{2} \cdot [1 - \cos(2\nu t + \Omega t)], \quad (2.15)$$

$$2 \cdot \sin(\nu t) \cdot \sin(\nu t + \phi) = \cos(\phi) - \cos(2\nu t + \phi) \quad (2.16)$$

und

$$\sin^2(\nu t + \phi) = \frac{1}{2} \cdot [1 - \cos(2\nu t + 2\phi)] \quad (2.17)$$

in Gl. 2.14 führt zu

$$S \propto \frac{1}{4} A^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos(\nu t + \Omega t)) + \frac{1}{4} A^2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} (\cos(\Omega t - \phi) - \cos(2\nu t + \Omega t + \phi)) + \frac{1}{4} A^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos(\nu t + \phi)). \quad (2.18)$$

Mit der Begründung aus Kap. 2.1 fallen die Terme mit $\geq \nu$ raus, A erhält wieder den Wert 2 und es bleibt

$$S \propto 1 + \cos(\Omega t - \phi) \quad (2.19)$$

übrig. Jedoch wird hier ersichtlich, dass bei diesem Intensitätssignal eine Abhängigkeit von der Zeit t besteht. Das gemessene Signal muss demoduliert werden, um ϕ zu bestimmen. Ein Interferometer mit Licht dieser frequentiellen Eigenschaften wird auch heterodynes Interferometer genannt. In einem homodynem Interferometer würde Licht von nur einer Frequenz vorkommen.

2.2 Akustooptische Modulation

Eine Frequenzmodulation lässt sich mittels eines AOM realisieren. In diesem ist ein Element aus Kristall oder Glas integriert [10], durch das das Laserlicht verläuft und welches durch einen piezoelektrischen Aktuator mit einer elektrischen Frequenz f angeregt wird. Mit den Lichtwellen passiert im Glas bzw. Kristall nun Folgendes:

Ein Teil der Lichtmenge verlässt unverändert wieder den AOM. Diese Menge wird nullte Ordnung genannt. Der andere Teil der Lichtmenge wird durch die Frequenzanregung des durchlaufenen Mediums gebeugt [11, 12]. Dabei entstehen erste, zweite usw. Ordnungen, die den AOM, abhängig von der Wellenlänge, in bestimmten Winkeln zur nullten Ordnung verlassen. Deutlich wird das durch die Gleichung

$$\theta_m \approx \frac{m \cdot \lambda}{n \cdot \Lambda}. \quad (2.20)$$

Hierbei seien $m \in \mathbb{Z}$ die Beugungsordnung, θ der Austrittswinkel der m -ten Ordnung relativ zur nullten Ordnung, n der Brechungsindex und Λ die akustische Wellenlänge. Im AOM findet bei der Beugung des Lichts auch eine Frequenzmodulation statt. Somit haben

die Laserstrahlen der gebeugten Ordnungen eine zu der der nullten Ordnung verschobene Frequenz. Diese schon in Kap. 2.1.1 erwähnte Frequenzverschiebung kann also mittels eines AOMs generiert werden. [11]

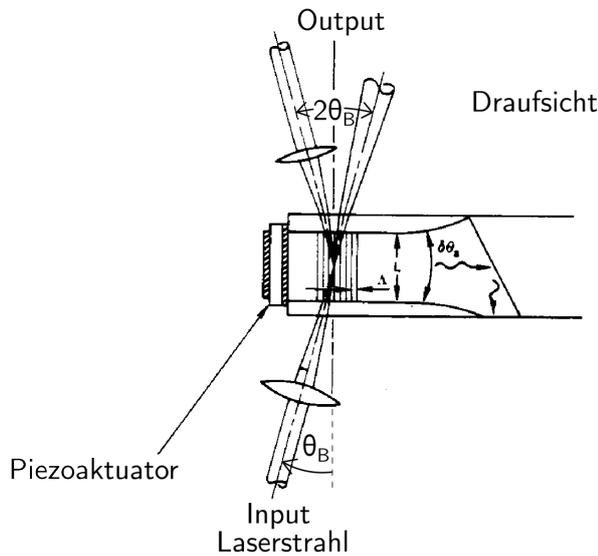


Abbildung 2.2: Symbolische Darstellung der Beugung im AOM. Veränderte Darstellung nach Young, 1981 [11, S. 2]. In dieser Visualisierung wurde die Lichtbeugung im Glas bzw. Kristall der Übersicht halber punktuell eingezeichnet, in der Realität findet diese Beugung im gesamten von der Frequenz angeregten Element statt. Der Laserstrahl kommt von schräg unten und breitet sich nach oben aus. θ ist hier der Eintrittswinkel. Der Spezialfall θ_B bezeichnet den Bragg-Winkel, bei dem nur eine Ordnung auftritt und bei der die Beugungseffizienz maximal ist. [11]

2.3 Dispersionsinterferometrie (DI)

Dispersion bezeichnet die Abhängigkeit physikalischer Eigenschaften eines Mediums in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ . In dieser Arbeit wird insbesondere der Brechungsindex betrachtet, der angibt, wie stark Licht beim Durchlaufen des Mediums gebrochen wird. Gemäß Gl. 2.9 ist der Brechungsindex auch von der Frequenz ν abhängig [7, S. 132]. Über die bekannte Formel

$$n = \frac{c_0}{c_M} \quad (2.21)$$

folgt über Gl. 2.9

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_M}. \quad (2.22)$$

Hierbei deuten die Indizes 0 auf die jeweilige Größe im Vakuum und M im Medium hin.

Abb. 2.3 zeigt das Dispersionsinterferometer nach Drachev [13]. Dabei wird das Versuchsmedium, in der Publikation von Drachev ein Plasma, zwischen zwei optischen Frequenzverdopplern platziert. Im Ersten entsteht aus einem Teil des Probestrahls mit der Frequenz ν ein frequenzverdoppelter Strahl mit der Frequenz 2ν . Beide Strahlen breiten sich auf dem nahezu exakt selben Weg durch das Plasma aus. In der Praxis liegt bei der Frequenzverdopplung eine Parallelverschiebung des generierten Strahls vor, der als Walk-Off bezeichnet wird [14]. Im Zweiten wird erneut ein Teil des ν -Strahls frequenzverdoppelt,

der restliche ν -Teil wird herausgefiltert. Letztendlich wird im PD die Signalstärke der beiden interferierenden, frequenzverdoppelten Laserstrahlen gemessen. Dabei erhält man die Phasendifferenz $\Delta\phi$ [13] von doppelter Phase des Probestrahls ϕ_1 minus die der im zweiten Frequenzverdoppler generierten Welle ϕ_2 und es ergibt sich die Gleichung

$$\Delta\phi = 2\phi_1(\nu) - \phi_2(2\nu) = \frac{2\nu}{c} \int_0^l [n(\nu) - n(2\nu)] dl. \quad (2.23)$$

Durch die lineare Abhängigkeit der Einzelphasen von ν und 2ν gegenüber mechanischen Störungen und der generell nichtlinearen Dispersion wird das DI insensitive gegenüber Vibrationen. [13]

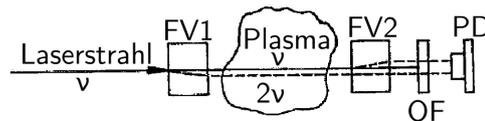


Abbildung 2.3: Aufbau des Dispersionsinterferometers nach Drachev, veränderte Darstellung, 1993 [13, S. 3]. Frequenzverdoppler (FV), PD und Optischer Filter (OF). Die durchgezogene Linie stellt den Strahl mit der Frequenz ν dar, die gestrichelte den frequenzverdoppelten mit 2ν .

2.3.1 Zweifarbmessung

Durch die Frequenzverdopplung findet gleichzeitig eine Halbierung der Wellenlänge λ statt, was Gl. 2.9 zeigt. Somit findet man Licht der Wellenlängen λ und $\frac{\lambda}{2}$ vor.

Um ein DI zu implementieren, muss die zweite Frequenzverdopplung nicht zwangsläufig im Optischen erfolgen. Ein Beispiel hierfür ist das Zweifarbinterferometer von J. Irby, welches $\Delta\phi$ im Elektrischen auswertet [12]. Ein ähnlicher Aufbau wird auch in dieser Arbeit verwendet werden, siehe Kapitel 3. Für diese Art von DI wurde die Vibrationssensitivität experimentell untersucht [6], da äußere Einflüsse wie mechanische Störungen in die gemessenen Signale einfließen. Ein Auszug der Ergebnisse ist in Abb. 2.4 dargestellt. In Teilabbildung (a) ist ein Synthetisches Dispersionsinterferometer (SDI) dargestellt. Dieses besteht aus einem Laser mit Frequenzverdopplung (SHG) - also von vornherein zwei Wellenlängen, einem AOM, mithilfe dessen der Strahl in einen Referenz- und einen Probestrahl aufgeteilt wird. Der Probestrahl durchläuft eine Teststrecke und wird durch einen Retrospiegel parallel zum Hinweg zurückreflektiert. Der genaue Aufbau ist der Beschreibung von Abb. 2.4 zu entnehmen. Eine piezoelektrische Vorrichtung regt den Retrospiegel mit Vibrationen der Schwingung

$$s(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f_v \cdot t) \quad (2.24)$$

an. Dadurch entstehen unter anderem longitudinale „Störvibrationen“, die in das am PD gemessene Signal miteinfließen. Erkennbar wird dies in Abb. 2.4 b). Je stärker die Störschwingungen am Retrospiegel sind, desto größer sind auch die gemessenen Amplituden der Störschwingungen am PD. Erkennen lässt sich dies an den großen roten Ausschlägen, die mit zunehmender Spannung eine größere Amplitude aufweisen. Die Differenzphase ist in schwarz dargestellt. Die Vibrationsausschläge sind deutlich größer als die der Differenzphase. Ermitteln lässt sich die Differenzphase aus dem Gesamtsignal rechnerisch. Einen Ansatz, bei dem die Argumente der beiden Signale am PD voneinander subtrahiert werden und die Phasenverschiebung der beiden Lichtwellen allein übrig bleibt, liefert J. Irby [12].

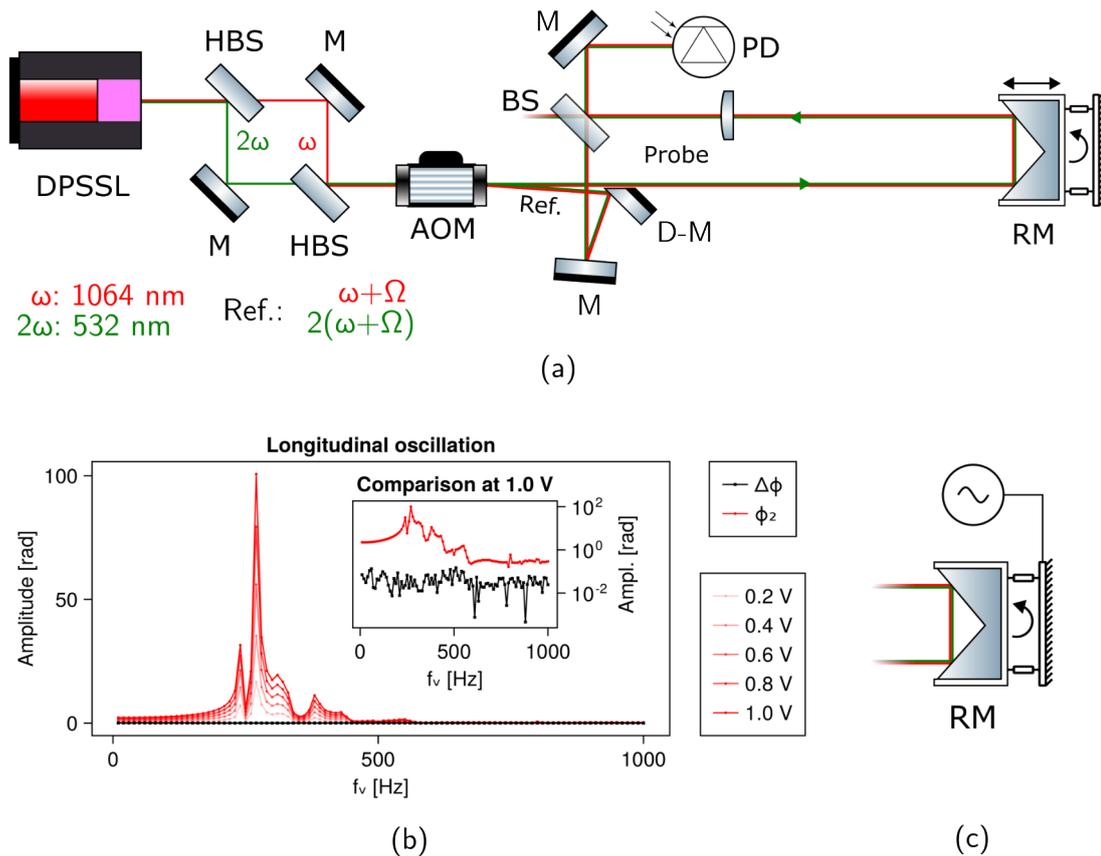


Abbildung 2.4: Veränderte Darstellung nach: Stability and Vibration Robustness of a Real-Time Synthetic Dispersion Interferometer 2023. (a) Aufbau eines SDIs. Als Laserquelle dient ein diodengepumpter Festkörperlaser (DPSSL) mit integrierter SHG, darauf folgen zwei Spiegel („M“ Mirror, engl. für Spiegel) und zwei harmonische Strahlteiler (HBS) zur Strahlüberlagerung. Der AOM teilt den Strahl in Proben- und Referenzstrahl auf. Letzterer wird über einen D-Spiegel und einen Spiegel auf einen Strahlteiler (BS) geleitet, bei dem Referenz- und Probenstrahl wieder vereint werden. Es folgt ein letzter umlenkender Spiegel zum PD. (b) Longitudinal oscillation - Längsschwingung. Darstellung der Störungen (Vibration) in rot und der gesuchten Differenzphase in schwarz. (c) Generiertes Signal am Retrospeigel („RM“ = Retro mirror). [6]

2.4 Druckmessung mittels DI

Bengt Edlén und Philip E. Ciddor haben den Brechungsindex der Luft untersucht [15, 16]. Es wurden Abhängigkeiten der Wellenlänge λ , des Brechungsindex n , dem Druck p , der Temperatur T , der Luftfeuchtigkeit rh und dem CO_2 -Gehalt η_c der Umgebungsluft ersichtlich. Daraus ergaben sich Formeln [16], mithilfe derer sich zwischen diesen Größen umrechnen lässt. Mittels des für diese Arbeit verwendeten DIs wird die Luftdruckänderung über die gemessene Differenzphase bei bekannten Wellenlängen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO_2 -Gehalt bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung des angewendeten Verfahrens findet sich in [2].

3 Experimententeil

3.1 Versuchsaufbau

3.1.1 Übersicht mit Skizze

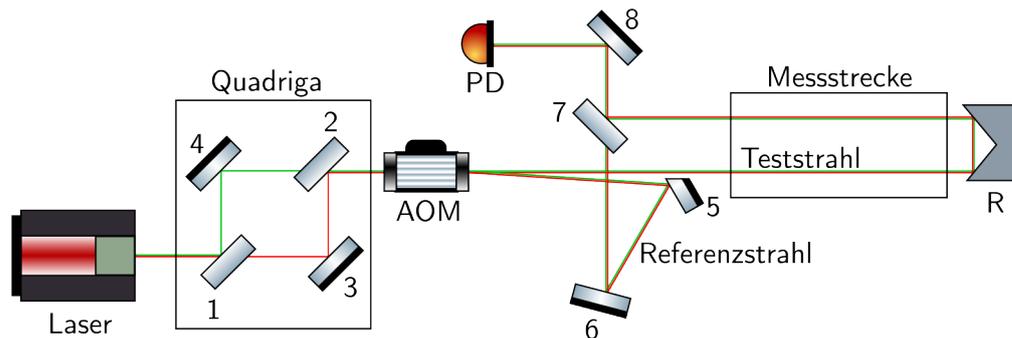


Abbildung 3.1: Skizze Versuchsaufbau DI. Symbole für Laser, Spiegel, D-Spiegel, Strahlteiler, AOM und PD aus [1]. Der Laser sendet Licht der Wellenlängen $2\lambda = 1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ (in rot dargestellt) und $\lambda = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ (in grün) aus. „R“ steht für Retrospiegel (R = Retro mirror). **1** erster harmonischer Strahlteiler, **2** zweiter harmonischer Strahlteiler, **3** Spiegel auf dem Weg des infraroten Lichts, **4** Spiegel auf dem Weg des grünen Lichts, **5** D-Spiegel, **6** Spiegel des Referenzstrahls, **7** dritter Strahlteiler, an dem Test- und Referenzstrahl vereint werden, **8** letzter Spiegel, direkt vor dem PD. Die Skizze dient nur zur Veranschaulichung der einzelnen Komponenten, deren Position und Stellung zueinander. Bei dem Strahlteiler **7** gelangt die Hälfte der vom Retrospiegel kommenden Laserstrahlen durch den Strahlteiler hindurch, so wie in Abb. 2.4. Dies ist in der Abb. hier jedoch nicht dargestellt. Die Skizze ist weder maßstabs- noch farbgetreu.

In diesem Kapitel wird der selbstkonstruierte, mit schwarzem PLA 3D-gedruckte Sensor vorgestellt, der auf dem in Abb. 3.1 dargestellten Aufbau basiert. Die optomechanische Baugruppe der Strahlüberlagerung, bestehend aus den jeweils ersten zwei Strahlteilern und Spiegeln auf dem Weg des Lasers nach dem Austritt aus der Mündung, wird im Folgenden als „Quadrige“ bezeichnet, da dieser Abschnitt aus vier Optiken bzw. vier Optikhaltern besteht (lat. quadrige - Viergespann). Für die Strahlteiler- und Spiegelhalter gilt, dass jeweils eine Optik in den jeweiligen Halter eingesetzt wird.

Im Folgenden werden drei Prototypen behandelt:

- A** Erster Prototyp. Kleine Version, besteht nur aus der Quadrige. Diente zur Sammlung der ersten Erfahrungen mit 3D-Druck, siehe Kap. 3.2.1.
- B** Zweiter Prototyp. Vollständige Konstruktion mit durchgeführter Messung, siehe Kap. 3.2.2 und 4.2.
- C** Dritter Prototyp (Ausblick). Nicht realisierte Version in systematischem „Boxenschema“, siehe Kap. 3.2.3.

3.1.2 Komponentenwahl

Als Laserquelle wird der Festkörperlaser (MSL-FN-532 der Firma Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd.) eingesetzt. Dieser verfügt, mit integriertem Frequenzdoppler, über die beiden Wellenlängen $\lambda_1 = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ und $\lambda_2 = 1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. Für den Teil der Frequenzmodulation mit Hilfe eines AOMs kommt der CAOM-080-030 von GWU-Lasertechnik zum Einsatz. Mit den Maßen von $28 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 42 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 22,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ist er für diesen Sensor geeignet, da er nicht viel Platz in Anspruch nimmt. Bei den Optiken und den Optikhaltern wird auf Fabrikate der Firma Thorlabs zurückgegriffen. Beim ersten Prototypen noch vollständig mit 1"-Spiegeln und -Strahlteilern ausgestattet, führt der zweite zur teilweisen und der dritte zur vollständigen Ausrüstung auf die 0,5"-Versionen. Die kleineren Komponenten bergen den Vorteil, dass die Gesamtkonstruktion kleiner gehalten werden kann. Außerdem verfügen die kleinen Optikhalter über „top adjust“, also die Möglichkeit, sie von oben zu justieren. Dadurch sind keine Aussparungen in den Wänden - wie beim zweiten Prototypen - nötig, um an die Justierschrauben der Halter heranzukommen. Durch das Wegfallen der Aussparungen haben die Wände eine größere Querschnittsfläche, wodurch sich ein höheres Flächenträgheitsmoment und damit eine größere Biegesteifigkeit ergeben (siehe dazu auch 3.2.2.9). Als 3D-Drucker stand der Raise3D E2 zur Verfügung [17]. Gedruckt wurde mit schwarzem PLA, welches einen Durchmesser von $d_{PLA} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ hatte.

Folgend eine Liste der verwendeten Komponenten des zweiten Prototyps, die nicht selbst konstruiert wurden:

1. Quadriga:
 - (a) Halter:
 - (i) Strahlteiler: zwei mal 25.4-MM, Top Adjust Strahlteiler [18]
 - (ii) Spiegel: zwei mal KS05/M - Ø12.7 mm Präzision Kinematik Spiegelhalter [19]
 - (b) Optiken:
 - (i) Erster Strahlteiler: HBSY12 - Ø1"¹ HBS, reflektiert $532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, überträgt $1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ [20]
 - (ii) Zweiter Strahlteiler: HBSY11 - Ø1" HBS, reflektiert $1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, überträgt $532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ [21]
 - (iii) Spiegel: NB05-K13 - Ø1/2" Nd:YAG Spiegel, reflektiert $532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ und $1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ [22]
2. CAOM-080-030 von CASTECH Inc. mit Quarzglas (SiO_2) als frequenzmoduliertes Medium [10]
3. D-Spiegel
 - (a) Halter: KM05DL/M - Linksseitiger Kinematischer Halter für Ø1/2" D-Spiegel [23]
 - (b) Optik: PFD05-03-P01 - Ø1/2" D-förmiger Spiegel [24]
4. Spiegel Ref.-Strahl
 - (a) Halter: KM05/M - Kinematischer Spiegelhalter für Ø1/2" Optiken [25]
 - (b) Optik: NB05-K13 - Ø1/2" Nd:YAG Spiegel, $532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ und $1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ [22]

¹Für diese Arbeit wird das internationale Inch verwendet: $1 \text{ in} = 1'' = 25,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

5. dritter Strahlteiler:
 - (a) Halter: 25.4-MM, Top Adjust Strahlteiler [26]
 - (b) Optik: BSW26 - Ø1" 50:50 UVFS Platten-Strahlteiler, Beschichtung: $350 - 1100 \cdot 10^{-9}$ m [27]
6. Spiegel vor PD:
 - (a) Halter: KM05/M - Kinematischer Spiegelhalter für Ø1/2" Optiken [25]
 - (b) Optik: NB05-K13 - Ø1/2" Nd:YAG Spiegel, $532 \cdot 10^{-9}$ m und $1064 \cdot 10^{-9}$ m [22]
7. PD: PDA10A-EC, $200 - 1100 \cdot 10^{-9}$ m, $A=0,8 \cdot 10^{-6}$ m² [28].

3.1.3 Strahlüberlagerung (Quadriga)

Die beiden Laserstrahlen der Wellenlängen $\lambda_1 = 532 \cdot 10^{-9}$ m und $\lambda_2 = 1064 \cdot 10^{-9}$ m verlassen den Laser nicht exakt ineinander und parallel (koaxial), siehe auch Kap. 3.3.2. Es ist wichtig, dass die Laserstrahlen beider Wellenlängen denselben Weg zurücklegen, sodass sie beide dieselben mechanische Störeinflüsse erfahren. Würden sie unterschiedliche Wege zurücklegen, würden sie unterschiedlich beeinflusst. Aus diesen gemessenen Signalen lässt sich dann, wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, die Phasenverschiebung berechnen. Hierbei ist aber notwendig, dass die Laserstrahlen beider Wellenlängen dieselben Störungen durchlaufen haben. Diese würden sich ansonsten nicht aus dem Differenzsignal der Einzelphasen abziehen, wodurch die Druckmessung erschwert werden würde. Um die gemessene Ungenauigkeit der Laserquelle, die gemessen wurde und dies in Kap. 3.3.2 dokumentiert ist, zu kompensieren, muss eine Lösung gefunden werden. Eine Möglichkeit ist die Strahlüberlagerung durch dichroitische Aufteilung und Überlagerung. Dabei wird das gesamte aus dem Laser austretende Licht nach Wellenlänge aufgeteilt, ausgerichtet und wieder zusammengeführt. Dies geschieht im Abschnitt der Quadriga. Die Laserstrahlen verlassen die Lasermündung und treffen auf den ersten HBS. Dieser ist durchlässig für infrarotes und reflektierend für grünes Licht. Die getrennten Laserstrahlen treffen nun jeweils auf einen Spiegel, der sie um 90° umleitet, und werden dann über den zweiten HBS (lässt grünes Licht durch, reflektiert infrarotes) wieder zusammengeführt. Über diese vier optischen Komponenten, die jeweils zwei justierbare Freiheitsgrade besitzen, lassen sich beide Laserstrahlen getrennt voneinander ausrichten, sodass sie beim Verlassen der Quadriga wie gewünscht koaxial zueinander liegen. Hilfreich sind hier zwei Iriden, von denen eine direkt hinter dem zweiten Strahlteiler (für die „Nahjustage“) und die andere weiter entfernt, etwa 3 m („Fernjustage“), platziert stehen. Dabei ist der erste Strahlteiler für die Nahjustage und der Spiegel auf der Strecke des grünen Lichtwegs verantwortlich für die Fernjustage des grünen Lichts. Für die Nah- und Fernjustage des infraroten Lichts sind der Spiegel auf dem Weg des infraroten Lichts und der zweite Strahlteiler ausschlaggebend. Die Iriden dienen nur zur Ausrichtung der Strahlteiler und Spiegel der Quadriga und werden nach der Justage wieder entfernt. Nah- und Fernjustage sind notwendig, um die beiden Strahlen räumlich auszurichten. Diese räumliche Ausbreitung ist beschrieben durch einen Punkt und einen Vektor, die durch die beiden optischen Elemente der Quadriga jeweils pro Wellenlänge eingestellt werden. In der Konstruktion muss außerdem noch die Parallelverschiebung der Laserstrahlen, die durch die Strahlteiler hindurch gelangen, beachtet werden. Aufgrund des Mediumwechsels von Umgebungsluft zu Glas und wieder zu Umgebungsluft finden zwei Brechungen und damit einhergehende Richtungsänderungen statt. Mit der Gleichung

$$D = T \cdot \sin(\theta) \cdot \left(1 - \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}\right), \quad (3.1)$$

wobei D die Parallelverschiebung in Metern, T die Materialdicke in Metern und θ der Einfallswinkel des Lichts darstellen, lässt sich ein solcher Parallelversatz berechnen [29]. In der Quadriga sind die beiden Strahlteiler in einem Winkel von $\theta = 45^\circ$ zur Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlen angeordnet. Mit einer Strahlteileroptikdicke von $T = 5 \cdot 10^{-3}$ m ([20, 21]) und den Materialeigenschaften für geschmolzenes Quarz, aus denen die Strahlteiler-Optiken bestehen, $n_{fused, SiO_2, 532} = 1,4607$ und $n_{fused, SiO_2, 1064} = 1,4496$ [30], ergeben sich $D_{532} = 1,580 \cdot 10^{-3}$ m und $D_{1064} = 1,560 \cdot 10^{-3}$ m. Die entsprechenden Werte sind in Abb. 3.2 gekennzeichnet. Diese Parallelversätze müssen im CAD auch berücksichtigt werden, indem die Strahlteiler um die entsprechenden Werte verschoben werden. Bei den kleinen Spiegeldurchmessern von $D_{Spiegel} = 12,7 \cdot 10^{-3}$ m und Strahlteileroptikdurchmessern von $D_{Str} = 25,4 \cdot 10^{-3}$ m müssen eineinhalb Millimeter berücksichtigt werden, um einen stetigen Laserstrahldurchgang ohne Unterbrechungen gewährleisten zu können.

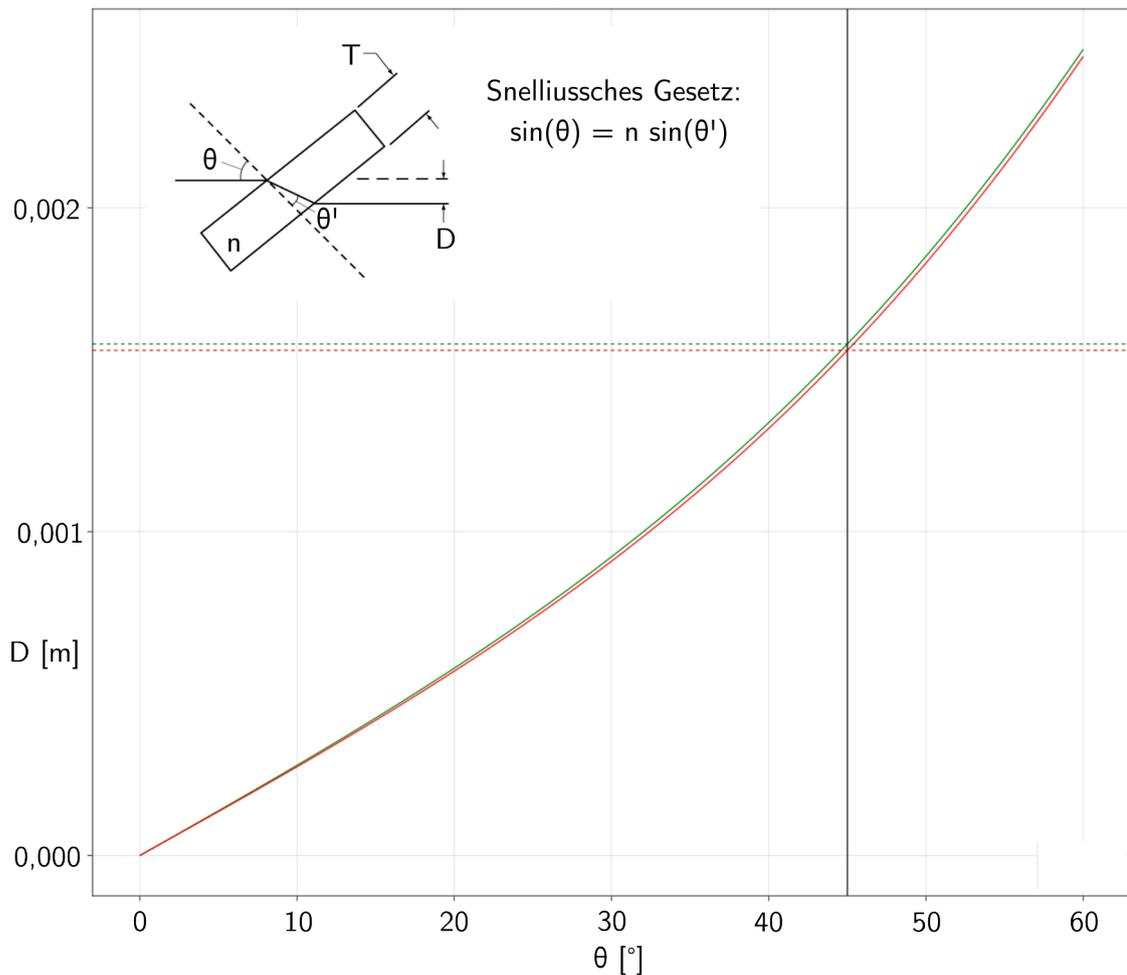


Abbildung 3.2: Plot der Parallelversätze der beiden Wellenlängen $\lambda_1 = 532 \cdot 10^{-9}$ m (grüne Kurve) und $\lambda_2 = 1064 \cdot 10^{-9}$ m (rote Kurve) über dem Einfallswinkel θ in Grad. D ist der Parallelversatz in Metern, T ist die Dicke des Glases, in diesem Fall der Strahlteileroptik, und n der Brechungsindex. Relevante Werte bei $\theta = 45^\circ$.

3.1.4 AOM-Ausrichtung

3.1.4.1 Beam-Picking - Problemstellung

Bei der akustooptischen Modulation der Wellenlängen $\lambda_1 = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ und $\lambda_2 = 1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ im AOM verlässt ein Großteil des Lichts unbeeinflusst wieder den Kristall. Diese Lichtmenge wird „Test-“ oder „Probenstrahl“ genannt. Als „Referenzstrahl“ dient frequenzmoduliertes Licht, das aus der ersten Ordnung des infraroten und aus der zweiten Ordnung des grünen Lichts besteht. Diese beiden Ordnungen liegen theoretisch koaxial zueinander, was sich mit Gl. 2.20 zeigen lässt. Analog zu Gl. 2.9 gilt für die akustische Wellenausbreitung

$$c = \Lambda \cdot \Omega, \quad (3.2)$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit, Λ die akustische Wellenlänge und Ω die Frequenz der Welle ist. Einsetzen der Gl. 3.2 in Gl. 2.20 ergibt

$$\theta_m = \frac{m \cdot \lambda}{n \cdot \Lambda} = \frac{m \cdot \lambda \cdot \Omega_{AOM}}{n_{SiO_2} \cdot c_{SiO_2}}. \quad (3.3)$$

Dabei ist $\Omega_{AOM} = 80 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ und $c_{SiO_2} = 5700 \text{ m s}^{-1}$ (siehe Kap. 7 C. sowie [31]). Für die erste Ordnung des infraroten Lichts mit $m = 1$, $n_{SiO_2,1064} = 1,4496$ [30] und $\lambda_2 = 1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ ergibt sich

$$\theta_{1,1064} \approx 0,59^\circ \quad (3.4)$$

und für die zweite Ordnung ($m = 2$) des grünen Lichts ($\lambda_1 = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, $n_{SiO_2,532} = 1,4607$ [30])

$$\theta_{2,532} \approx 0,59^\circ \approx \theta_{1,1064}. \quad (3.5)$$

Da diesen Ergebnissen theoretische Werte zugrunde liegen, die mit Unsicherheiten behaftet sind, wird im Folgenden ein Winkel zwischen Test- und Referenzstrahl von $\theta_m \approx 1,0^\circ$ angenommen. Bei einer Entfernung von $l_{AOM,DS} = 1 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ zwischen AOM und D-Spiegel liegen die Strahlen beim D-Spiegel etwa

$$\tan(1^\circ) = \frac{l_e}{100 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \Rightarrow l_e = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.6)$$

auseinander. Da der Referenzstrahl räumlich vom Teststrahl getrennt werden soll, diese beiden Strahlen aber so nah beieinander verlaufen, kann kein kreisförmiger Standard-Spiegel zum Einsatz kommen. Hier würde einer der beiden Strahlen zwar auf die Spiegelfläche gelangen, der andere würde jedoch am Spiegelhalter selbst auftreffen. Hier bietet sich die Verwendung eines D-Spiegels mit geradliniger, feiner Kante an, siehe Abb. 3.3. Damit kann der Referenzstrahl vom Weg des Teststrahls abgeleitet werden, ohne den Teststrahl zu stören oder Teile davon mit abzugreifen.

3.1.4.2 Beam-Picking - Rechnung

Der in Abb. 3.3 dargestellte D-Spiegel und der Spiegel auf dem Weg des Referenzstrahls sind fest in ihrer Position verschraubt, lassen sich jedoch um wenige Grad um die vertikale und die zwei horizontalen Achsen bewegen [32, 33]. Für den Weg des Referenzstrahls ist eine geometrische Berechnung der Drehung der beiden Spiegel vonnöten, da sozusagen eine gewisse „Grundposition“ gesetzt werden muss. Dabei sind folgende Werte gegeben: der Winkel α des Referenzstrahls zum Teststrahl, $\alpha = 1^\circ$; der Abstand zwischen Austritt des Lichts am Quarzglas des AOMs und dem D-Spiegel, $l_{AOM,DS} = 100 \cdot 10^{-3} \text{ m}$; der Abstand zwischen D-Spiegel und dem Spiegel auf dem Weg des Referenzstrahls in x-



Abbildung 3.3: Isometrische Ansicht des D-Spiegels integriert in den D-Spiegelhalter.

($63,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) und in y -($24,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) Richtung² sowie die einbaubedingte Anforderung, dass der Referenzstrahl nach dem planen Spiegel orthogonal zum Teststrahl verlaufen muss (siehe Abb. 3.4).

Aus den geometrischen Eigenschaften ergeben sich dann die Winkel θ und ι , die für die Ausrichtung des D- und des zweiten Spiegels gesuchten Winkel. Im CAD lassen sich die beiden Spiegel mithilfe dieser Winkel einfach am globalen Koordinatensystem ausrichten. Die Gesamtkonstruktion wurde dabei so konstruiert und ausgerichtet, dass sich der einfallende Laserstrahl parallel zur x -Achse in positive x -Richtung ausbreitet. Nachfolgend die Rechnung, die zu den gesuchten Winkeln führt.

$$\tan(\beta) = \frac{24,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{63,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \Rightarrow \beta = 21,49^\circ, \quad (3.7)$$

$$\gamma = 90^\circ - \beta = 68,51^\circ, \quad (3.8)$$

$$\delta = \beta + \alpha = 22,49^\circ, \quad (3.9)$$

$$\epsilon = \frac{\gamma}{2} = 34,26^\circ, \quad (3.10)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2} = 11,25^\circ, \quad (3.11)$$

$$\eta = \epsilon + \beta = 55,75^\circ, \quad (3.12)$$

$$\theta = 90^\circ - \eta = 34,25^\circ, \quad (3.13)$$

$$\iota = \beta - \zeta = 10,24^\circ. \quad (3.14)$$

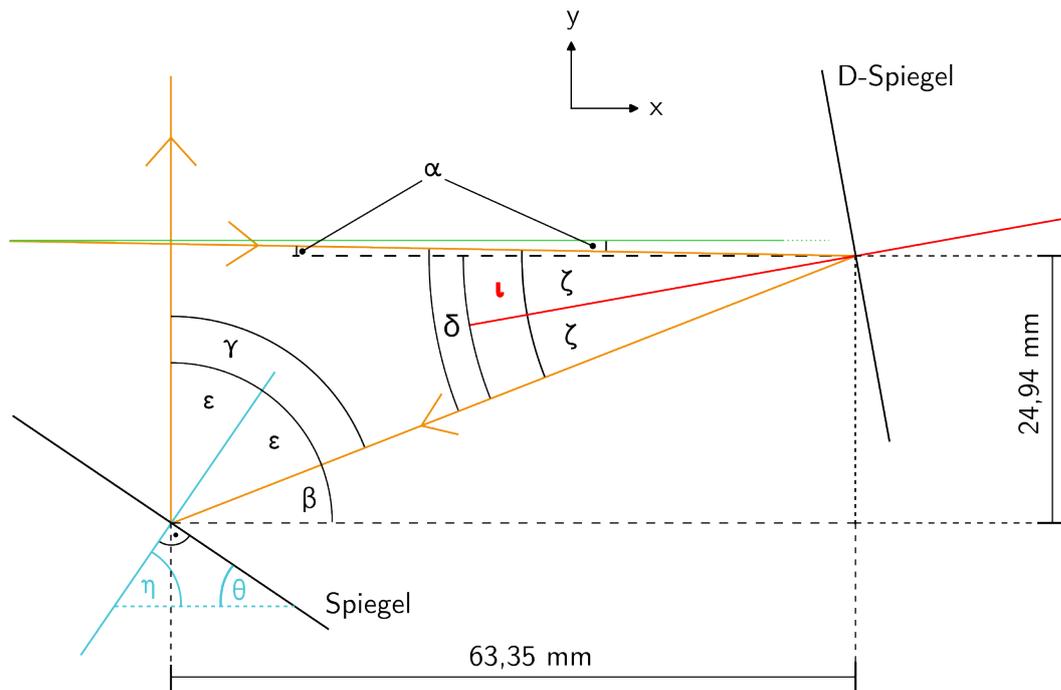


Abbildung 3.4: Zu sehen ist der symbolische Verlauf des Referenzstrahls (orange) aus der Vogelperspektive, der den AOM (nicht dargestellt) von links im $1,0^\circ$ -Winkel zum Teststrahl (in grün) verlässt. Rechts sind der D-Spiegel sowie links unten der plane Spiegel als gerade, schwarze Linien dargestellt. Der untere α ist der Wechselwinkel des oberen. Dabei sind Teststrahl und die gestrichelte Hilfslinie parallel. Zu beachten ist, dass der Teststrahl in der Realität am D-Spiegel vorbeigeht, es aber in der Skizze, um die Winkel und Winkelbeziehungen übersichtlich zu zeigen, anders dargestellt ist. Die Darstellung ist nicht maßstabs- oder farbgetreu.

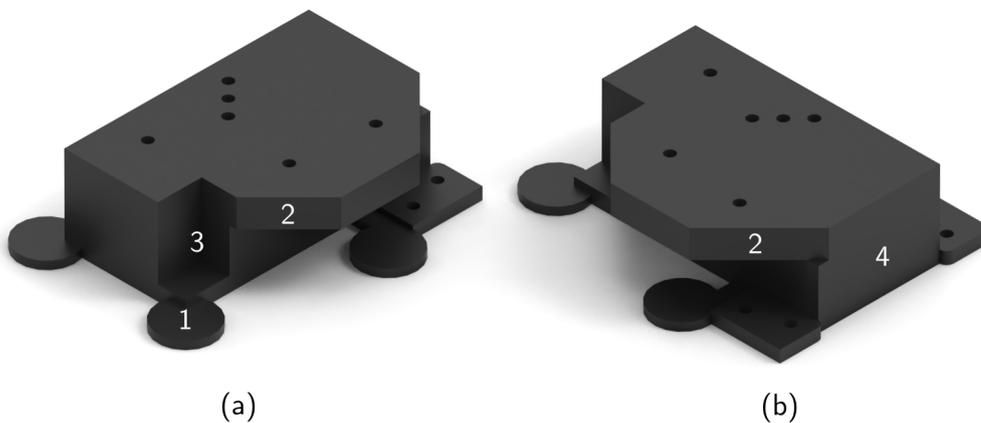


Abbildung 3.5: Erster Prototyp, zwei isometrische Ansichten. (a) Der Laserstrahl kommt von oben rechts an (nicht dargestellt). **1** Froschfuß, **2** (in beiden Teilabbildungen) und **3** zeigen Stellen der Materialwegnahme. (b) Vorne rechts zu sehen ist die Seite, an die der Lasersockel angesetzt wird (**4**).

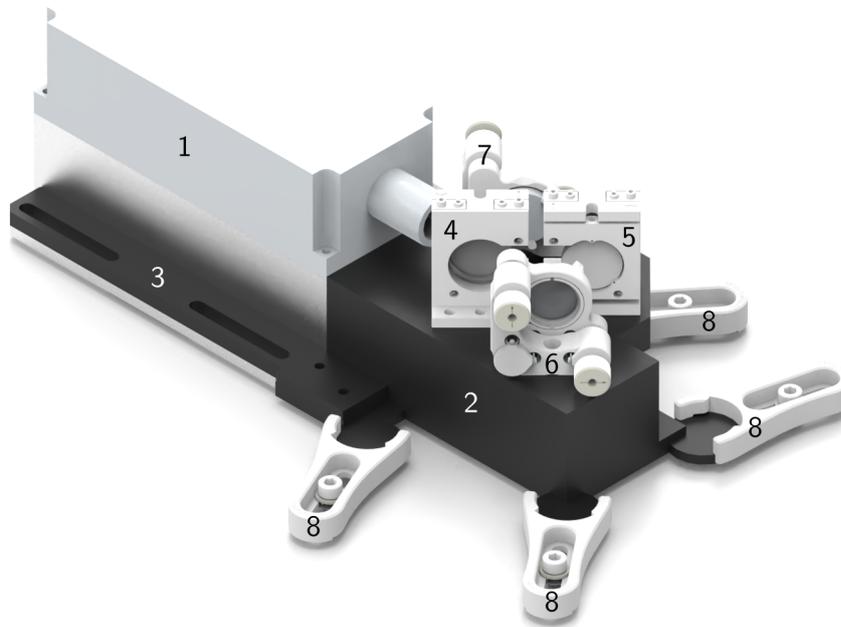


Abbildung 3.6: Zusammenbau des ersten Prototyps, isometrische Ansicht.

3.2 Verschiedene Iterationsstufen

3.2.1 Erster Prototyp

Als erste Konstruktion entstand ein erster Prototyp, der nur aus dem Laser mit Metallsockel zur Wärmeabfuhr und den Elementen der Strahlüberlagerung (Quadriga) bestand (Abb. 3.6). Kernstück bildet das Hauptteil, dargestellt in der Farbe des verwendeten PLA-Filaments, in Abb. 3.5. Anhaltspunkte für die Geometrie bildeten der Laser sowie der aus Aluminium vorliegende Lasersockel (siehe auch Abb. 3.7). Dieser diente der Wärmeableitung der Abwärme des Lasers, da sich dieser mit Zunahme der Betriebsdauer erwärmt und dies die Stabilität des Lasers stören kann. Über M6-Schrauben und die Langlöcher wird der Sockel auf dem Labortisch fixiert. Auf diesen wird der Laser mit vier M4-Schrauben aufgesetzt. Dabei treten die Laserstrahlen in einer Höhe von $h_{\text{Laser},1} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ über dem Labortisch aus. Das Hauptteil war als Vollblock ausgeführt, dessen Fülldichte bei 20% lag. Dazu kommen zwei Sockelarme, die das Hauptteil mit dem Lasersockel über jeweils zwei M6-Schrauben verbinden und gleichzeitig fest auf dem Tisch fixierten. Die Formgebung des Hauptteils an der Seite zum Lasersockel entsprach der Kontur des Lasersockels, um wenig Bewegungsfreiheit zum Beispiel durch externe mechanische Störungen zu gewährleisten. Zur Justage auf dem Tisch dienten zusätzlich zu den erwähnten vier M6-Schrauben insgesamt vier kreisförmige Sockel der Durchmesser $d_{\text{Justier-Sockel}} = 31,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ und der Höhe $h_{\text{Justier-Sockel}} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Diese dienen als passende Gegenstücke zu Klemmgabeln, welche über den kleinen, kreisförmigen Sockel positioniert werden. Mit jeweils einer M6-Schraube werden die Klemmgabeln in den dazu passenden Gewindelöchern im Labortisch festgeschraubt. Dabei sind die Sockel höher als der davor vorgesehene Raum in der Klemmgabel, sodass ein Festklemmen praktisch umzusetzen ist. Die „Festklemmsockel“ wurden aufgrund ihres Gesamtaussehens als „Froschfüße“ bezeichnet. Die 45°-Kanten

²Hierbei handelt es sich um ein Rechtssystem mit x- (Richtung des austretenden Laserstrahls), y- (nach hinten in die Bildebene hinein, wenn sich der Laser links befindet und nach rechts in positive x-Richtung ausbreitet) und z- (nach oben) Koordinate

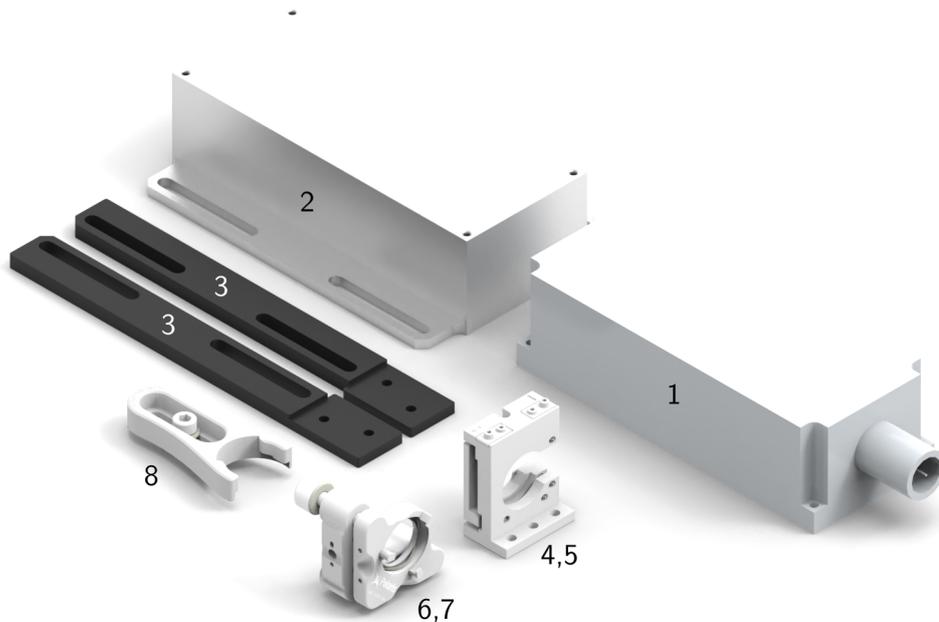


Abbildung 3.7: Übersicht über ausgewählte Einzelteile des ersten Prototyps, ausgenommen des Hauptmoduls, welches in Abb. 3.5 dargestellt ist. Oben mittig ist der Lasersockel, rechts davor der Laser. Links davor in schwarz die beiden Sockelarme. Da davor eine der vier Clamping forks - Klemmgabeln. Links vorne einer der beiden Spiegelhalter (Durchmesser der Optiken 1"). Rechts daneben einer der beiden Strahlteiler-Halter (Durchmesser der Optiken 1"). Die Optiken sind nicht in der Abbildung enthalten.

resultieren aus der Materialwegnahme, um Material und Druckzeit zu reduzieren. So auch die rechteckige Aussparung in der vorderen Ecke (Abb. 3.5 (a) **3**).

Der erste Prototyp diente zur Sammlung von Erfahrung über 3D-gedruckte optomechanische Bauteile. Dabei wurden die Präzision, mechanische Stabilität und die Biegesteifigkeit abgeschätzt. Schon mit Druck der eigenen Hand ließ sich die Oberfläche so eindrücken, dass sich aufmontierte 1"-Optiken und -Optikhalter leicht bewegten und der Strahlweg des Lasers sichtbar verändert wurde. Dem wurde in der Folgeversion durch eine stark erhöhte Fülldichte entgegengewirkt. Der Zusammenhang zwischen Fülldichte und Biegesteifigkeit wird in Kapitel 3.2.2.9 erläutert.

3.2.2 Zweiter Prototyp

In Abb. 3.8 ist der zweite Prototyp zu sehen, der außer den Retrospiegel alle der in Abb. 3.1 dargestellten Komponenten enthält. Alle Spiegeloptiken und -halter sind nun im 0,5"-Format, Strahlteiler-elemente in 1,0". Hierbei beträgt die Gesamtlänge $l_{ges,3} = 463,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Es wurde um die Kernelemente, beginnend beim Laser, in Laserausbreitungsrichtung konstruiert. Als Kernelemente bezeichnet werden hier der Laser, die Halterungen mit Optiken, AOM sowie PD. Der gesamte Sensor konnte nicht als ein Bauteil konstruiert und gedruckt werden, da der 3D-Drucker nur über einen begrenzten Druckraum verfügte. Aus diesem Grund wurde der Sensor in mehrere Teile aufgeteilt, die über Schraubverbindungen aneinander montiert werden. Die Komponenten sind Lasersockel, Hauptteil und Sockel Quadriga sowie Hauptteil und Sockel AOM, welche in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

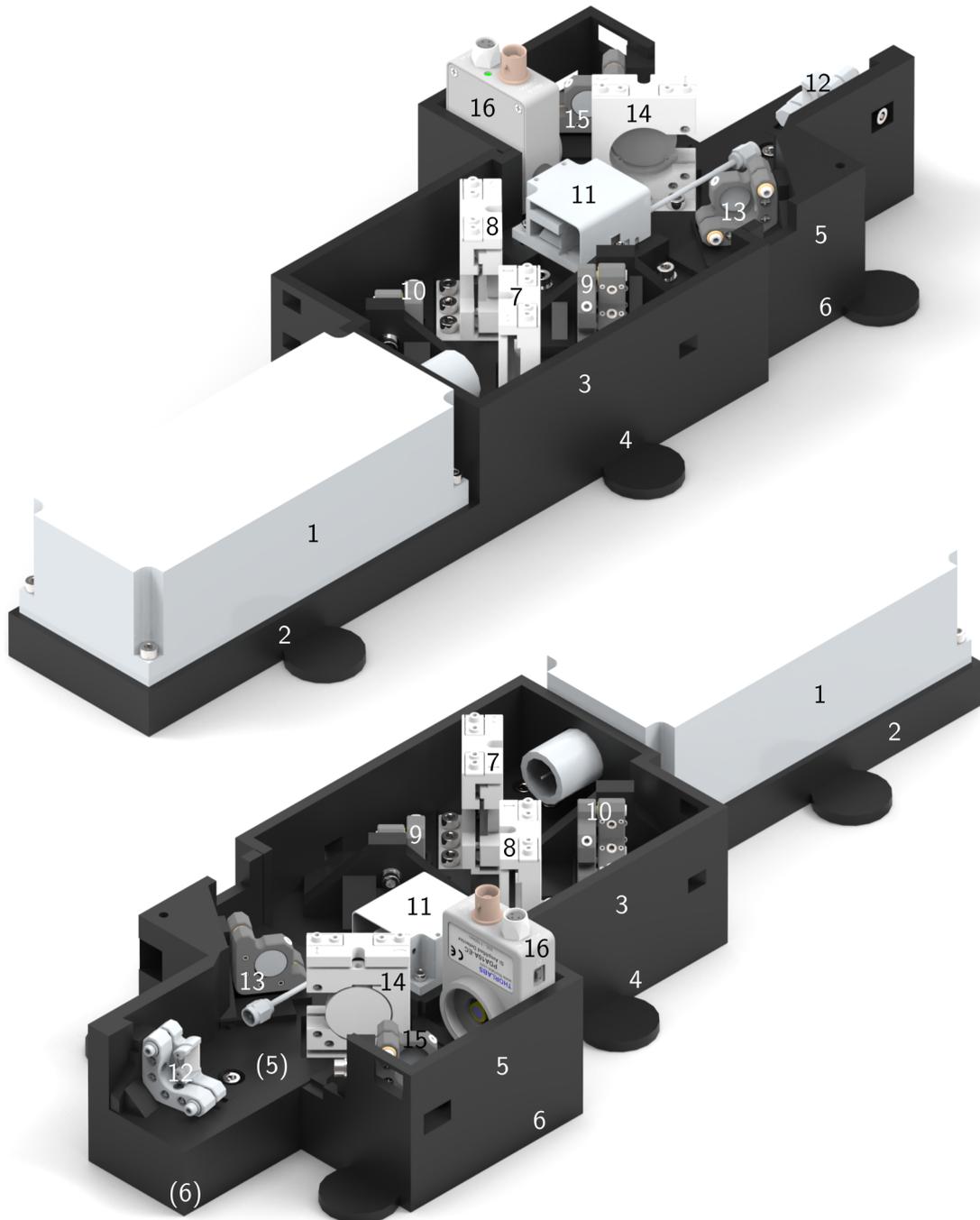


Abbildung 3.8: Zwei isometrische Ansichten des zweiten Prototyps. **1** Laser, **2** Lasersockel, **3** Hauptplatte Quadriga, **4** Sockel Quadriga, **5** Hauptplatte AOM, **6** Sockel AOM, **7** erster Strahlteiler, **8** zweiter Strahlteiler, **9** Spiegel auf dem Weg des infraroten Lichts, **10** Spiegel auf dem Weg des grünen Lichts, **11** AOM, **12** D-Spiegel, **13** Spiegel auf dem Weg des Referenzstrahls, **14** dritter Strahlteiler, **15** Spiegel vor dem PD, **16** PD. Alle Spiegel-/Strahlteilerhalter mit Optiken. Nicht zu sehen ist der Retrospiegel.

3.2.2.1 Lasersockel

Der Laser konnte nicht direkt auf dem Labortisch montiert werden, da er nicht wie der Labortisch M6-, sondern M4-Gewinde hatte. Deswegen musste ein Adapter konstruiert werden, der Lasersockel, der in Abb. 3.9 zu sehen ist. Dieser brachte die Laserstrahlen auf

eine neue Höhe von $h_L = 47,9 \cdot 10^{-3}$ m. Seine Abmaße sind $212,6 \text{ mm} \times 76 \text{ mm} \times 20,5 \text{ mm}$. Der Laser wird über vier senkrecht ausgerichtete M4-Schrauben mit dem Lasersockel verbunden. Dafür wurden im Lasersockel M4-Gewindeinsätze verwendet. Grundsätzlich

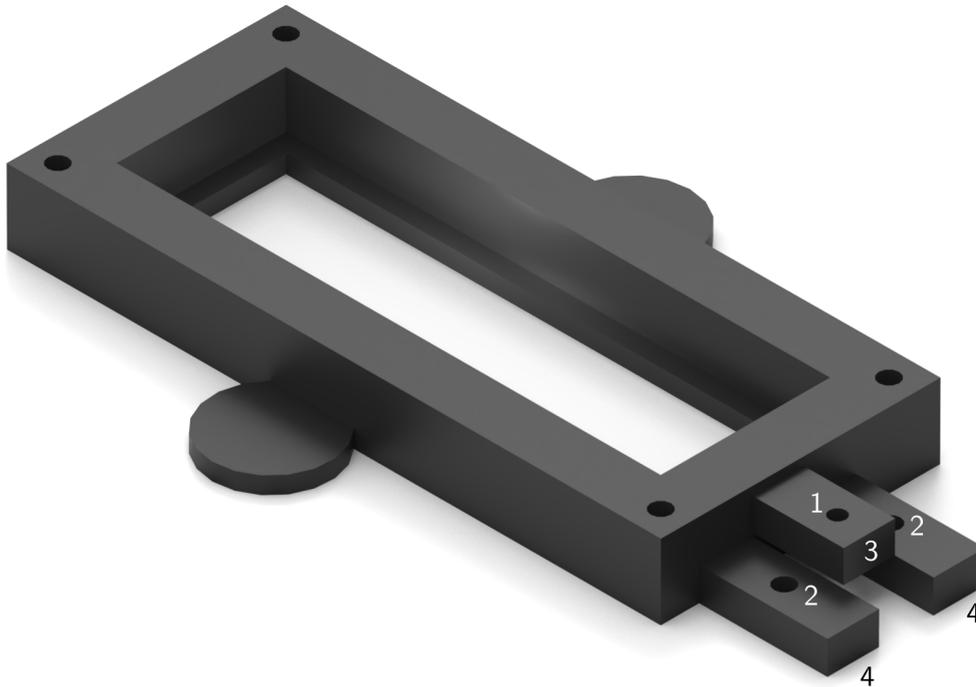


Abbildung 3.9: Isometrische Ansicht des Lasersockels. **1** Durchgangsloch M4, **2** Positionen für M4-Gewindeinsätze, **3** oberer Steg, **4** die beiden unteren Stege. Deutlich erkennbar sind auch die vier Löcher für die M4-Gewindeinsätze, die die M4-Schrauben für die Lasermontage aufnehmen.

wurden bei M4-Verbindungen zwischen 3D-gedruckten Komponenten des zweiten Prototyps M4-Gewindeinsätze verwendet. Tests, um den idealen Durchmesser der zylinderförmigen Aussparungen in den 3D-gedruckten Elementen für die M4-Gewindeinsätze zu ermitteln, sind in Kap. 3.3.1 dokumentiert. Der Lasersockel wiederum wird über drei M4-Schrauben und einer puzzleartigen, überlappenden mechanischen Schraubverbindung mit dem Quadrigasockel und damit dem restlichen Teil des Sensors befestigt. Außen befinden sich auf jeder langen Seite noch Froschfüße. Das Durchgangsloch im oberen der drei Verbindungsstege hatte einen Durchmesser von $d_{\text{Durchgang}} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ m, die unteren beiden waren für die Aufnahme von M4-Gewindeinsätzen vorgesehen. Der in den großen Hohlraum des Sockels passende Laserkühlungsblock aus Aluminium wird in Kap. 3.4.1 näher beschrieben.

3.2.2.2 Hauptplatte Quadriga

Das Herzstück des Sensors ist die Hauptplatte Quadriga, dargestellt in den Abb. 3.10 und 3.12. Auf dieser werden die vier Komponenten für die Strahlüberlagerung montiert. Da diese Strahlüberlagerung äußerst exakt sein muss und deswegen auch resistent gegen äußere Einflüsse wie Stöße und Vibrationen sein sollte, muss bei ihrer Konstruktion am meisten auf Stabilität geachtet werden. Direkt mit dem Laser ist die Hauptplatte Quadriga nicht verbunden, sie berührt ihn an der Wand. Dies ist nicht so optimal, da diese räumliche Bewegungsfreiheit zwischen Laser und Optikkomponenten der Quadriga bietet, die sich über den ganzen Strahlweg durchzieht. Bei leichten Stößen kann es sein, dass das Licht nicht mehr vollständig auf dem PD auftrifft, da kleinste Winkeländerungen die Abweichung

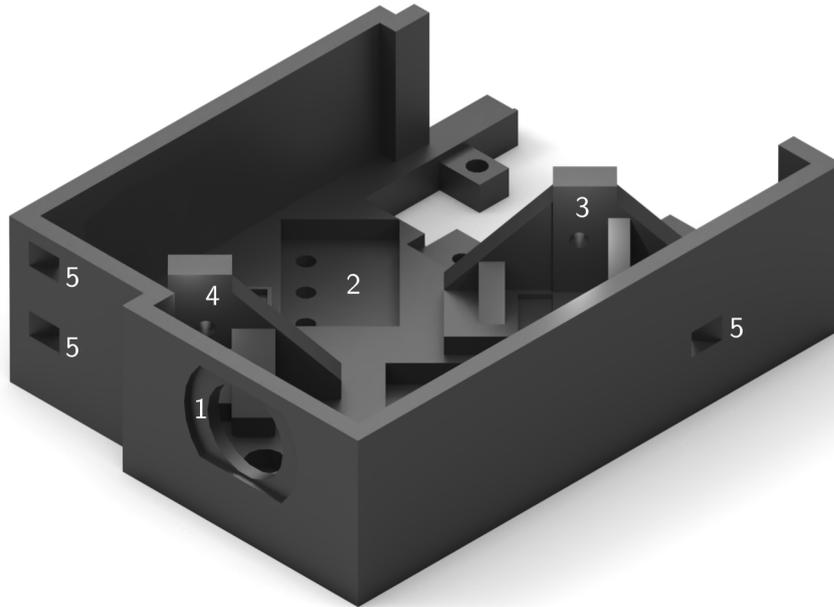


Abbildung 3.10: Isometrische Ansicht der Hauptplatte Quadriga. **1** Aussparung für die Kontur der Lasermündung. **2** Wanne für den zweiten Strahlteiler der Strahlüberlagerung. **3** Modul für den Spiegelhalter auf dem Weg des infraroten Lichts. **4** Modul für den Spiegelhalter auf dem Weg des grünen Lichts. **5** Zugangslöcher in Rechteckform, um mit dem Inbus an die Optikhalter heranzukommen, um über diese die räumliche Lage der Laserstrahlen zu justieren.

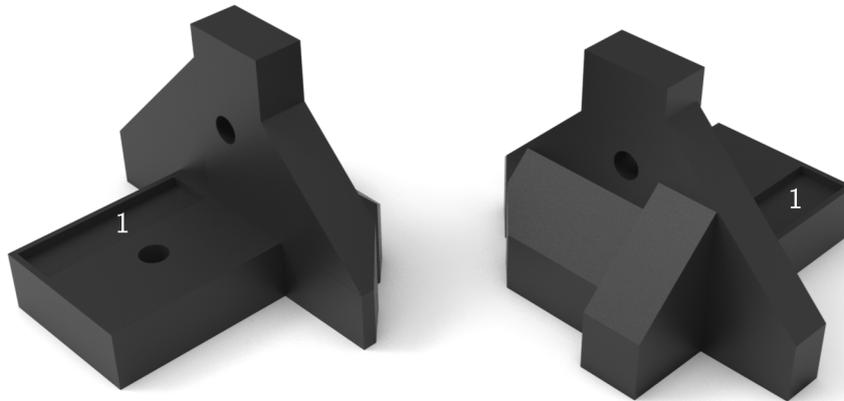


Abbildung 3.11: Isometrische Ansichten des Moduls für den Spiegel der Quadriga, der auf dem Weg des grünen Lichts liegt. Die Ziffer **1** bezeichnet dabei die quaderförmige Vertiefung, die die Bewegungsfreiheit der montierten Spiegelhalter gewährleistet. Für deren Justage lässt sich das Element des Spiegelhalters, in dem die Optik eingesetzt ist, räumlich ausrichten.

des Lichtstrahls über die gesamte Länge der Versuchsstrecke linear vergrößern. Für die Mündung des Lasers wurde eine Aussparung in der Wand eingefügt. Diese hat nicht nur ein kreisförmiges Loch, sondern auch eine Kontur, die zu der der Lasermündung passt. In den Wänden finden sich auch quadratische Aussparungen mit den Seitenlängen $l_{qA} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ vor, durch die die Inbusse zum Justieren der beiden Spiegel passen. Über ein Steg- und Aussparungssystem mit jeweils sechs Stegen und Aussparungen und drei M4-Schraubverbindungen werden Lasersockel, Sockel Quadriga und Hauptplatte

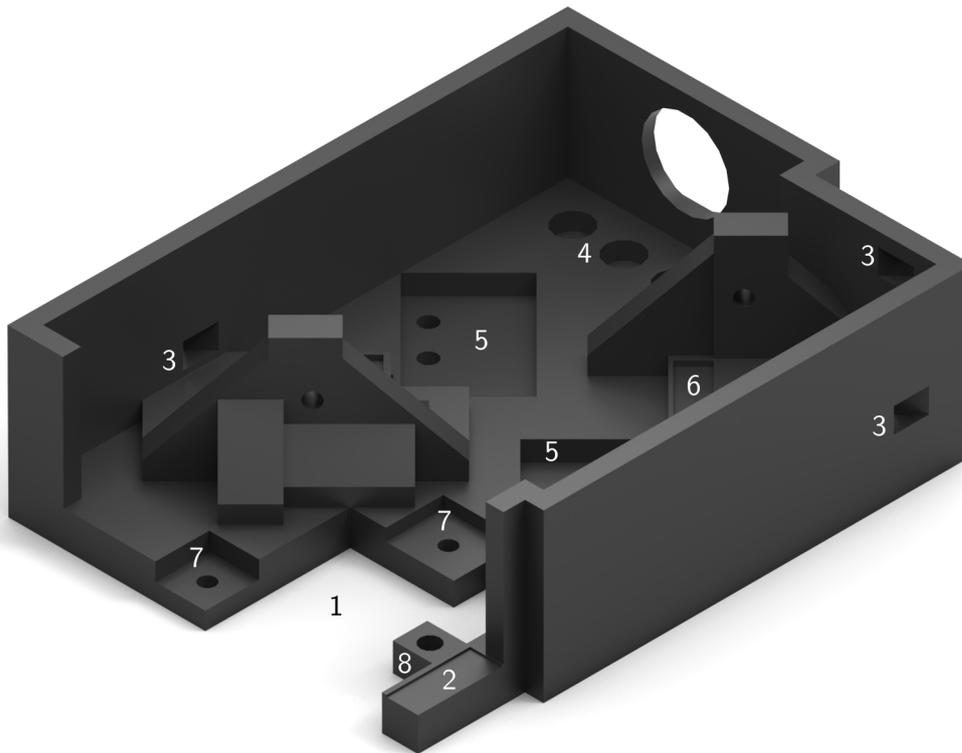


Abbildung 3.12: Isometrische Ansicht Hauptplatte Quadriga Hinterseite. **1** Stelle, in die die Hauptplatte AOM hineingeschoben wird. **2** feine Materialwegnahme, um Platz für den PD zu schaffen. **3** Zugangslöcher in Rechteckform, um mit dem Inbus an die Optikhalter, mit denen die räumliche Lage der Laserstrahlen justiert werden, heranzukommen. **4** drei Einsenkungen mit darunter liegenden M4-Durchgangslöchern für die Aufnahme von M4-Schrauben, die die Hauptplatte Quadriga, Sockel Quadriga und Lasersockel miteinander verbinden. **5** Wannen für die Strahlteiler-Halter und drei M4-Durchgangslöchern für deren Verschraubung. **6** Materialwegnahme im Modul für die Aufnahme des Spiegels auf dem Weg des grünen Lichts. **7** Ausbuchtungen mit M4-Durchgangslöchern für die Verbindung mit Sockel Quadriga (darunter) und Hauptplatte und Sockel AOM. **8** „Nase“ mit Platz für einen M4-Gewindeinsatz, mit dem die beiden Hauptplatten Quadriga und AOM zusätzlich miteinander verbunden werden sollten.

Quadriga miteinander verbunden. Zusätzlich dazu wurden Hauptplatte und Sockel Quadriga über sechs M4-Schrauben verbunden, die in erster Linie die beiden Strahlteiler auf der Hauptplatte befestigten. Die dazu benötigten Gewindeinsätze sitzen im Sockel. Die beiden senkrechten Schrauben für die zwei Spiegel wurden von unten durch ein Durchgangsloch in der Hauptplatte gesteckt und in die Spiegelhalter geschraubt. Für die Schraubenköpfe mit Unterlegscheibe gab es im Sockel eine zylindrische Aussparung mit Tiefe $t_{SK} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ und Durchmesser $d_{SK} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Die Schnittstellen zwischen Hauptplatte und Spiegelhalter mussten auf besondere Weise konstruiert werden. Die Spiegelhalter wurden im CAD-Programm nicht direkt in die Hauptplatte Quadriga (oder AOM) implementiert. Schon kleine Verschiebungen der Halter hätten komplizierte Veränderungen in den Skizzen und Extrusionen verursacht. Deswegen werden Zwischenelemente, die zwischen Hauptplatte und Halter platziert werden, eingeführt, welche „Module“ genannt werden. Diese Module sind eigene Bauteile, die im CAD-Zusammenbau in die Hauptplatten eingesetzt werden. Verschiebungen sind somit unkompliziert möglich

und benötigte Veränderungen werden direkt im Modul geändert. Damit die Hauptplatte und mit den Modulen als ein Teil gedruckt werden können, überlappen sich diese im CAD räumlich, sodass ein Materialschluss gewährleistet wird. Die Module für die beiden Spiegel der Quadriga, des D-Spiegels, des Spiegels des Referenzstrahls und des Spiegels vor dem PD sind sich ähnlich, unterliegen jedoch alle individuellen Anpassungen. Dazu gehören die Höhe, die Kontur und die Dicke, die in die Wand der jeweiligen Hauptplatte hineinragt oder Stützen, die im 45° -Winkel die Stabilität des Moduls erhöhen. In den Abb. 3.11 und 3.13 sind zwei der Module abgebildet.

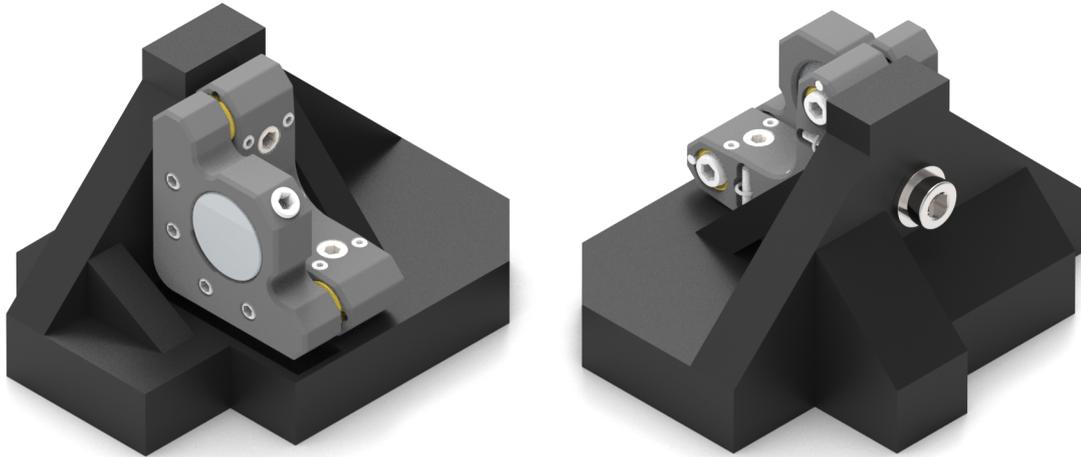


Abbildung 3.13: Modul mit Spiegelhalter und Spiegel der Quadriga auf dem Weg des infraroten Laserstrahls.

3.2.2.3 Sockel Quadriga

Da sich die Laserstrahlen auf einer Ebene mit der Höhe $h_L = 47,9 \cdot 10^{-3}$ m über dem Tisch ausbreiteten, mussten die Bauteile, die die Strahlteiler und Spiegel aufnahmen, ebenfalls so konstruiert werden, dass sich die Mittelpunkte der Optiken auf der Höhe der Laserstrahlen befanden. Die Hauptplatte Quadriga musste mit hoher Fülldichte gedruckt werden, um robust gegen Stöße und Vibrationen zu sein. Wenn man statt den beiden Komponenten der Quadriga (Hauptplatte und Sockel) ein gesamtes Bauteil konstruiert und gedruckt hätte, dann hätte der Druck länger gedauert und es wäre mehr Material erforderlich gewesen. Aus diesem Grund wurde die Version mit zwei Komponenten, einer Hauptplatte und dem darunter liegenden Sockel, realisiert. Dasselbe gilt auch für den Abschnitt des AOMs, siehe die beiden folgenden Kapitel. Für die Verbindung mit dem Lasersockel ist die passende Gegenstruktur mit Stegen und Aussparungen vorhanden (siehe Abb. 3.14). Außerdem ist eine Struktur vorhanden, an die der Sockel AOM passt und festgeschraubt werden kann. In der Oberfläche des Sockels sind noch einige markante, zylinderförmige Aussparungen vorhanden. Zum einen gibt es zwei Reihen, bestehend aus jeweils drei gleichgroßen Aussparungen für M4-Gewindeinsätze. In diese werden die M4-Schrauben der beiden Strahlteiler der Quadriga hineingeschraubt. Somit halten diese M4-Schrauben die Strahlteiler und Hauptplatte mit Sockel Quadriga fest zusammen. Zum anderen sind Aussparungen der Durchmesser $d_{SK} = 11 \cdot 10^{-3}$ m vorhanden, die Raum für die M4-Schraubenköpfe der Spiegelhalter der Quadriga bereitstellen. Diese Spiegelhalter werden auf die Hauptplatte geschraubt, wobei eine der beiden M4-Schrauben von unten durch die Hauptplatte hindurch die Halter auf der Hauptplatte fixieren. Der nach unten überstehende Schraubenkopf mit Unterlegscheibe passt, mit ein bisschen Spielraum, in die Aussparung

im Sockel, der nach den Spiegelhaltern montiert wird.

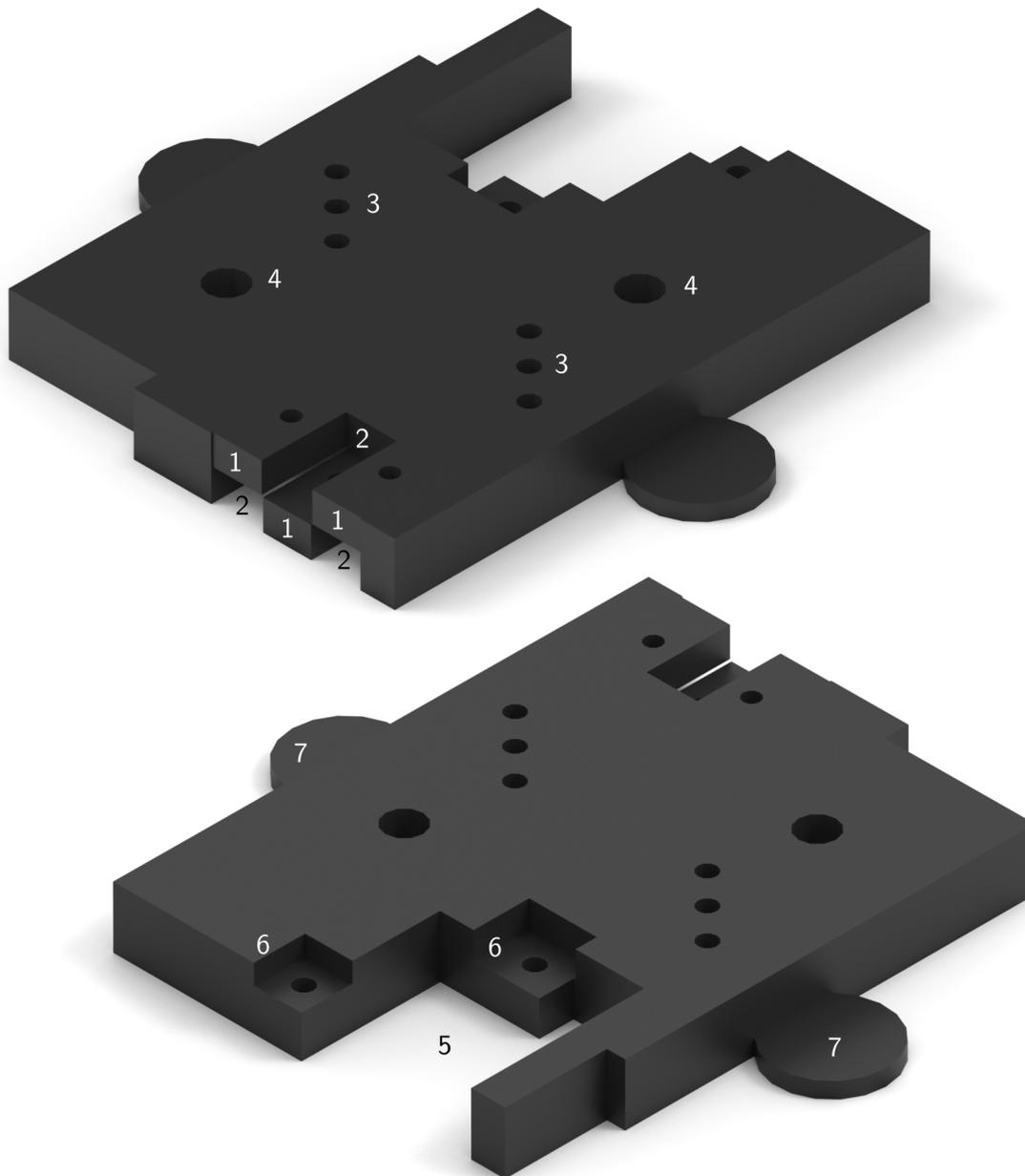


Abbildung 3.14: Isometrische Ansicht von Sockel Quadriga. Zu erkennen sind die drei nebeneinanderliegenden quaderförmigen „Stege“ **1**, die der Verbindung mit dem Lasersockel dienen. Die zwei äußeren sind auf derselben Höhe, das mittlere etwas tiefer. In den beiden höher gelegenen befinden sich M4-Durchgangslöcher, in dem tiefer gelegenen ein Aufnahmeloch für einen M4-Gewindeeinsatz. **2** die Aussparungen für die Stege des Lasersockels. **3** Aufnahmelöcher für M4-Gewindeeinsätze für die Montierung der beiden Strahlteiler-Halter. **4** zwei Aussparungen für Schraubenköpfe der darüber liegenden Hauptplatte Quadriga. Gut zu erkennen ist die große Aussparung (**5**) vorne links, in die die passende Gegenseite des Sockels AOM hineinpasst und die beiden Ausbuchtungen mit Loch für M4-Gewindeeinsätze direkt daneben (**6**). **7** Froschfüße für die Befestigung auf dem Tisch.

3.2.2.4 Hauptplatte AOM

Wie die Quadriga muss auch die Struktur um den AOM und die Referenzstrahljustage in zwei übereinander liegende Ebenen aufgeteilt werden, in Hauptplatte und Sockel AOM. Die Hauptplatte, zu sehen in Abb. 3.15 und 3.16, ist Plattform für AOM, D-Spiegel, Spiegel (Referenzstrahl), dritter Strahlteiler, letzter Spiegel sowie PD. Der AOM durfte nicht direkt bei der Montage festgeschraubt werden, da er für die Feinausrichtung noch beweglich sein muss. Für den Referenzstrahl ist es wichtig, dass so viel Licht wie möglich in die erste Ordnung des infraroten und in die zweite Ordnung des grünen Lichts gebeugt werden. Dafür muss der AOM in kleinsten Winkeländerungen um seine vertikale Achse justiert werden können. Aus diesem Grund finden sich in der Hauptplatte ein M3-Loch für eine direkte Einschraubung für die vordere M3-Schraube und zwei M3-Bogen-Langlöcher für die hinteren beiden vor (siehe **2** und **3** in Abb. 3.15). Durch Bogen-Langlöcher werden die beiden M3-Schrauben durchgeführt und auf der Unterseite mit Mutter festgeschraubt. Beim AOM kann auf Gewindeeinsätze verzichtet werden, da dieser, erst einmal korrekt ausgerichtet und festgeschraubt, nicht mehr ummontiert werden muss. Die beiden Bogen-Langlöcher bieten bei der Justage die Freiheit, den AOM um 4° in beide Richtungen um die Vertikalachse zu schwenken. Der AOM verfügte über drei Durchgangslöcher für M3-Schrauben (siehe **2** und **3** in Abb. 3.15). Eines auf der Vorderseite in der Mitte, die anderen beiden hinten links und rechts.

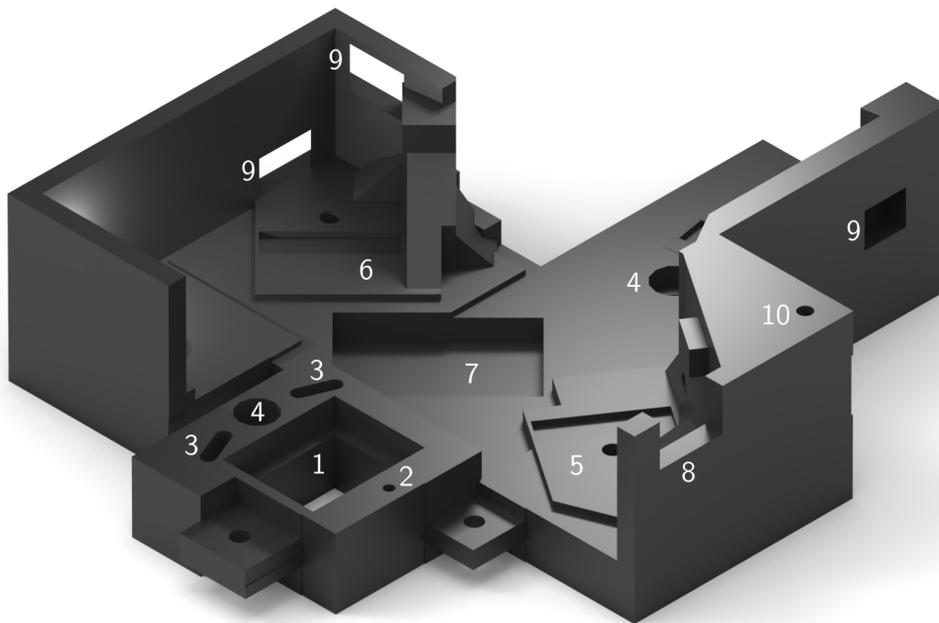


Abbildung 3.15: Isometrische Ansicht der Hauptplatte AOM. **1** Raum für die Metallkühlung AOM, **2** einzelnes Loch für die AOM-Justage, **3** Bogen-Langlöcher für die bewegliche AOM-Justage, **4** Aussparungen für M4-Schraube, um Hauptplatte mit Sockel AOM zu verbinden, **5** integriertes Modul für Spiegel des Referenzstrahls, **6** integriertes Modul für den Spiegel vor dem PD, **7** Wanne für den dritten Strahlteiler, **8** Aussparung in der Wand für die Kabel, die den AOM mit Strom und Informationen versorgen sowie für die Justage des Spiegels bei **5**, **9** Aussparungen für die Justage der optischen Halter, **10** Loch, in das einer der Bolzen des Deckels hineinpasst.

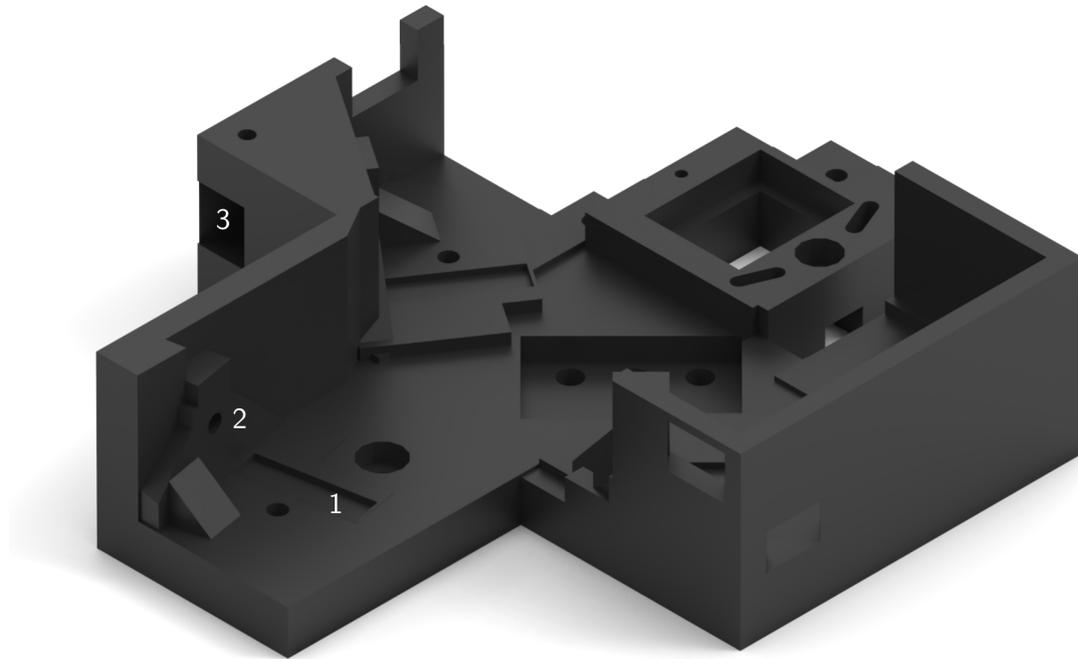


Abbildung 3.16: Isometrische Ansicht der Hauptplatte AOM von der „Hinterseite“. **1** Wanne des Moduls für den D-Spiegel. **2** Horizontales Loch für die M4-Schraube, die den D-Spiegel fixiert. **3** Aussparung für die horizontal eingesetzte M4-Schraube, mit der der Spiegel des Referenzstrahls festgeschraubt wird.

3.2.2.5 Sockel AOM

Der Sockel AOM hat dieselben Funktionen wie der Sockel Quadriga. Er dient als Block, um die Hauptplatte AOM auf die erforderliche Strahlhöhe zu bringen. Zusätzlich dazu verfügt er über eine rechteckige Öffnung für die Aufnahme der Metallkühlung AOM, vgl. Abb. 3.17. Diese wird in der darüber liegenden Hauptplatte AOM eingesetzt und leitet die Abwärme des AOMs durch den Sockel AOM in den Tisch. Um die Hauptplatte und den Sockel AOM miteinander zu verbinden, finden sich zwei M4-Durchgangslöcher auf der Oberseite des Sockels. Auf der Unterseite findet sich jeweils eine zylinderförmige Aussparung mit einem Durchmesser von $d_{Aussp.,SK} = 11 \cdot 10^{-3}$ m und einer Höhe von $h_{Aussp.,SK} = 7 \cdot 10^{-3}$ m. Ebenfalls auf der Oberseite sind Aussparungen ($d_{Sockel,AOM,1} = 12 \cdot 10^{-3}$ m) für Schraubköpfe von Verschraubungen der Hauptplatte AOM (für den Spiegel des Referenzstrahls und direkt vor dem PD sowie für den D-Spiegel). Außen sind zwei „Froschfüße“ angebracht, mit denen der Sockel fest auf dem Tisch fixiert werden kann.

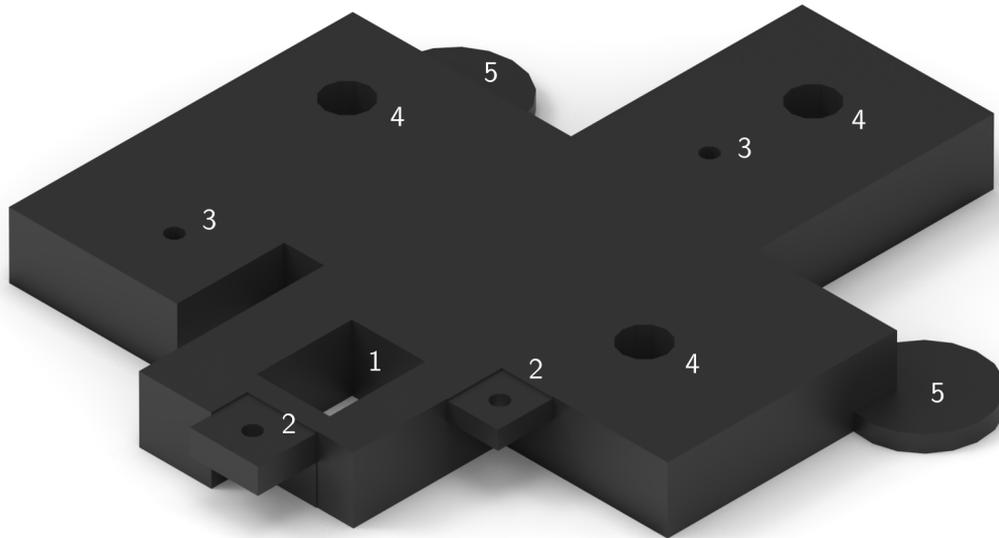


Abbildung 3.17: Isometrische Ansicht des Sockels AOM. **1** die rechteckige Aussparung über die gesamte Höhe des Bauteils, welche für die Aufnahme der Metallkühlung AOM vorgesehen ist. **2** Direkt davor links und rechts zwei stufenähnliche Vorsprünge mit M4-Durchgangslöchern für die Verbindung mit dem Sockel Quadriga. **3** Zwei weitere M4-Löcher und **4** die drei größeren, zylinderförmigen Löcher für die Schraubenköpfe der Schraubverbindungen in der darüber liegenden Hauptplatte AOM. Außerdem sind die zwei „Froschfüße“ erkennbar (**5**).

3.2.2.6 Deckel

Beim zweiten Prototypen dienten zwei Deckel auf der Hauptplatte Quadriga und AOM als Staub- und Streulichtschutz, zu sehen in Abb. 3.18 und 3.19. Der Form entsprachen sie dem Grundriss der jeweiligen Hauptplatte. Als Fixierung dienten kleine Zylinder in den Ecken mit dem Durchmesser $d_{Zyl} = 3 \cdot 10^{-3}$ m. Die Deckel wurden so platziert, dass sie zu den Seiten schlüssig hin mit den Wänden der Hauptplatte abschlossen. Dabei waren die Zylinder so positioniert, dass sie in den Innenecken der Wände anstießen. Hier wurde nur darauf geachtet, dass die Deckel zum Beispiel bei Anstoßen des Tisches nicht herunterfielen, sie hatten keine tragenden statischen oder die Stabilität betreffenden Aufgaben. Durch ihre Fülldichte von 5% sind sie äußerst leicht. Als Verbindung zwischen den beiden Deckeln wurde eine simple Steckverbindungsart wie bei Puzzles zur Anwendung gebracht. Um die Druckzeit zu minimieren und um Material zu sparen, wurde entschieden, für die hohen Strahlteiler-Halter Aussparungen im Deckel hinzuzufügen, anstatt die Wände höher zu gestalten. Für ihren Zweck mussten die Deckel auch nicht vollständig geschlossen sein.

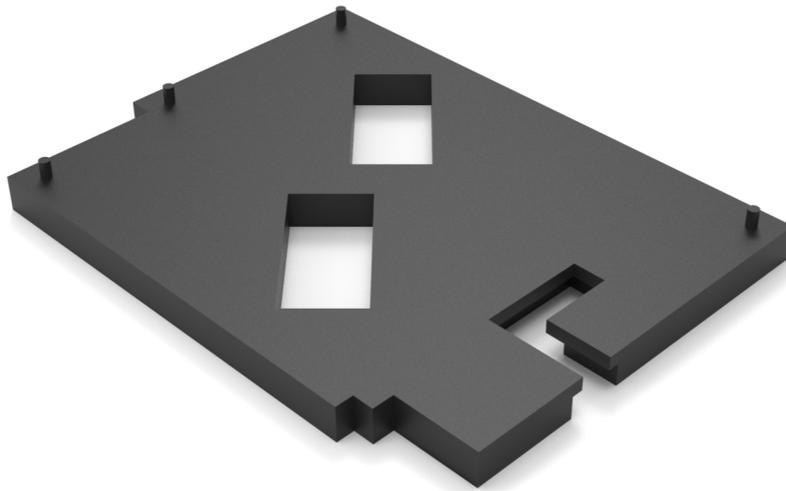


Abbildung 3.18: Deckel Quadriga, isometrische Ansicht. Zu sehen sind zwei rechteckige Aussparungen für die beiden Strahlteil-Halter der Quadriga sowie die puzzleartige, L-förmige Aussparung für die Steckverbindung der beiden Deckel miteinander (links).

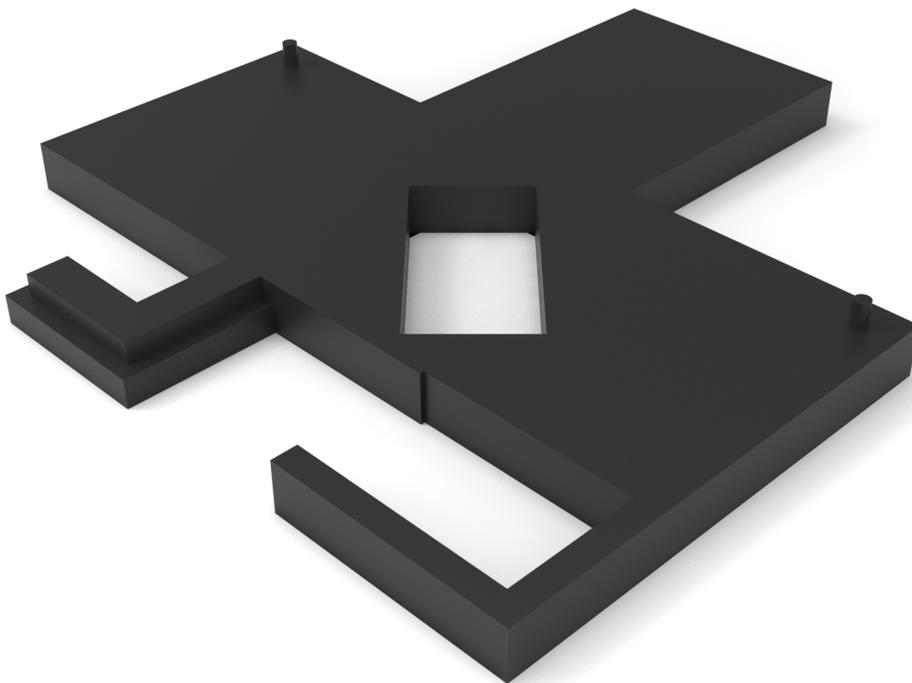


Abbildung 3.19: Deckel AOM, isometrische Ansicht. Zu sehen sind die rechteckigen Aussparungen für den dritten Strahlteiler-Halter der Quadriga und für den PD sowie die puzzleartige, L-förmige Aussparung für die Steckverbindung der beiden Deckel miteinander. Gut zu erkennen sind auch die beiden kleinen Zylinder, die den Deckel auf der Hauptplatte AOM in den beiden horizontalen Richtungen fixieren.

3.2.2.7 Werkzeuge für die Justage

Für den Versuchsaufbau mit dem zweiten Prototypen muss als erstes die Quadriga, genauer gesagt, die beiden Laserstrahlen mit Hilfe der Quadriga, justiert werden. Dafür werden zwei Iriden verwendet, die auf der Laserstrahlhöhe $h_{LS} = 49 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ mit einem Abstand zueinander hinter der Quadriga positioniert werden müssen. Der Abstand, etwa ein m oder wahlweise auch mehr, ist notwendig, um die Strahlen im Raum präzise ausrichten zu können. Je größer der Abstand zwischen den Iriden, desto höher auch die Genauigkeit der Ausrichtung. Um diese Iriden sowie auch den Retrospiegel für den Teststrahl und damit den ganzen Aufbau präzise zueinander zu positionieren, ist es praktisch, die Lochreihen auf dem optischen Tisch als Referenzen zu verwenden. Um also die Quadriga und die Iriden für den ersten Schritt des Versuchsaufbaus zu fixieren, kommt ein eigens für diese Justage konstruiertes Werkzeug zum Einsatz, einzeln abgebildet in Abb. 3.20 und mit Iris in Abb. 3.21. Dieses besteht aus einer Platte mit Sockel für die erste Iris sowie mehreren kleinen zylindrischen Bolzen an deren Unterseite, welche passend zu den Löchern auf dem Labortisch angeordnet sind und das Werkzeug so auf dem Tisch positionieren, dass die Iris exakt über einem der Löcher sitzt. Mit dem Werkzeug wird die Quadriga mit ihrem Sockel verbunden und fixiert somit auch Laser und Quadriga mit dem Werkzeug und damit mit dem Tisch.

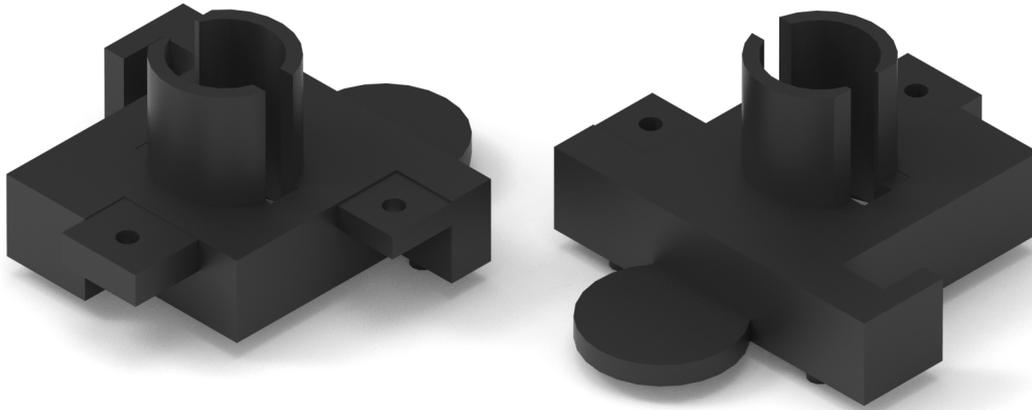


Abbildung 3.20: Zu sehen ist ein CAD-Modell des benannten Werkzeugs von zwei Seiten. Dieses wird über eine der Iriden gestülpt. Dabei passt der Sockel der Iris exakt in den zylindrischen Hohlraum des Justagewerkzeugs. Der Schlitz in der zylinderförmigen Wand ist Platzhalter und Fixierung der eigentlichen Iris. Dann kann das Justagewerkzeug samt Iris an dem Sockel der Quadriga festgeschraubt werden.

Für die zweite Iris, die für die Fernjustage zuständig ist und mit $l_{Iris2} = 1,5 \text{ m}$ deutlich weiter als die erste Iris von den Strahlteilern und Spiegeln entfernt steht, wurde ein Sockel gefertigt, der die Iris über einem der Tischlöcher auf der gewünschten Höhe positioniert. Dieser besteht aus einem zylinderförmigen Sockel ($d_{Sockel} = 31,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $h_{Sockel} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) für die Fixierung auf dem Tisch mittels Klemmgabeln einer etwas dünneren Säule ($d_{Säule} = 21,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$), die die Höhe der Iris über dem Tisch festlegt. Im Sockel befindet sich auf der Unterseite ein $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ -breites Loch, das der Justage dient. Dabei kann eine M6-Madenschraube in eines der Löcher auf dem Labortisch geschraubt und der Sockel daraufgesetzt werden. Dadurch hat man unkompliziert und reproduzierbar die Position festgelegt.

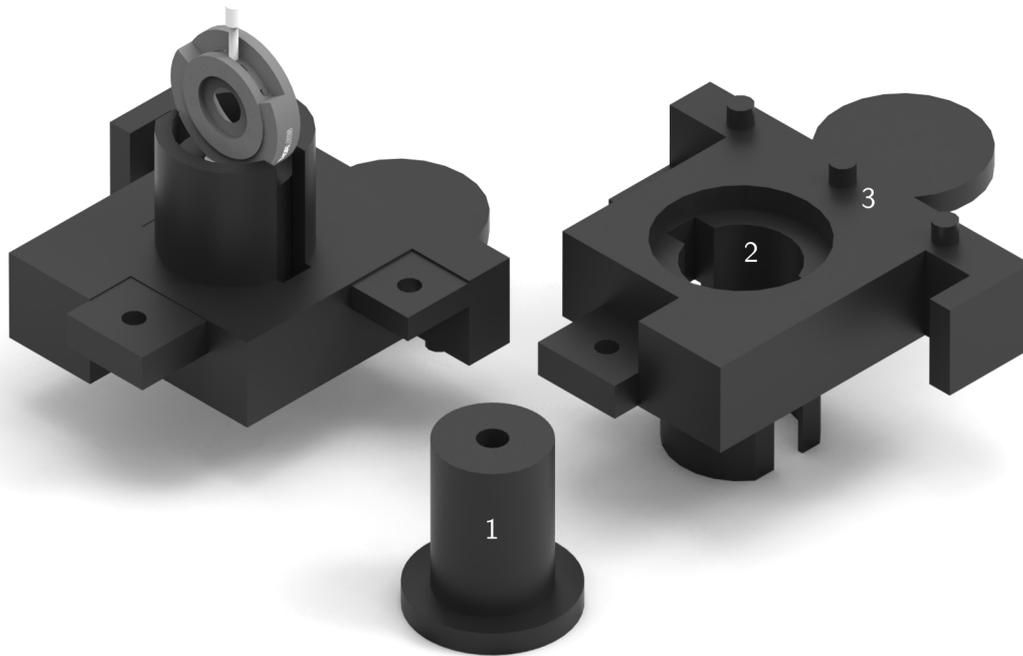


Abbildung 3.21: Abgebildet sind zwei mal das Justagewerkzeug für die Strahlüberlagerung in isometrischer Ansicht. Links die zusammengesetzte Variante, bei der im Justagewerkzeug der Sockel (1) mit aufgeschraubter Iris in den dafür vorgesehenen Hohlraum (2) eingesetzt wurde. 3 einer der Bolzen, der in die M6-Gewindebohrungen des Labortisches passt.

3.2.2.8 Verbesserung der AOM-Justage

Bei der nun vorgestellten Variante des zweiten Prototyps in Kap. 3.2.2 gestaltete sich die Ausrichtung des AOMs im Labor sehr kompliziert. An die dafür vorgesehenen beiden Schrauben mit Muttern auf der „Hinterseite“ des AOMs war bei zusammengesetztem Gesamtkonstrukt keine Montage möglich. Hierfür musste dann die gesamte Hauptplatte AOM angehoben werden, um an die Muttern auf der Unterseite zu gelangen. Somit konnte auch nicht während eingeschaltetem Laser der Strahlverlauf an D-Spiegel und Referenzstrahlspiegel beobachtet und der AOM direkt festgeschraubt werden. Die Ausrichtung des AOMs war verantwortlich dafür, wie viel Laserlicht des Teststrahls noch mit auf dem D-Spiegel landete (was nicht erwünscht war) und wie intensiv tatsächlich die erste bzw. zweite Ordnung (Referenzstrahl) wurde. Da im AOM nur ein sehr geringer Anteil des gesamten Lichts in die ersten, zweiten und dritten Ordnungen flossen, war es umso wichtiger, die Justageposition des AOMs zu finden und zu fixieren, bei der die maximal mögliche Beugungseffizienz erreicht wurde.

Deswegen wurde die Verbesserung, ein Dreiergespann, bestehend aus den im Folgenden näher beschriebenen Elementen „Basisstück“, „Drehplattform“ und „Fixierring“, entwickelt. Der daraus resultierende vergrößerte Gesamtaufbau ist in Abb. 3.22 sowie auf dem Foto Abb. 3.23 zu sehen.

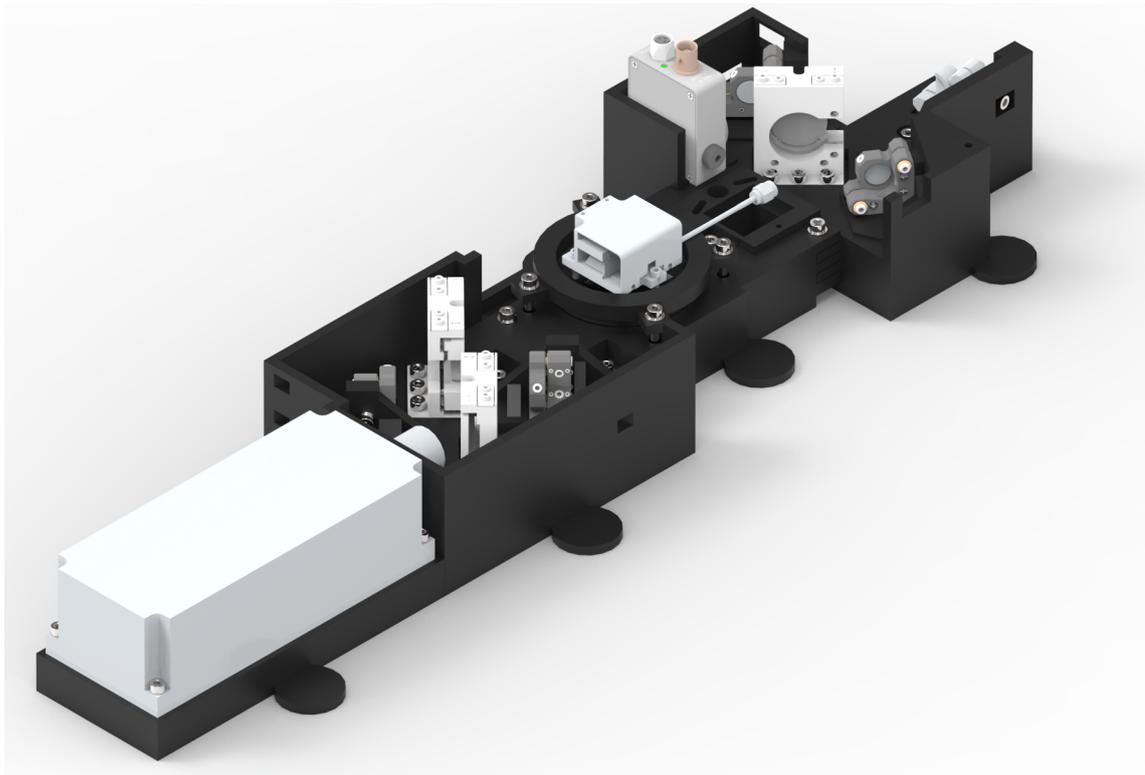


Abbildung 3.22: Isometrische Ansicht des zweiten Prototyps mit den Bauteilen Basisstück, Drehplattform und Fixierring, platziert zwischen dem Bereich der Quadriga und dem des AOMs bzw. Restaufbaus.

3.2.2.8.1 Basisstück Das Hauptstück des Dreiergespanns bietet Platz für die beiden Kernelemente Drehplattform und Fixierring und verfügt über die Verschraubungsanschlüsse zu den beiden Hauptteilen „Hauptplatte Quadriga“ und „Hauptplatte AOM“. Es war in etwa so hoch wie Hauptplatte und Sockel Quadriga bzw. Hauptplatte und Sockel AOM. Die Seite, mit der das Basisstück mit der Hauptplatte Quadriga verbunden wurde, entsprach konstruktiv den Seiten von Hauptplatte und Sockel AOM, mit denen diese mit Hauptplatte und Sockel Quadriga verbunden wurden. Ebenso entsprach die zur Hauptplatte AOM gerichtete Seite konstruktiv den Seiten von Hauptplatte und Sockel Quadriga, mit denen diese mit Hauptplatte und Sockel AOM verbunden wurden. Zusammenfassend war das Basisstück so konstruiert, dass es als Zwischenteil zwischen Quadriga und ehemaliger AOM-Aufnahme in der Hauptplatte $glsAOM$ mithilfe der vorhandenen Verschraubungsmöglichkeiten montiert werden konnte. Des Weiteren verfügte das Basisstück über eine zylindrische Aufnahmeausparung für das zweite Element Drehplattform und Bohrlöcher für M4-Einschraubgewindeeinsätze für das dritte Element, den Fixierring.

3.2.2.8.2 Drehplattform In der verbesserten Version der AOM-Justage war der AOM auf der Drehplattform installiert. Drei Löcher der Durchmesser $d_{AOM} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m dienten dem direkten Einschrauben von M3-Schrauben in das PLA-gedruckte Element. Für den Kernlochbohrdurchmesser von $d_{KL,M3} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ m eines M3-Gewindes wurde der etwas größere Durchmesser d_{AOM} gewählt. Hier wurden keine Gewindeeinsätze verwendet, da der AOM nicht ständig auf- und abmontiert werden musste und deswegen eine mit größerem Verschleiß behaftete direkte Einschraubung gewählt werden konnte. Eine mit Gewindeeinsatz versehene Einschraubverbindung lässt sich quasi verschleißfrei beliebig oft verwenden. Durch die deutlich geringere Dichte von PLA ($\rho_{PLA} = 1,24 \text{ kg m}^{-3} \leq \rho_{Messing} = 8,730 \text{ kg m}^{-3}$,

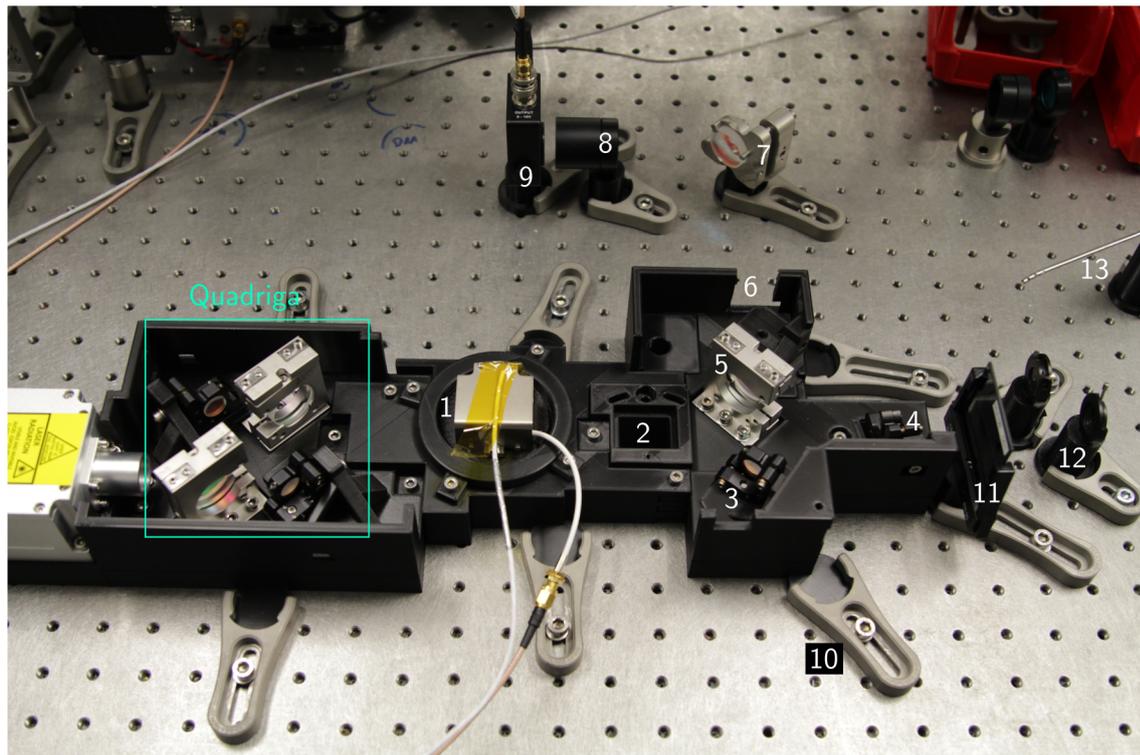


Abbildung 3.23: Foto des zweiten Prototyps auf dem Labortisch. **1** Bereich des AOMs mit AOM, Fixierring, Drehplattform und Basisstück. Nicht zu sehen ist die Metallkühlung. Auf den AOM geklebt befindet sich ein Temperatursensor. **2** Nicht mehr verwendeter Bereich des AOMs in der Hauptplatte AOM. **3** D-Spiegel, **4** Spiegel auf dem Weg des Referenzstrahls, **5** dritter Strahlteiler. **6** provisorisch ausgesägter Bereich, um die Laserstrahlen aus der Hauptplatte AOM herauszuleiten. **7** Letzter Spiegel vor dem PD. **8** Linsen, die die Laserstrahlen fokussiert, sodass die Querschnittsfläche des Lichtbündels verkleinert wird und vollständig auf dem kleinen Sensorbereich des PDs auftrifft. **9** PD, **10** Klemmgabel. **11** Absorptions-Filter, der die Lichtintensität abschwächt, um die Arbeit am Labortisch sicherer und einfacher zu gestalten. **12** Iris, **13** piezoresistiver Drucktransmitter.

allgemein bekannte Werte) geht das beim erstmaligen Einschrauben in PLA eingeschnittene Gewinde einer direkten Einschraubverbindung bei mehrmaligem Ein- und Ausdrehen einer Schraube ($\rho_{Stahl} = 7850 \text{ kg m}^{-3}$) deutlich schneller kaputt.

Durch die kreisrunde, in die Aussparung des Basisstücks passende Formgebung, lässt sich die Drehplattform um die z-Achse drehen. Mit montiertem AOM kann man so auch bei eingeschaltetem Laser die wichtige AOM-Justage durchführen. Ergänzend hinzu kommt das Justagewerkzeug „AOM-Zange“ (siehe 3.2.2.8.4).

Wichtige Eigenschaft ist das Höhenmaß des oberen und breiteren Zylinders der Drehplattform. Dieses ist $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ höher als die Aussparung im Basisstück. Warum dies wichtig ist, wird in den folgenden Absätzen beschrieben.

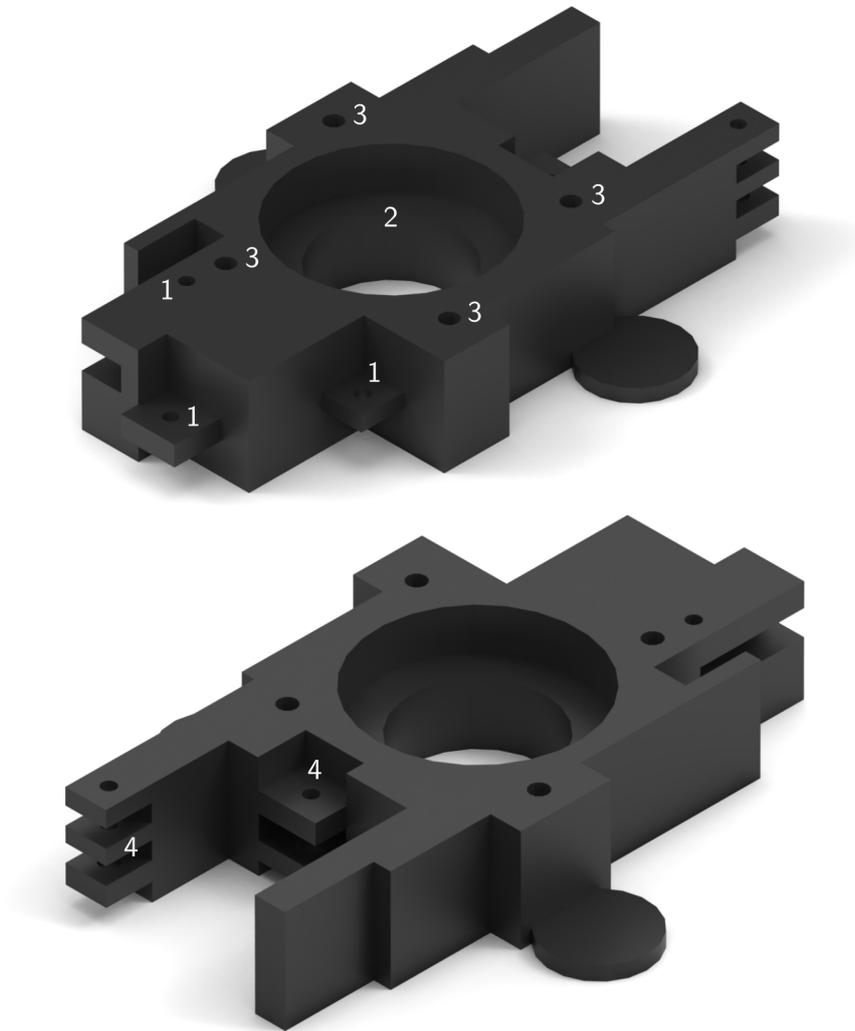


Abbildung 3.24: Das Basisstück, zu sehen von zwei Seiten. **1** Verschraubungsvorrichtungen für die Verbindung mit den Komponenten der Quadriga. **2** Aufnahme für die Drehscheibe. **3** Löcher für M4-Gewindeeinsätze, in die die Schrauben des Fixierings eingedreht werden. **4** Verschraubungsvorrichtungen für die Verbindung mit Hauptplatte und Sockel AOM.

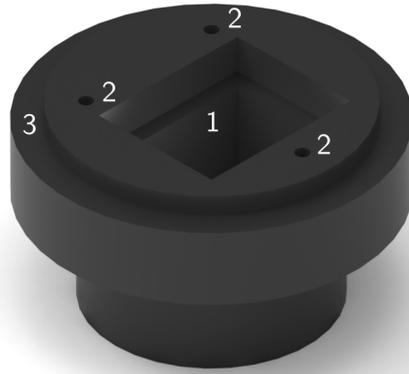


Abbildung 3.25: Ansicht der Drehplattform. **1** Aufnahme für die Metallkühlung des AOMs. **2** drei Löcher für die direkte Einschraubung der M3-Schrauben, mit denen der AOM auf der Drehplattform befestigt wird. **3** Randfläche, auf die der Fixierring aufgesetzt wird.

3.2.2.8.3 Fixierring Um die Drehplattform und damit den AOM auch fest zu fixieren, kommt der Fixierring zum Einsatz. Dieser wird mittels vier M4-Schrauben auf der Drehplattform festgeschraubt. Durch die berührenden Flächen von Drehplattform und Fixierring ist bei fest angezogenen Schrauben keine Drehbewegung mehr möglich. Somit wird eine feste Fixierung der Position des AOMs gewährleistet.

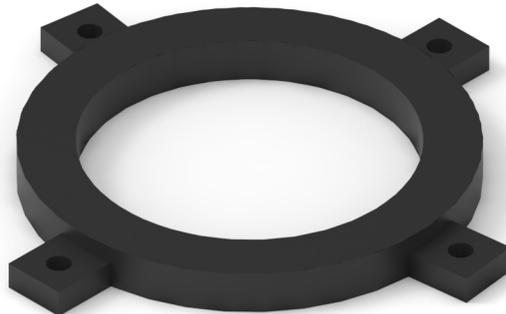


Abbildung 3.26: Fixierring in isometrischer Ansicht.

3.2.2.8.4 AOM-Zange Der AOM muss sehr genau justiert werden. Schon kleinste radiale Bewegungen der Drehplattform verursachen einen deutlichen Unterschied bei der Beugungseffizienz des AOMs. Deswegen wurde hierfür die AOM-Zange konzipiert (siehe Abb. 3.27). Dabei handelt es sich um ein 3D-gedrucktes Element, welches von oben auf den AOM gesetzt wird und bei Drehbewegungen um die vertikale (z -)Achse durch seine Formgebung den AOM mitbewegt. Um jetzt die gewünschte Feinfühligkeit zu erreichen, wird dieses Element an eine Art Hebel, in diesem Fall ein 0,7 m langes Boschprofil, montiert. Drehpunkt ist der Mittelpunkt der Drehplattform. Der Mittelpunkt des AOMs befindet sich in etwa auch in diesem.

Bei einem Radius von $r = 0,7$ m ergibt sich mit

$$U = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (3.15)$$

ein Umfang von $U = 4,398$ m. Da dieser 360° entspricht, entsprechen $0,01221$ m einem Grad. Dieser Hebel lässt sich per Hand und Augenmaß um einen Zentimeter bewegen. Somit ist diese AOM-Zange gut für die Justage des AOMs geeignet.

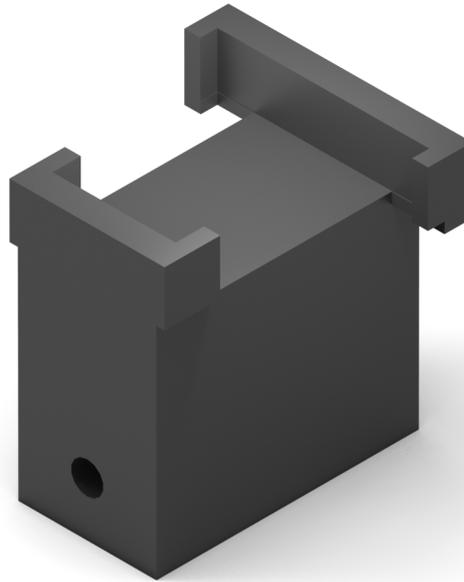


Abbildung 3.27: Kopfüber-Darstellung der AOM-Zange. Das auf der kurzen Seite zu sehende Loch ist ein Durchgangsloch für eine M4-Schraube für die Montage an der Bosch-Profil-Stange. Oben ist gut sichtbar die Formgebung, die um das Gehäuse des AOMs passt.

3.2.2.9 Wände und Fülldichte

Der Sensor soll eine geschlossene Konstruktion werden. Die **Wände** sind Bestandteil der beiden Hauptplatten und bilden mit ihnen ein Gesamtteil. Durch diese Konstruktionsweise ergibt sich zusammen mit der 60-prozentigen Fülldichte eine hohe Steifigkeit. Hier lässt sich mit dem Flächenträgheitsmoment argumentieren. Allgemein bekannt ist die Berechnung eines Flächenträgheitsmomentes I_{yy} einer Fläche A mit Abstand z_s vom Teilflächenschwerpunkt zum Gesamtflächenschwerpunkt mit

$$I_{yy} = \bar{I}_{yy} + z_s^2 \cdot A. \quad (3.16)$$

Bei dieser Gleichung bildet \bar{I}_{yy} das Teilflächenträgheitsmoment bezogen auf den Teilflächenschwerpunkt. Bei Systemen mit mehr als einer Fläche kommt pro Teilfläche der Steiner-Anteil $z_s^2 \cdot A$ hinzu, der das Flächenträgheitsmoment in Bezug auf die Gesamtschwerpunktsachse (Gesamtflächenschwerpunkt) beschreibt.

Je größer also z_s ist, desto größer ist auch der Steiner-Anteil $z_s^2 \cdot A$. Deswegen werden auch das Flächenträgheitsmoment und damit der Widerstand des Bauteils gegen Biegung vergrößert. Bezogen auf die Wände im vorliegenden Fall führt das zu der Theorie, dass, je höher die Wände sind, z_s desto größer wird. Denn der Gesamtflächenschwerpunkt liegt bei den vorliegenden beiden Teilen, den beiden Hauptplatten, mittig in der x-y-Ebene. Infolgedessen werden die Teilflächenträgheitsmomente I_{yy} größer und damit das gesamte Bauteil in Bezug auf Biegung stabiler.

Es lässt sich vermuten, dass eine höhere **Fülldichte** auch eine höhere Stabilität und einen höheren Widerstand gegen Biegung bedeutet. Begründen lässt sich dies über die allgemein

bekannten Gleichungen

$$\sigma(x, z) = \frac{M_y(x)}{I_y} \cdot z, \quad (3.17)$$

wobei x in Richtung der Balkenlänge und z in Richtung der Balkenhöhe weisen sowie

$$I_y = \int_A z^2 dA. \quad (3.18)$$

Hierbei ist σ die Biegespannung an der Stelle (x, y) , M_y das Biegemoment um die y -Achse und z der Abstand zwischen der Stelle (x, y) und dem Bezugskordinatensystem. Je größer nun die Füllichte ist, desto größer ist auch dA . Um sich dies zu veranschaulichen, muss man sich das 3D-Modell gedanklich in viele infinitesimal dünne, senkrechte Ebenen unterteilen, von denen das jeweilige Flächenträgheitsmoment $I_{y,i}$ mit $i = 0, 1, 2, \dots$ nach Gl. 3.18 berechnet wird. Je größer dA ist, desto größer ist I_y und damit aber desto kleiner die Biegespannung $\sigma(x, z)$. Somit sind Bauteile höherer Füllichte stabiler, benötigen aber auch länger im Druck. Aus diesen Gründen wurden die zwei Hauptplatten mit einer hohen Füllichte von 60% gedruckt, da diese in direkter Verbindung zu den Optiken stehen und diese möglichst exakt an Ort und Stelle bleiben und sich bei Außeneinwirkung nicht bewegen sollen. Die anderen Bauteile wurden mit 10% Füllichte, die Deckel nur mit 5% gedruckt. Die Deckel dienen dabei nur als Staubschutz sowie Schutz der Augen vor ungewollt gespiegelt und zurückgeworfenen Laserstrahlteilen, beispielsweise bei einem manuell auf dem Labortisch integrierten Wellenlängenfilter, um eine der beiden Wellenlängen aus dem weiteren Versuchsaufbau herauszunehmen, um die Justage der anderen Wellenlänge zu erleichtern.

3.2.2.10 Beobachtungen

Grundaspekt des Versuchs ist die Erstellung einer möglichst stabilen Konstruktion. Bei der Verformbarkeit der Module aus PLA fällt insbesondere beim Festziehen der Schrauben, die die Module miteinander verbinden (z.B. Hauptplatte Quadriga mit AOM-Hauptplatte), auf, dass sich die Teile unmerklich verformen. Dies wird aber erst bemerkbar, wenn auf den Strahl geachtet wird. Die Sockel Quadriga und AOM leiden besonders darunter, dass die Verschraubung von Modul zu Modul erstmal nur auf einer Seite erfolgt. Dadurch biegen sie sich auf der gegenüberliegenden Seite nach oben. Ein ähnliches Problem lässt sich auch bei dem Laser beobachten. Da Laser und Quadriga auf getrennten Bauteilen montiert sind und diese beiden Sockel über drei Schrauben und relativ kurze, überstehende Stege verbunden sind, ist die Biegesteifigkeit nicht besonders hoch. Veranschaulichen lässt sich dies, indem von oben senkrecht auf den eingeschalteten Laser gedrückt wird. Der, beispielsweise auf einem weißen Karton, sichtbare Laser bewegt sich leicht auf oder ab.

Wird nach der Justage am Ende des AOM-Moduls gegen die Wand gedrückt, lässt sich auch eine Dejustage der AOM-Ordnungen (nullte, erste und zweite Ordnungen der beiden Wellenlängen) bemerken. Dieses Phänomen verschwindet aber wieder, sobald die kreisförmigen Laschen der Sockel mit dem Tisch verbunden sind.

Der Anziehdruck der Schrauben führt zu komplexen Deformationen der Bauteile, die normalerweise „klein“ wären, aber auf optischen Maßstäben einen enormen Unterschied machen würden. Etwa so wie zuvor beschrieben bei dem Phänomen des Lasers.

3.2.3 Dritter Prototyp (Ausblick)

Es wurden nun die 1"-Strahlteilerhalter und -optiken durch die kleineren 0,5"-Varianten ersetzt. Der zweite Prototyp war eine komplizierte Konstruktion, die zum Beispiel die

AOM-Justage so schwierig werden ließ, dass dem Gesamtaufbau Zwischenteile für eine realisierbare Justage hinzugefügt werden mussten. Um den Zusammenbau zu erleichtern und die Stabilität zu erhöhen, wurde beim dritten Prototyp ein „Boxenprinzip“ angewandt. Die Elemente wurden nach Funktion in Gruppen aufgeteilt. Diese wurden Quadriga, AOM, Referenzstrahl (D-Spiegel, Spiegel und dritter Strahlteiler) und PD (beide PD mit vorangehendem Strahlteiler und Spiegel) genannt. Die später 3D-gedruckten Boxen werden auf eine große Aluminiumplatte montiert. Diese verfügt über M6-Bohrungen in gleichmäßigen Abständen von $25 \cdot 10^{-3}$ m zueinander.

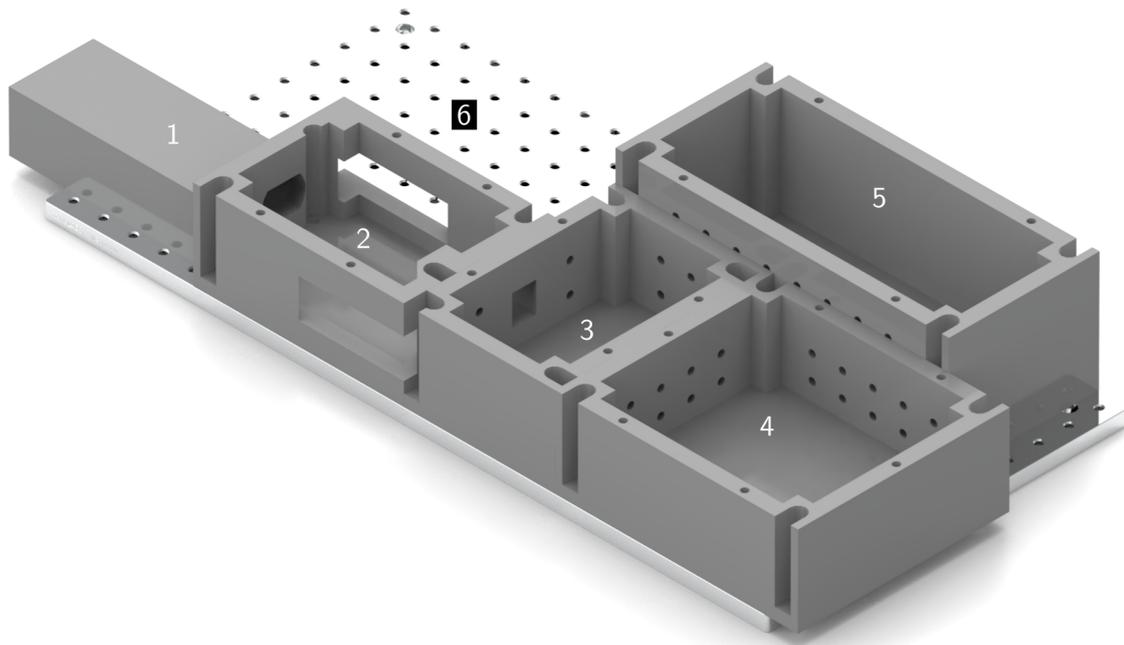


Abbildung 3.28: Isometrische Ansicht des dritten Prototyps. **1** Laser. **2** Box „Quadriga“. Die beiden großen Aussparungen in den Wänden werden von den Modulen für die Strahlteiler- und Spiegelhalter gefüllt, die als separate Bauteile im CAD eingesetzt werden und die Box lückenlos schließen. **3** Box „AOM“. Sichtbar in der linken Wand ist eine rechteckige Aussparung, durch die der Strahl aus der Box „Quadriga“ hinein gelangt (farblich eingekreist). **4** Box „Referenzstrahl“. Hier fehlen die Aussparungen in den Wänden, durch die die Laserstrahlen in die Box hinein und wieder hinaus gelangen. **5** Box „PD“, bei der sämtliche Konstruktionsdetails fehlen. Alle Boxen befinden sich auf einer Aluminium-Platte mit gleichmäßig angeordneten M6-Gewindebohrungen (**6**).

3.3 Vorversuche und Tests

3.3.1 Durchmesser Passlöcher für M4-Gewindeeinsätze

Für das Verschrauben der Komponenten 1"-Spiegelhalter, Laser sowie der 3D-gedruckten Teile untereinander waren M4-Gewindeeinsätze für Thermoplasten vorgesehen. Aus dem Datenblatt [34] für die verwendeten Gewindeeinsätze ist eine Durchmesserspanne von $5,8 \cdot 10^{-3}$ m bis $6,1 \cdot 10^{-3}$ m angegeben. Um den passenden Durchmesser zu finden, wurde ein Teststück konstruiert und 3D-gedruckt. Hierbei handelt es sich um ein simpel gehaltenes Teil mit sieben Löchern. Diese hatten Durchmesser von $5,8 \cdot 10^{-3}$ m bis $6,1 \cdot 10^{-3}$ m in

$0,05 \cdot 10^{-3}$ m-Schritten. Dabei hat sich der Durchmesser von $5,9 \cdot 10^{-3}$ m als passend herausgestellt. Passend bezeichnet hier nicht zu schwierig (kleinerer Durchmesser, etwa $5,8 \cdot 10^{-3}$ m) oder zu einfach (zu großer Durchmesser, etwa $6,1 \cdot 10^{-3}$ m) zu montieren. Montiert wurden sie mit einer M4-Schraube sowie Mutter und einem 7er-Schraubenschlüssel. Die Mutter wurde zuerst vollständig auf die Schraube geschraubt, der Gewindeeinsatz danach ebenso. Nun folgte das Eindrehen mittels 4er-Außensechskantschlüssel (M4-Inbus), bis die Mutter auf dem Testteil aufgesetzt hatte. Das Herausdrehen ohne Verwendung der Mutter war selten möglich. Meistens drehte sich der Gewindeeinsatz beim Eindrehen mit dem Schraubenkopf fest und bewegte sich beim Herausdrehen der Schraube wieder mit, was nicht erwünscht war, da der Gewindeeinsatz ja montiert bleiben sollte. Abhilfe schaffte die zuerst auf die Schraube aufzumontierende Mutter. Nach dem Eindrehen hielt man mit dem 7er-Schraubenschlüssel die nun fest mit dem Gewindeeinsatz verbundene Mutter - beim Eindrehen verkantete der Gewindeeinsatz nicht mehr mit der Schraube, sondern mit der Mutter - fest und drehte mit dem M4-Inbus die Schraube, welche wiederum mit der Mutter verkantet war, heraus. Sobald Schraube und Mutter nach einem kleinen Ruck (etwa eine Zehntel Umdrehung) voneinander gelöst waren, konnte man die Mutter mit einem Ruck vom Gewindeeinsatz lösen und die Schraube mit Mutter vollständig aus dem eingeschraubten Gewindeeinsatz herausschrauben.

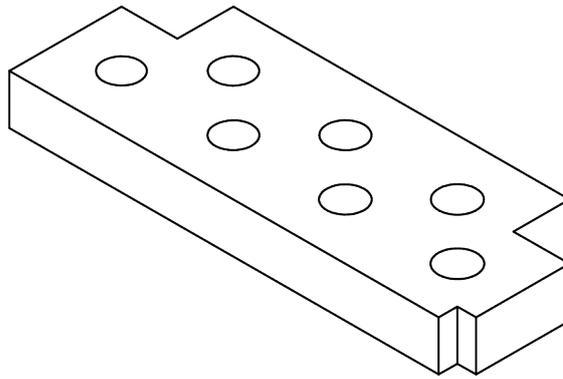


Abbildung 3.29: Zu sehen ist eine isometrische Ansicht. Die längste Seite ist in Wirklichkeit $72 \cdot 10^{-3}$ m lang, das Teil ist $8 \cdot 10^{-3}$ m dick. Die beiden groß abgeschnittenen Ecken dienten der Material- und der Druckzeiteinsparung, die kleine diente der Orientierung, sobald das Teil in der Hand gehalten wurde.

3.3.2 Laserstrahlausbreitung

Da die Optiken und Optikdurchgangslöcher in den Haltern nun auf eine geringere Größe reduziert wurden, die Querschnittsflächen der Laserstrahlen jedoch gleich groß geblieben sind, muss die Grundposition der Spiegelhalter nun exakt stimmen, da kleine Abweichungen schon zu Clippen (Strahl trifft nicht das Durchgangsloch der Spiegelhalter oder die Optik selbst, sondern die Spiegelhalter) führen. Dies wurde bei einem Justagetest ersichtlich, bei dem die vier Spiegelhalter der Quadriga auf zügig 3D-gedruckten Posts („Stützen, Halter“) montiert wurden und wie im Prototypen vorgesehen vor dem Laser auf dem Labortisch positioniert wurden. Die Laserstrahlen verlassen den Laser nicht koaxial zueinander und auch nicht horizontal, sondern ein bisschen schief. Mit welchen Vektoren die beiden Laserstrahlen aus dem Laser austreten, musste ausgemessen werden. Dazu wurde ein Sensor, eine CMOS-Kamera (Complementary Metal Oxide Semiconductor - Komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter, [35]) eingesetzt, der die Intensität des Lichts, das auf ihn fällt, messen und in der Ebene (bestehend aus lokaler horizontaler und vertikaler

Achse) darstellen kann. Seine Messung wird dabei in ein Koordinatensystem eingetragen, sodass der Mittelpunkt des Laserstrahls y - und z -Koordinaten zugeteilt bekommt. Dabei zeigt die positive z -Achse vertikal nach oben und die y -Achse orthogonal dazu horizontal in Strahlausbreitungsrichtung nach rechts. Nun wird auf dem Labortisch alle $10 \cdot 10^{-2}$ m eine Messung durchgeführt und die beiden Koordinaten notiert. Ergänzend kommt die x -Achse dazu, die orthogonal zu den beiden anderen Koordinatenachsen in Strahlausbreitungsrichtung gerichtet ist. Diese Messungen wurden jeweils für beide Wellenlängen ausgeführt. Dabei wurde jedes vierte Loch auf dem Labortisch verwendet, die einzeln untereinander einen Abstand von $2,5 \cdot 10^{-2}$ m haben. Der Messaufbau ist in Abb. 3.30 dargestellt und die Ergebnisse stehen in Kap. 4.3. Bei der Skizze des Versuchsaufbaus ist zu beachten, dass nur die Konstellation für die Messung des grünen Lichts dargestellt ist. Das infrarote Licht wird zu Beginn der Messstrecke sofort geblockt, um auf dem Sensor bzw. im Koordinatensystem auf der Computerauswertung nur Daten des grünen Lichts zu sehen. Es folgte eine Messung mit dem infraroten Licht, wobei das grüne Licht mit einem Filter aus der Versuchsstrecke entfernt wurde (in keiner Abbildung dargestellt).

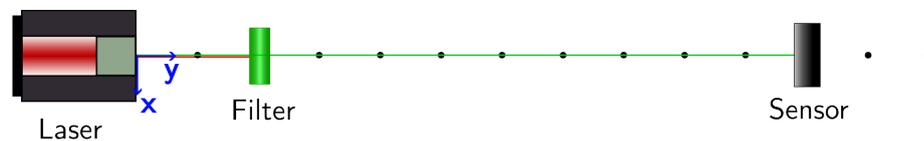


Abbildung 3.30: Skizze des Aufbaus der Laserstrahlmessung (Draufsicht). Symbol für Laser aus [1]. Abgebildet ist der Aufbau für die Messung des grünen Lichts. Das infrarote Licht (rote Linie) wird von einem Wellenlängen-Filter vom weiteren Versuchsweg entfernt. Die in gleichmäßigem Abstand angeordneten schwarzen Punkte direkt auf dem Weg des Laserstrahls stellen die Position in $10 \cdot 10^{-2}$ m-Abständen dar, an denen jeweils eine Messung durchgeführt wurde. Die Skizze ist weder farb- noch maßstabgetreu und enthält nicht alle tatsächlich verwendeten Messpositionen sowie keine z -Achse.

3.3.3 Justage auf Tisch oder Lochplatte

Um bei der Positionierung der Hauptplatten bzw. beim dritten Prototypen der einzelnen Boxen eine gewisse Genauigkeit sowie Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, kam die Idee der Justierstifte zur Umsetzung. Als Justierstifte dienten M6x10-Schrauben, die in den Tisch geschraubt und in die darüber gesetzten Bauteile passende Aussparungen konstruiert wurden. Die zylinderförmigen Aussparungen mussten einen passenden Durchmesser mit einem wichtigen Kriterium haben. Dabei kam es darauf an, dass die Schraubenköpfe gerade so in diese Aussparungen passten, sodass eine Montage, jedoch keine Beweglichkeit der fixierten Box gewährleistet wurden. Der ideale Durchmesser wurde mithilfe eines Teststückes ermittelt. Neun Löcher, mit Durchmessern in Schritten von $50 \cdot 10^{-6}$ m zueinander und im Bereich von $9,90 \cdot 10^{-3}$ m bis $10,30 \cdot 10^{-3}$ m, fanden Platz auf kompakten 3D-Druck-Teilen. Eines davon war eine Ausführung mit $1 \cdot 10^{-3}$ m-Fasen an den Bohrlöchern, das andere ohne. Dazu stehen in den Tabellen 3.1 und 3.2 die mit Messschieber ermittelten Werte zur Verfügung. Getestet wurde mit einer M6-Schraube, ob der Schraubenkopf in das jeweilige Bohrloch hineinpasst. Gesucht war der kleinstmögliche Durchmesser, bei dem der Schraubenkopf per Hand in das Bohrloch geschoben werden konnte. Gesucht war nämlich eine Presspassung, sodass die Justierstifte kein Spiel in den Bohrlöchern bzw. Aussparungen hatten, sodass sie das Bauteil später auch sicher justieren und fixieren. Diese Durchmesser sind jeweils in grüner Farbe hervorgehoben.

Tabelle 3.1: Testdurchmesser M6-Stifte ohne Fasen [mm]

CAD-Maß	tatsächliches Maß
9,90	9,7
9,95	9,8
10,0	9,825
10,05	9,90
10,1	9,925
10,15	9,95
10,20	10,00
10,25	10,05
10,30	10,125

Tabelle 3.2: Testdurchmesser M6-Stifte mit Fasen [mm]

CAD-Maß	tatsächliches Maß
9,90	9,7
9,95	9,8
10,0	9,85
10,05	9,90
10,1	9,95
10,15	9,975
10,20	10,00
10,25	10,10
10,30	10,10

3.3.4 Durchmesser Lötgewindeeinsätze

Eine Möglichkeit neben dem Eindrehen, Gewindeeinsätze in 3D-Druckteile aus PLA einzusetzen, ist das Einlöten. Dafür gibt es eigens dafür entwickelte Gewindeeinsätze. Diese zylinderförmigen Messingstücke haben außen Rillen im 45°-Winkel zur Längsachse. Nun werden die Einsätze auf die dafür vorgesehenen Bohrlöcher gesetzt und mit der Spitze des LötKolbens berührt. Die erforderlichen Informationen zu den Durchmessern können den Packungen (Quelle: Bild von Packung oder Homepage; kein sauberes Datenblatt vorhanden, nur ein Bild einer Tabelle) entnommen werden. Beim Erhitzen der Einsätze wandert die Wärme über das gut leitende Metall in das PLA, welches bei etwa 210 °C [36] zu schmelzen beginnt. Bei einer LötKolbentemperatur von etwa 250 °C wird das am Bohrloch befindliche PLA langsam weich und der Gewindeeinsatz lässt sich langsam hineindrücken. Dabei gelangt das weiche PLA in die Rillen der Gewindeeinsätze und nach der Erhärtung sitzt er fest verankert in seiner Position. Um den Gewindeeinsatz gerade, achsenparallel zur Achse des Bohrlochs und planar zur Oberfläche des 3D-gedruckten Bauteils zu manövrieren, wird es die letzten zwei bis drei Millimeter mit einem Metallstück hineingedrückt. Dieses hat eine deutlich größere Auflagefläche, als die Querschnittsfläche des Gewindeeinsatzes groß ist, und somit schließt es den Vorgang planar mit der Bauteiloberfläche des 3D-Druckteils ab. Trotz der Hitze im Gewindeeinsatz wird das Metallstück nicht merkbar warm. Die Hitze wird in das PLA übertragen, welches eine viel größere Fläche des Gewindeeinsatzes berührt als das Metallstück, welches nur den oberen Rand berührt und somit nur ein sehr kleiner Teil der Wärme übertragen wird. Der Wärmestrom hängt nämlich von der Fläche

A ab. Die allgemein bekannte Gleichung für den Wärmestrom \dot{Q} lautet

$$\frac{Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}. \quad (3.19)$$

Außerdem ist das Metallstück deutlich größer als der Gewindeeinsatz und ein Teil der übertragenen Wärme wird auch an die Umgebungsluft übertragen.

Das Testteil ist simpel gehalten. Ein Quader der Maße $94 \text{ m} \times 39 \text{ 000 m} \times 14 \text{ 000} \cdot 10^{-3} \text{ m}$ mit zwei Reihen der entsprechenden Durchmesser für Gewindeeinsätze M2,5, M3, M4, M5, M6, $\frac{1}{4}$ " und M8.

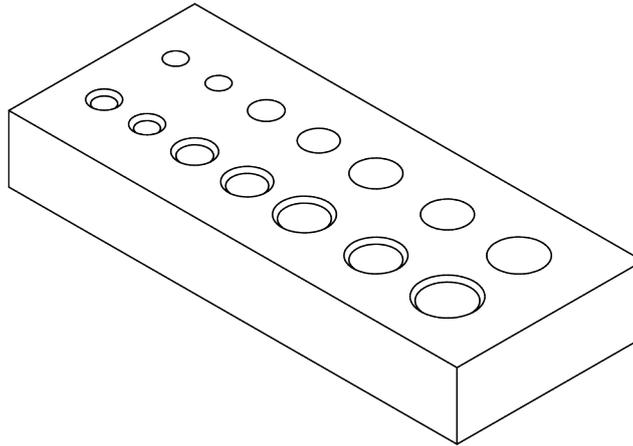


Abbildung 3.31: Isometrische Ansicht des genannten Testteils. Zu sehen sind die beiden Lochreihen, eine mit und eine ohne Fase.

3.4 Thermalmanagement

3.4.1 Zweiter Prototyp

Beim Betrieb von Laser sowie AOM tritt Abwärme auf. Wenn diese auf die anderen Komponenten, insbesondere die Optiken, übergreift, verändern sich die Endergebnisse der Versuche. Um hier entgegenzuwirken, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder wird die Wärme auf kürzestem Weg aus dem Versuch geleitet oder sie wird im Aufbau gehalten, wobei der gesamte Versuchsaufbau geheizt und damit auf eine höhere als die Umgebungstemperatur gebracht wird. Wichtig ist hierbei nur die für den Versuch benötigte *konstante* Temperatur. Bei dem zweiten Prototypen findet sich die erste Lösungsvariante wieder. Direkt unter Laser und AOM in die 3D-gedruckten Komponenten eingesetzt befinden sich große Aluminiumblöcke, die die Unterseite von Laser und AOM sowie - in diesem Fall - die metallene Tischplatte im Labor schlüssig berühren und für einen sauberen Wärmeübergang ohne Luftpolster sorgen. Dargestellt sind beide in Abb. 3.32 und im Anhang (Kap. 7 B.) finden sich die zugehörigen technischen Zeichnungen.

Bei der Konstruktion der Aluminiumblöcke wurde darauf geachtet, die Grund- bzw. Übergangsfläche größtmöglich zu gestalten. Dies resultiert aus der Formel für den Wärmestrom \dot{Q} , Gl. 3.19. Eine größere Fläche A bedeutet einen größeren Wärmestrom, was in diesem Konstruktionsfall gewünscht ist.

Die Formgebung der Blöcke soll die Montage größtmöglich vereinfachen. So ist ihre Form ein Quader mit zwei Stufen, die in die gegenteilige Form im 3D-gedruckten Element eingesetzt wird und so schon fest sitzt. Auch sind sie $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ höher als die 3D-gedruckten

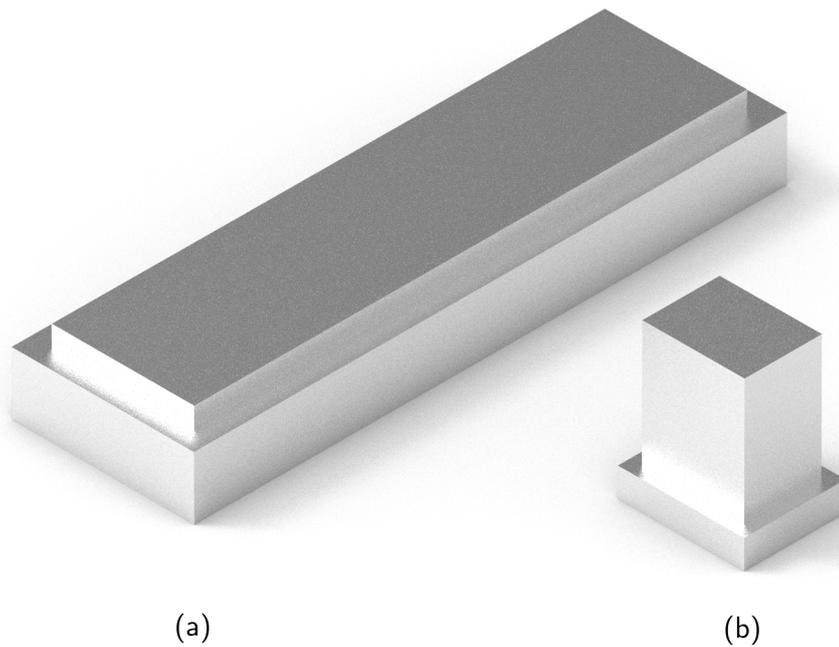


Abbildung 3.32: Isometrische Ansicht der Metallkühlungen **(a)** des Lasers und **(b)** des AOMs mit der Unterseite nach oben.

Elemente, in die sie eingesetzt werden, um eine Berührung mit dem Laser bzw. dem AOM zu garantieren und ein Luftpolster zu verhindern. Ein Luftpolster würde die Wärme nicht so gut leiten wie die materialschlüssige Variante.

Hierbei lässt sich mit der Wärmeleitfähigkeit λ sowie dem mittleren Wärmeübergangskoeffizient α_m argumentieren. Der Unterschied zwischen der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium mit $\lambda_{Alu} = 236 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und die der Umgebungsluft mit $\lambda_U = 0,262 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ist enorm. Dies verdeutlicht, dass ein Luftpolster zwischen dem Laser (Gehäuse aus Aluminium) und Metallkühlung (Aluminium) die Wärmeableitung bremsen würde und daher unerwünscht ist.

3.4.2 Dritter Prototyp (Ausblick)

Die Wärmeabfuhr aus dem zweiten Prototypen soll verbessert werden. Beim Folgeprototyp sollte die Thermalmanagement-Variante beibehalten werden. Gleichzeitig konnte vollständig auf 0,5"-Optiken und -Optikhalter zurückgegriffen werden, weswegen die Quadriga insgesamt kompakter wurde. Das System aus zwei einzelnen Aluminium-Blöcken sollte aber zu einem sogenannten „Wärmebus“ erweitert werden. Dabei bestünde eine Verbindung der beiden Kühlblöcke, die unter den Optikelementen der Quadriga verlaufe und ebenfalls aus Aluminium gefertigt würde. Somit wären beide Aluminium-Blöcke miteinander und mit dem metallenen Labortisch verbunden. Hieraus ergäbe sich ein größeres Abwärmesystem, das die Wärme besser an die Umgebung abgeben könne.

4 Ergebnisse

4.1 Finale Iteration des Prototyps

Der zweite Prototyp mit der erweiterten AOM-Justage mit Basisstück, Drehplattform und Fixiering war der einzige der drei Prototypen, mit dem Messungen durchgeführt wurden. Mit dem ersten Prototyp wurden, wie in Kap. 3.2.1 beschrieben, nur Erfahrungen über den 3D-Druck gesammelt, die in den zweiten Prototyp einfließen. Der dritte Prototyp, konzeptioniert als modulares Boxensystem, das eine Verbesserung einzelner Komponenten unabhängig der anderen erlaubt, wurde in Kap. 3.2.3 vorgestellt. Er war dafür vorgesehen, auf einer Metallplatte montiert zu werden, um eine Messung außerhalb des Labors durchzuführen. Somit bleibt der zweite Prototyp der einzig vollständige, dessen Messergebnisse in Kap. 4.2 vorgestellt werden.

4.2 Charakterisierung und Messung

In der nachfolgenden Abbildung 4.1 sind die Ergebnisse einer Messung des Lasersensors dargestellt. Dabei wurde der zweite Prototyp verwendet, welcher unter Laborbedingungen 63 Stunden ohne Unterbrechung eingeschaltet war. Parallel dazu waren auf dem Labortisch neben dem Lasersensor zwei piezoresistive Drucktransmitter aufgestellt, welche zeitgleich zum Lasersensor den absoluten Druck gemessen haben. Daraus ließ sich eine relative Druckänderung errechnen, die als Vergleichswert (Referenzwert) zu der durch den Lasersensor ermittelten relativen Druckänderung diente. Einer der piezoresistiven Drucktransmitter ist in Abb. 3.23 zu sehen. Im Graph sind die relativen Druckänderungen Δp über der Zeit in Stunden h dargestellt. Die von den Drucktransmittern gemessene relative Druckänderung ist in rot („Ref.“) dargestellt. Der blaue Graph bildet die über den Lasersensor ermittelte relative Druckänderung ab. Diese wird, wie in Kap. 2.3.1 und 2.4 beschrieben, aus dem gemessenen Signal am PD errechnet. Die in der Rechnung verwendete Luftfeuchtigkeit lag konstant bei $rh = 50\%$, die Temperatur bei $T = 22\text{ }^\circ\text{C}$ mit einer Abweichung von ca. $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$ und einem CO_2 -Gehalt von $\eta_c = 450\text{ ppm}$ der Umgebungsluft. Trotz Laborbedingungen sind Temperaturschwankungen aufgetreten, die aber im Nachhinein korrigiert wurden.

Die relativen Druckänderungen der piezoresistiven Drucktransmitter und die des DI liegen nicht exakt ineinander, wie in der Abb. unweit zu erkennen ist. Jedoch weisen beide Graphen ähnliche Ausschläge auf. Zu manchen Zeitpunkten weist der rote Graph einen höheren Wert auf, zu manchen der dunkelblaue. Die Verteilung ist hierbei etwa ausgeglichen. Dabei sind diese etwa gleichmäßig verteilt. Die Abweichungen zwischen den beiden Messmethoden liegt maximal bei etwa 15 Pa.

4.3 Ergebnisse Messung Laserstrahlausbreitung

In diesem Kapitel finden sich die Ergebnisse der Laserstrahlausbreitungsmessung aus Kap. 3.3.2. Aus den gemessenen Werten lassen sich die beiden Ausgleichsgeraden als Vektoren

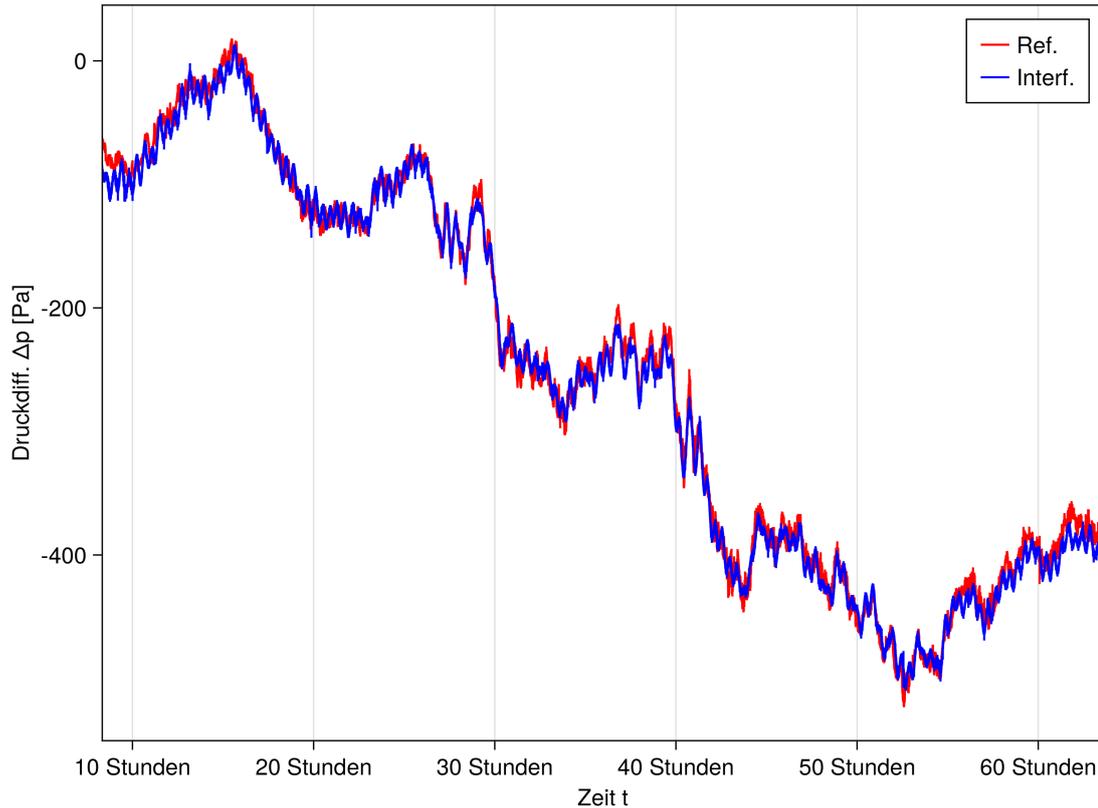


Abbildung 4.1: Veranschaulichte Messergebnisse einer mehrtägigen Messung unter Laborbedingungen. Dargestellt ist die Messung ab der elften Stunde. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich das DI stabilisiert. Die relativen Druckänderungen Δp sind über der gemessenen Zeit in Stunden h aufgetragen. Dabei zeigt der rote Graph einen Referenzwert und der blaue die aus der Lasermessung resultierende relative Druckänderung.

im dreidimensionalen Raum darstellen, siehe Abb. 4.2. Es ergaben sich

$$v_{532}(t) = \begin{pmatrix} 1.163 \cdot 10^{-3} \\ 1.107 \cdot 10^0 \\ 2.049 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 6.519 \cdot 10^{-4} \\ 9.999 \cdot 10^{-1} \\ 2.133 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

und

$$v_{1064}(t) = \begin{pmatrix} -2.337 \cdot 10^{-4} \\ 1.150 \cdot 10^0 \\ 1.956 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} -3.642 \cdot 10^{-4} \\ 9.999 \cdot 10^{-1} \\ 1.995 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}.$$

Verwendet wurde ein Rechenverfahren nach [37].

Bei beiden Wellenlängen ist auf eine Weglänge von 2 m ein Anstieg um $4 \cdot 10^{-3}$ m in z-Richtung zu verzeichnen. zusätzlich vergrößert sich der Abstand der beiden Strahlen von ca. $0,2 \cdot 10^{-3}$ m an der Lasermündung auf ca. $2,4 \cdot 10^{-3}$ m nach einer zurückgelegten Strecke von 2 m. Die gesamte Messstrecke ist länger als 2 m, somit würden die beiden Strahlen noch weiter auseinander liegen. Dann würden die Strahlen unterschiedlichen Strecken zurücklegen und möglicherweise nicht mehr interferieren, was eine Druckmessung unmöglich macht. Aus diesem Grund muss die Strahlüberlagerung mit den beiden Strahlteilern und Spiegeln („Quadriga“) dem DI zu Beginn des Versuchsaufbaus hinzugefügt werden (siehe dazu Kap. 3.1.3). Mit der Strahlüberlagerung können die beiden Laserstrahlen räumlich ausgerichtet

werden.

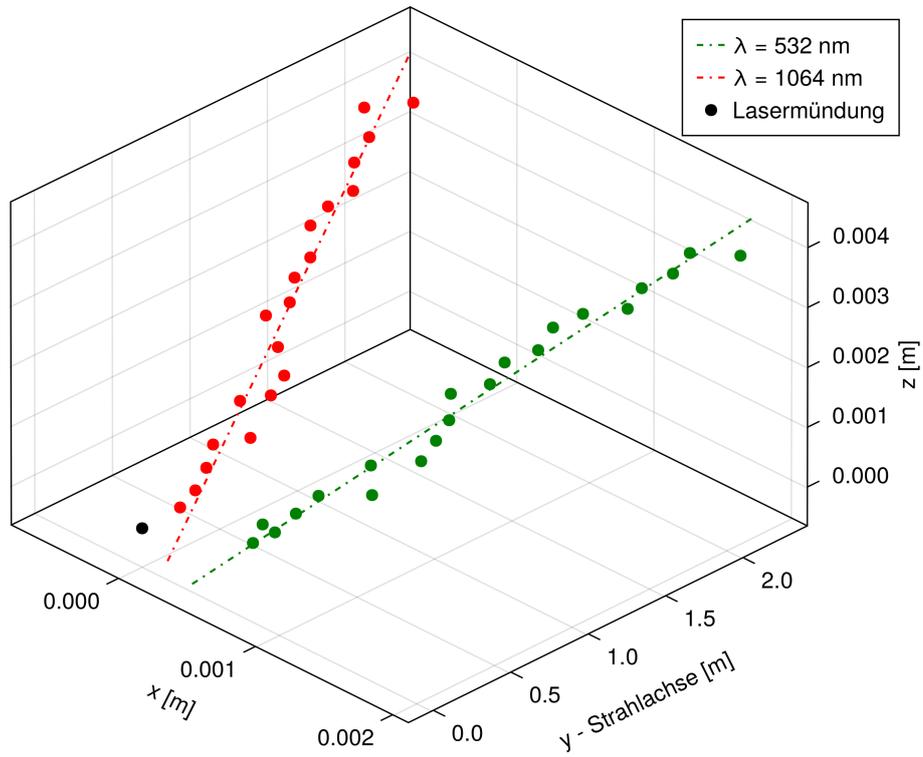


Abbildung 4.2: Dreidimensionaler Plot der Laserstrahlausbreitungsmessung beider Wellenlängen. Die roten und grünen Punkte stellen die einzelnen, gemessenen Werte dar, aus denen jeweils, in gestrichelt visualisiert, die Ausgleichsgerade errechnet wurde. Erkennbar ist auch Lage der aus dem Laser austretenden Laserstrahlen zur Lasermündung (schwarzer Punkt).

5 Diskussion

5.1 Interpretation der Messergebnisse aus Kap. 4.2

Die Abweichungen zwischen den relativen Druckänderungen der beiden Messmethoden sind, wie in Abb. 4.1 zu erkennen, auf maximal etwa 15 Pa beschränkt. Zu beachten ist, dass die Messung des DI auf einem Aufbau aus PLA basiert welches mit $\rho_{PLA} = 1,24 \text{ kg m}^{-3}$ eine geringere Dichte aufweist als die beim Aufbau des DI auf dem Labortisch verwendeten Sockel aus Edelstahl ($\rho_{ES} \approx 8,0 \text{ kg m}^{-3}$). Der Labortischaufbau, also der Aufbau des DI auf dem Labortisch, bei dem jede Komponente auf einem einzelnen Edelstahlsockel montiert und auf dem Labortisch fixiert wurde, konnte erfolgreich in eine kompakte Konstruktion integriert werden. Die Messergebnisse der beiden Methoden Drucktransmitter und DI liegen nah beieinander.

Zusätzlich kann diese Messung des zweiten Prototyps mit der Messung seines Vorläufers verglichen werden. In [2] wird ein DI mit Messergebnissen präsentiert. Die Komponenten des genannten DI und die des DI des zweiten Prototyps aus dieser Arbeit sind zu Teilen, jedoch nicht vollständig, identisch. Beim DI aus [2] sind die Komponenten auf Edelstahlsockeln einzeln auf einem Labortisch fixiert. Die Genauigkeiten der Messergebnisse beider DI weisen eine ähnliche Genauigkeit auf. Schließlich liegen die Ergebnisse bezogen auf die Genauigkeit von piezoresistiven Drucktransmittern und die beider DI nahe beieinander, was auf einen Erfolg der Integration des DI in eine kompakte Konstruktion hindeutet.

5.2 Was wurde bzgl. Strategien beim Rapid Prototyping gelernt

Der verwendete 3D-Drucker arbeitete mit einer Toleranz von $0,1-0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Das bedeutet, dass ein Bauteil, welches im CAD mit einer Länge von $l_{Bauteil} = 100 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ definiert ist, als gedrucktes Teil etwa $l_{Bauteil,Druck} = 100,2 - 100,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ lang ist. Dies konnte durch Abmessen mit einem Messschieber geprüft werden. Außerdem wurde das deutlich, als der ersten Prototyp fertig gedruckt war und zusammengebaut wurde. Der Laser passte kaum in den Bereich, der am Hauptteil für ihn vorgesehen war (vgl. hierzu Abb. 3.5, Nummer 4). In der Praxis bedeutet das Problem mit der Drucktoleranz, dass am Ende des Konstruktionsvorgangs im CAD noch Material weggenommen werden musste, um diese Toleranz auszugleichen. Dafür wurden in der horizontalen Ebene am Rand der Bauteile rundum Rechtecke gesetzt. Diese wurden negativ in das Bauteil extrudiert. Es wurde also Volumen vom Bauteil, ausgehend vom Rand, entfernt. Die Dicke bzw. Tiefe der Rechtecke, also die Breite des Streifens, der abgezogen wurde, hatte einen Wert von $b_{Toleranz} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

5.3 Welche Tricks entdeckt wurden

Der erste Druck der beiden Hauptplatten mit Modulen war nicht erfolgreich. Die Bereiche, in denen sich die Hauptplatte mit den Modulen überschneiden haben, wurden nicht gedruckt. Die Slicer-Software für den 3D-Druck muss das Material an den betroffenen Stellen voneinander abgezogen und somit einen Hohlraum angenommen haben. Die darüber liegenden Schichten wurden „in die Luft“ gedruckt und folglich schlug der Druck

fehl. Der Weg vom CAD-3D-Modell zur gcode-Datei für den 3D-Drucker musste angepasst werden. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Baugruppe „Hauptplatte Quadriga mit den vier Modulen“ aus dem CAD-Programm heraus als stl-Datei exportiert und in die Slicer-Software importiert. Dort wurde der Schnitt gestartet, das Modell als gcode-Datei exportiert und der Druck begonnen. Die Anpassung für einen erfolgreichen Druck musste im CAD-Programm vorgenommen werden. Zuerst musste eine neue Bauteil-Datei geöffnet werden. In diese wurde dann mit der Funktion „Kopie eines Teils“ die Baugruppe geladen. Es folgten das Exportieren als stl-Datei und die folgenden Schritte genau wie zuvor. Diese neue Vorgehensweise führte zu erfolgreich gedruckten 3D-Druck-Bauteilen auf Basis von Submodulen.

5.4 Mechanische Stabilität

Vor allem bei der Strahlüberlagerung ist hohe Resistenz gegenüber Störungen wie Stöße und Vibrationen erforderlich. Die dafür benötigte Stabilität muss von der 3D-gedruckten Hauptplatte Quadriga ausgehen. Schon beim ersten Prototypen, der mit 20% Füllichte gefertigt wurde, sind bei montierten Optikkomponenten und eingeschaltetem Laser einfache Tests gemacht worden. Diese erfolgten durch das händische Drücken gegen die Spiegel- und Strahlteilerhalter. Bei der PLA-Grundplatte, auf der die optischen Komponenten verschraubt waren, hat das Material bei leichter Druckbelastung nachgegeben. Dadurch haben sich auch die Optikkomponenten bewegt. Sichtbar wurde das beim Beobachten der Strahlage. Dazu wurden die beiden Laserstrahlen sichtbar gemacht, indem sie auf eine weiße Oberfläche gerichtet wurden. Bei den Stabilitätstests haben sich die Positionen der Lichtpunkte auf der weißen Oberfläche um sehr kleine, aber mit bloßem Auge sichtbare, Weglängen verschoben. Daraus resultierte die um 40% angehobene Füllichte der Quadriga des zweiten Prototyps, um eine höhere Stoßresistenz zu erreichen. Die Steifigkeit ist dadurch zwar besser geworden, jedoch wären möglicherweise 90 oder 100% erforderlich gewesen, um noch bessere Ergebnisse zu erzielen.

Eine Verbesserung der Stabilität könnte auch durch einen Materialwechsel begünstigt werden. Statt PLA könnte auf Aluminium oder Stahl zurückgegriffen werden. Eine Konstruktion wie den zweiten Prototypen aus Metall zu fertigen wäre sehr aufwändig, da sie komplizierte Strukturen aufweist und in der Fertigung aus einem Block heraus gefräst werden müsste. Dafür könnte die gesamte Struktur vereinfacht werden, sodass die Konstruktion einfacher zu fertigen wäre. Zum Beispiel könnte ein Metallblock als Ausgangskörper genutzt werden und nur das Material für Optikkomponenten und Strahlweg entfernt werden. Dabei wäre auch ein anderes gesamtes Thermalverhalten vorhanden, da Metalle eine höhere Wärmeleitfähigkeit λ besitzen als PLA ($\lambda_{PLA} \approx 0,2225 \text{ W/mK}$, $\lambda_{Alu} \approx 80 - 235 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und $\lambda_{Stahl} \approx 10 - 55 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Eine weitere Möglichkeit würde der Druck mit einem Hartz-Drucker bieten, der Teile als Vollteile, also mit 100% Füllichte, produziert. Wie sich die Komponenten aus anderen Materialien auf die Stabilität und die Messung auswirken würden, kann in der Zukunft untersucht werden.

6 Fazit und Ausblick

Die Konstruktion, der Rapid-Prototyping-Druck, der Zusammenbau, die Justage sowie die Messung mit dem zweiten Prototyp standen im Mittelpunkt dieser Arbeit. Aus der Messung (siehe Kap. 4.2) ist ersichtlich, dass die relative Druckmessung des Lasersensors bis auf eine maximale Abweichung von etwa 15 Pa den Messungen der beiden piezoresistiven Drucktransmittern entspricht.

Soweit zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit bekannt, war dies der erste Versuch, ein DI mittels Rapid-Prototyping-Verfahren in einen kompakten Aufbau zu integrieren. Es wurde eine Konstruktion mit allen für die Messung notwendigen Komponenten konstruiert, gedruckt, zusammengesetzt und eine verwertbare, mit piezoresistiven Drucktransmittern vergleichbare, Messung durchgeführt. Außerhalb des Labors fand noch keine Messung statt. Dafür wäre eine Lochplatte notwendig, auf die der Sensor montiert werden kann, da er durch die mehrteilige Bauform mit den wenigen Schraubverbindungen nicht stabil genug ist. Mit einem 3D-Drucker, dessen Druckvolumen groß genug wäre, um eine vollständige Konstruktion als ein Bauteil zu drucken, wäre dies unter Umständen möglich. Hieraus hätte eine stabilere Gesamtkonstruktion entstehen können.

Die Hauptplatten des zweiten Prototyps wurden mit einer Fülldichte von 60 % und die Sockel mit Fülldichten von 10 - 20 % gedruckt. Der Faktor Zeit spielte hier eine Rolle, da die Druckzeiten bei höherer Fülldichte sehr hoch werden können. Die Hauptplatte Quadriga (mit Modulen) beispielsweise benötigte im Druck bei der genannten geringen Fülldichte knapp 30 Stunden. Bei erhöhter Fülldichte wäre, wie in Kap. 3.2.2.9 beschrieben, die Stabilität angestiegen. Wie sich dies auf die Messung ausgewirkt hätte, kann in der Zukunft untersucht werden.

Aus den Erfahrungen des zweiten Prototyps entstand die Idee des „Boxenschemas“, das in den dritten Prototyp führte (siehe Kap. 3.2.3). Besser, als die Komponenten des zweiten Prototyps erneut jedoch mit erhöhter Fülldichte zu drucken, wäre das Fertigstellen der Konstruktion dieses dritten Prototyps. Dieser folgt einem strukturierten, einfach zu montierenden Konstruktionsschema, nach dem der Gesamtaufbau des Sensors in mehrere Boxen aufgeteilt wird, von denen jede nur wenige Komponenten enthält. Diese würden auf einer gemeinsamen Grundplatte verschraubt werden. Eine hohe Fülldichte würde auch hier für Stabilität sprechen. Mit großer Wahrscheinlichkeit wäre eine Messung mit dem dritten Prototyp, der planmäßig auf einer metallenen Lochplatte montiert werden würde, in der Außenwelt realisierbar, da dieser mehrere M6- statt M4-Schraubverbindungen für die Montage vorsah. Durch sein Boxenprinzip und die größeren Schrauben würde die Stabilität der Boxen untereinander und deren Verbindung mit der Lochplatte möglicherweise stabiler sein als die zwischen den Komponenten des zweiten Prototyps. Nach erfolgreicher Erprobung des dritten Prototyps könnte eine Version aus einem Metall wie Aluminium oder Stahl gebaut werden. Damit könnte die mechanische Stabilität des Aufbaus weiter erhöht werden und das Thermalmanagement würde sich ändern, da mit dem Materialwechsel eine Veränderung der Materialeigenschaften einhergeht.

Wie soeben beschrieben gibt es für zukünftige Projekte, die sich mit der Integration von optischen Sensoren für die relative Druckmessung in der Luftfahrt in kompakte Konstruktionen befassen, viele Ideen und Möglichkeiten. Der Ergebnisteil und die Diskussion haben gezeigt, dass ein in eine PLA-Konstruktion integriertes DI Messergebnis liefern kann, die sich mit ähnlichen Messversuchen durchaus vergleichen lassen.

Referenzen

- [1] Alexander Franzen. ComponentLibrary. <https://www.gwoptics.org/ComponentLibrary/>, 2009. Link entnommen am 24.04.2024. G, 9, 38
- [2] Hugo Uittenbosch, Oliver Kliebisch, Raoul-Amadeus Lorbeer, and Peter Mahnke. Synthetic dispersion interferometry for relative atmospheric pressure sensing. *Optics Express*, 31(4):6356–6369, Feb 2023. I, III, 1, 8, 47
- [3] Deutscher Wetterdienst (DWD). ICAO-Standardatmosphäre (ISA). https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 2024. Entnommen am 17.05.2024. 1
- [4] European Aviation Safety Agency (EASA). Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25). <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-25-amendment-28>, December 2023. Link entnommen am 17.05.2024. 1
- [5] Yihua Cao, Wenyuan Tan, and Zhenlong Wu. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Science and Technology*, 75:353–385, 2018. 1
- [6] Hugo Uittenbosch, Raoul-Amadeus Lorbeer, Oliver Kliebisch, Peter Mahnke, and Thomas Dekorsy. Stability and Vibration Robustness of a Real-Time Synthetic Dispersion Interferometer. In *Optica Sensing Congress 2023 (AIS, FTS, HISE, Sensors, ES)*, page STh2D.3. Optica Publishing Group, 2023. 1, 7, 8
- [7] Bahaa E. A. Saleh and Malvin C. Teich. *Optik und Photonik*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 3 edition, April 2020. 3, 4, 6
- [8] Frank Träger. *Springer Handbook of Lasers and Optics*. Springer Berlin, Heidelberg, 2 edition, 2012. 3
- [9] Albert A. Michelson and Edward W. Morley. On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *The American Journal of Science*, 34(203):335, November 1887. 3
- [10] CASTECH Inc. CAOM-080-030-CQC-532&1064-AF-A03, 2023. Datenblatt im Anhang. 5, 10
- [11] Jr. Eddie H. Young and Shi-Kay Yao. Design considerations for acousto-optic devices. *Proceedings of the IEEE*, 69(1):54–64, 1981. 5, 6
- [12] J. Irby, R. Murray, P. Acedo, and H. Lamela. A two-color interferometer using a frequency doubled diode pumped laser for electron density measurements. *Review of Scientific Instruments*, 70(1):699–702, 01 1999. 5, 7
- [13] VP Drachev, Yu I Krasnikov, and PA Bagryansky. Dispersion interferometer for controlled fusion devices. *Review of scientific instruments*, 64(4):1010–1013, 1993. 6, 7

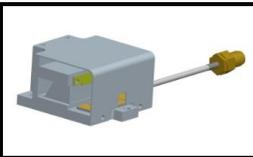
- [14] N. Apurv Chaitanya, A. Aadhi, S. Chaitanya Kumar, M. V. Jabir, G. K. Samanta, and M. Ebrahim-Zadeh. Frequency-Doubling of Femtosecond Pulses in “Thick” Nonlinear Crystals With Different Temporal and Spatial Walk-Off Parameters. *IEEE Photonics Journal*, 8(6):1–13, 2016. 6
- [15] Bengt Edlén. The Refractive Index of Air. *Metrologia*, 2(2):71–80, 1966. 8
- [16] Philip E Ciddor. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*, 35(9):1566–1573, Mar 1996. 8
- [17] Raise 3D Technologies Inc. Lernen Sie den E2 kennen - Ein Desktop-3D-Drucker von Raise3D. <https://www.raise3d.com/de/e2/>, 2024. Link entnommen am 21.05.2024. 10
- [18] Optosigma Europe SAS. 25.4-mm, top adjust mirror mount, clear edge aperture, stainless steel, rear-loading, 2 locking hex adjusters. [Hyperlink], 2024. Link entnommen am 16.04.2024. 10
- [19] Thorlabs Inc. KS05/M - Ø12.7 mm Precision Kinematic Mirror Mount, 3 Adjusters, M4 Taps. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KS05/M#ad-image-0>, 2000. Link entnommen am 16.04.2024. 10
- [20] Thorlabs Inc. HBSY12 - Ø1" Harmonic Beamsplitter, Reflects 532 nm, Transmits 1064 nm. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=HBSY12>, 2013. Link entnommen am 16.05.2024. 10, 12
- [21] Thorlabs Inc. HBSY11 - Ø1" Harmonic Beamsplitter, Reflects 1064 nm, Transmits 532 nm. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=HBSY11>, 2013. Link entnommen am 16.05.2024. 10, 12
- [22] Thorlabs Inc. NB05-K13 - Ø1/2" Nd:YAG Mirror, 532 nm and 1064 nm, 0° to 45° AOI. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=NB05-K13>, 2023. Link entnommen am 16.04.2024. 10, 11
- [23] Thorlabs Inc. KM05DL/M - Left-Handed Kinematic Mount for Ø1/2" D-Shaped Mirrors, M4 Taps. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KM05DL/M>, 2016. Link entnommen am 16.04.2024. 10
- [24] Thorlabs Inc. PFD05-03-P01 - Ø1/2" Protected Silver D-Shaped Mirror. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PFD05-03-P01>, 2007. Link entnommen am 16.04.2024. 10
- [25] Thorlabs Inc. KM05/M - Kinematic Mirror Mount for Ø1/2" Optics, M4 Taps. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KM05/M#ad-image-0>, 2000. Link entnommen am 16.04.2024. 10, 11
- [26] Optosigma Europe SAS. 25.4-mm, top adjust mirror mount, clear edge aperture, stainless steel, front-loading, 2 locking hex adjusters. [Hyperlink], 2024. Link entnommen am 16.04.2024. 11
- [27] Thorlabs Inc. BSW26 - Ø1" 50:50 UVFS Plate Beamsplitter, Coating: 350 - 1100 nm, t = 5.0 mm. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BSW26>, 2010. Link entnommen am 16.05.2024. 11

- [28] Thorlabs Inc. *PDA10A-EC - Si Fixed Gain Detector, 200-1100 nm, 150 MHz BW, 0.8 mm², M4 Taps*. Thorlabs Inc., September 2017. Link entnommen am 16.04.2024. 11
- [29] Thorlabs Inc. Beam Displacement Optics. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5952, 2024. Link entnommen am 17.05.2024. 12
- [30] Mikhail N. Polyanskiy. Refractiveindex.info database of optical constants. *Scientific Data*, 11(94), 2024. 12, 13
- [31] Isomet Corporation. Acousto-Optic Modulation. https://isomet.com/App-Manual_pdf/AO%20Modulation.pdf, 2014. Application Note für AN0510, Link entnommen am 03.05.2024. Auszug siehe Anhang. 13, 61
- [32] Thorlabs Inc. Ø1/2" Kinematic Mirror Mount. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1492&pn=KM05/M, 2024. Link entnommen am 13.03.2024. 13
- [33] Thorlabs Inc. Kinematic D-Shaped Mirror Mounts. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2700&pn=KM05DL/M, 2024. Link entnommen am 13.03.2024. 13
- [34] Bossard Holdin AG. *Tappex TRISERT 136/137/145*, 3 2024. BN 37915 - Gewindeeinsätze selbstschneidend ohne Kopf, für thermoplastische und glasfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe 35%, entnommen am 11.03.2024, 11:59 Uhr. 36
- [35] Thorlabs Inc. BC210CV/M - Compact CMOS Camera Beam Profiler. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BC210CV/M>, 2023. Link entnommen am 16.05.2024. 37
- [36] Verbatim PLA Filament 1.75mm 1kg - Black. <https://www.verbatim-europe.com/en/3d/products/verbatim-pla-filament-175mm-1kg-black-55318>. Teil-Nr. 55318. Link entnommen am 09.05.2024. 39
- [37] Johnathon Selstad. Line Fitting in 3D. <https://zalo.github.io/blog/line-fitting/>, Februar 2019. Link entnommen am 23.05.2024. 44

7 Anhang

A. Datenblatt AOM

CAOM-080-030-CQC-532&1064-AF-A03



Acousto-optic modulators (AOM) allow the intensity of light to be controlled and modulated at rates that far exceed mechanical shutters.

声光调制器 (AOM) 允许以远超过机械快门的速率来控制 and 调制光强。

Getting more information
进一步获得信息



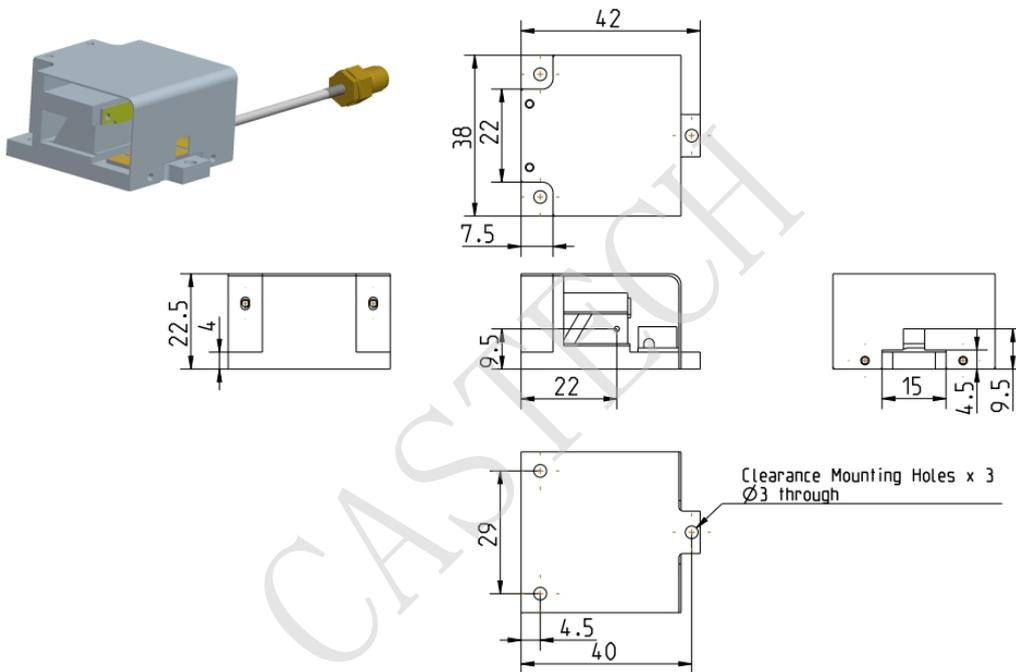
1. Specifications (规格)

Interaction material (介质材料)	Crystal quartz (石英)
Wavelength (光波长)	532&1064 nm
AR coating (AR膜反)	< 0.5% per surface
Transmission (透过率)	> 99%
RF frequency (射频频率)	80 MHz
Active aperture (有效孔径)	3.0 mm
Acoustic mode (声波模式)	Longitudinal (纵波)
Polarization (光偏振)	Linear, vertical to base (线偏振, 垂直基座)
Diffraction efficiency (衍射效率)	> 85%
Separation angle (分离角)	7.41mrad @532nm; 14.83mrad @1064 nm
RF power (射频功率)	20W (Max)
Input impedance (输入阻抗)	50 Ohms
VSWR (驻波比)	< 1.2:1
RF line length (射频线长度)	100 mm
RF line orientation (射频线方向)	Left, face up to the marking surface of S/N (左侧, 面向S/N打标面)
RF connector (射频接头)	SMA-F
Cooling (散热方式)	Conduction-cooled (传导散热)
Shell material (外壳材料)	Aluminum alloy 6063 (铝6063)
Storage temperature (存储温度)	-20~70 °C

2. Ordering Codes (编码规则)

CAOM	—080	—030	—CQ	C	—532&1064	—AF	—A03
RF frequency		Aperture	Material	Acoustic mode	Wavelength	RF connector	Housing
射频频率		有效孔径	介质材料	声波模式	光波长	射频接头	封装
	80MHz	3.0mm	Crystal quartz (石英)	Longitudinal (纵波)	532&1064nm	SMA-F	A03

3. Dimensions (外形尺寸-mm)

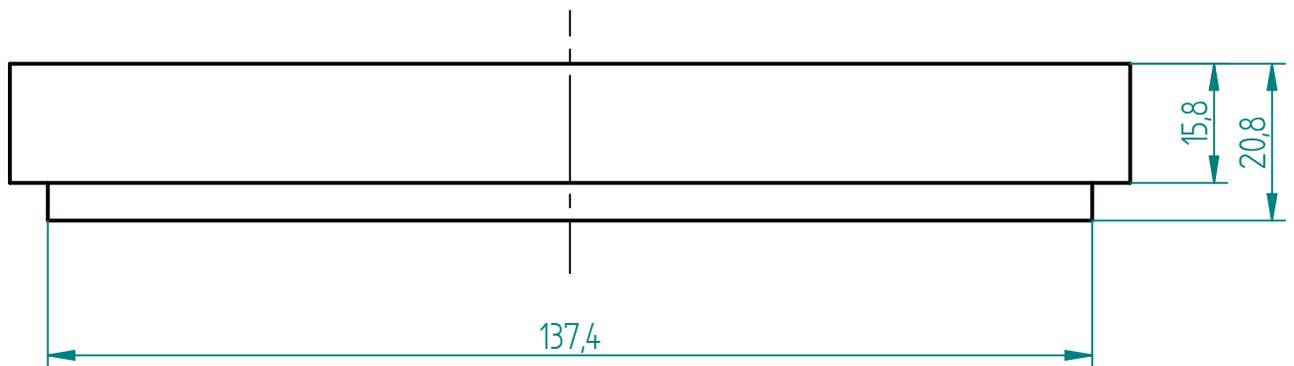
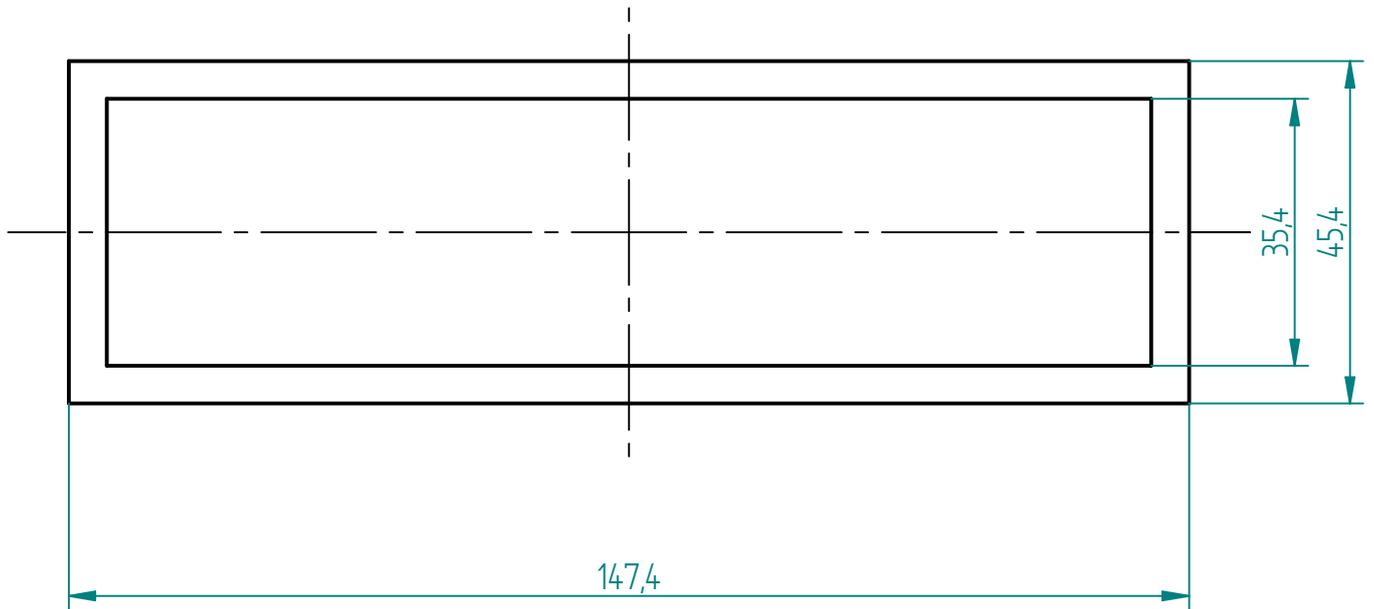


4. Version Informations (版本信息)

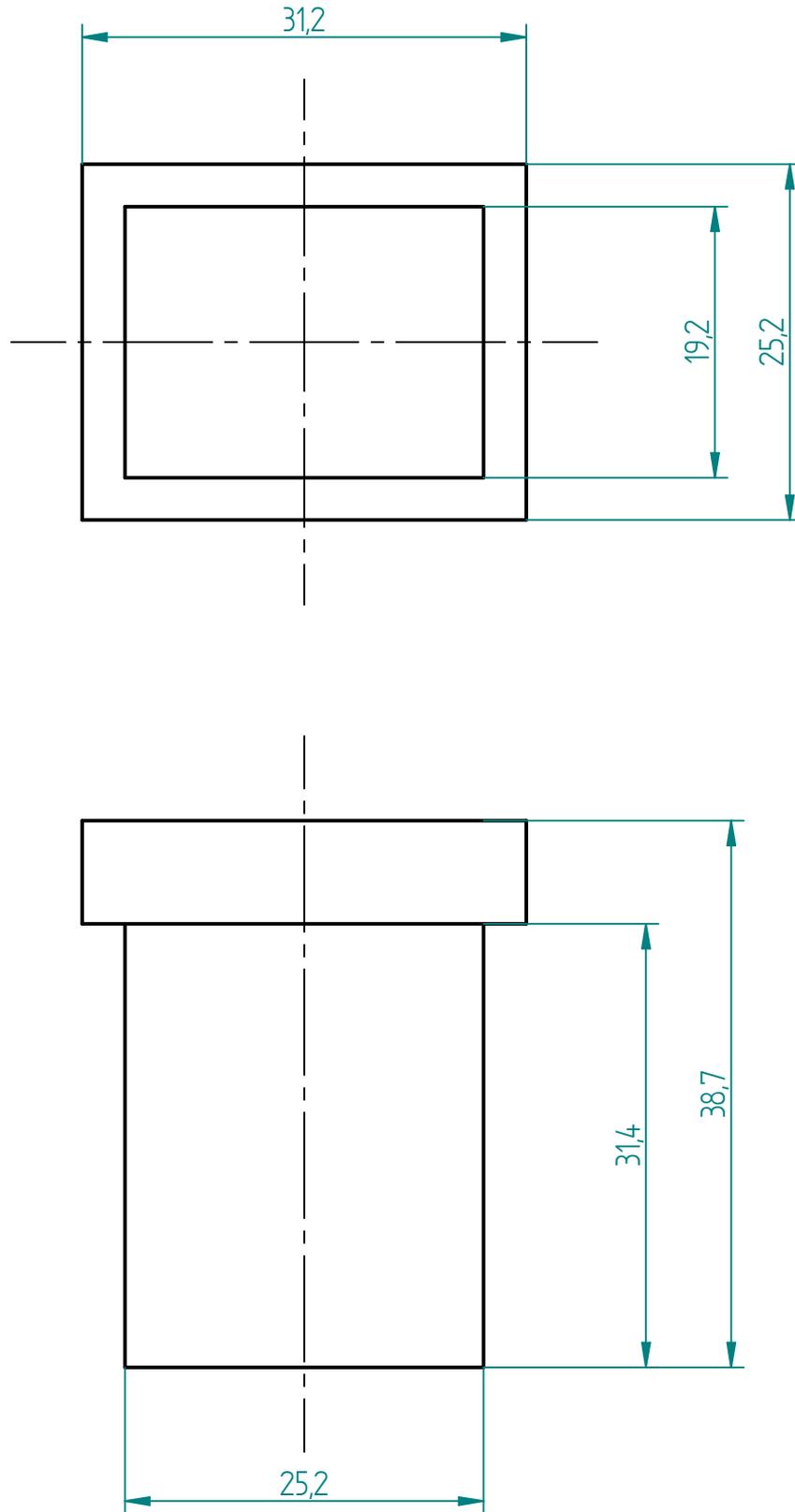
Number (编号)	Revision date (修订日期)	Revisions content (修订内容)
1.0	2023.08.18	/

CASTECH reserves the right to make changes to the products or information herein without notice.
(本公司保留更改本产品或资料之权利, 恕不另行通知。)

B. Technische Zeichnungen Metallkühlungen



Toleranz Klasse DIN ISO 2768-1 m DIN ISO 2768-2 K		Oberfläche 6,3 10,1		Projektion 		Kennzeichnung EN2851		Stückzahl 1		Werkstoff Aluminium	
Modell		Geändert		Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Technische Physik Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart				Bezeichnung Metallkühlung_Laser_1"BS		Revision	
Zeichnung		22.12.2023						Zeichnungsnummer 1.000			
Prüfung								Format DIN A4		Maßstab 2:1	
Diese Zeichnung ist Eigentum des DLR und darf ohne unsere Genehmigung weder kopiert, vervielfältigt, noch Dritten zugänglich gemacht werden.						Masse 0,351 kg					

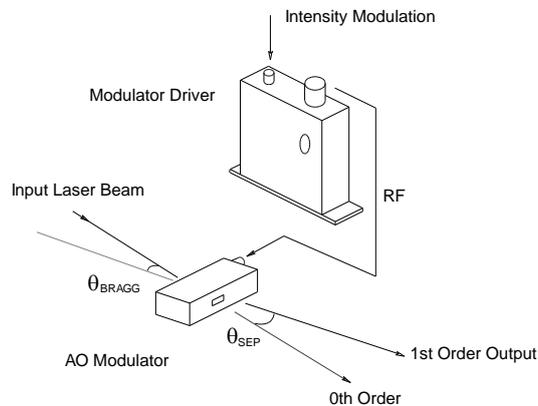


Toleranz Klasse DIN ISO 2768-1 m DIN ISO 2768-2 K		Oberfläche 6,3 10,1	Projektion 	Kennzeichnung EN2851	Stückzahl 1	Werkstoff Aluminium	
Modell	Bearbeiter jank_to	Geändert 18.12.2023	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Technische Physik Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart		Bezeichnung Metallkühlung_AOM_1"BS		Revision
Zeichnung	jank_to	18.12.2023			Zeichnungsnummer 1.000		
Prüfung					Format DIN A4	Maßstab 2:1	Blatt 1 / 1
Diese Zeichnung ist Eigentum des DLR und darf ohne unsere Genehmigung weder kopiert, vervielfältigt, noch Dritten zugänglich gemacht werden.							

C. AO Modulation (Auszug)

[31]

Basic Acousto Optic Modulator and Driver



Key Parameters:

Angles

The input Bragg angle is given by:

$$\theta_{Bragg} = \frac{\lambda \cdot f}{2 \cdot V}$$

This angle is in the plane of deflection and relative to a normal from the input optical surface. Except for certain AO devices with birefringent crystals, the laser beam can be input into either aperture and at + or - Bragg angle.

The output separation angle between the Zeroth order and First order is given by:

$$\theta_{sep} = \frac{\lambda \cdot f}{V}$$

where :

- f = RF frequency
- λ = wavelength
- V = acoustic velocity,
 - TeO2: 4.2mm/us
 - PbMoO4: 3.63mm/us
 - Quartz: 5.7mm/us
 - Ge: 5.5mm/us

Efficiency

Diffraction Efficiency (DE) is defined as the ratio of the output zero order beam (RF off) and the first order beam (RF on)

$$DE = \frac{I_{1st}}{I_{0th}}$$

In addition the device exhibits insertion losses (IL) due to absorption in the bulk material and losses at the A/R coated surfaces.

$$IL = 1 - \frac{I_{0th}}{I_{Laser}}$$

Total throughput efficiency is the combination of the above factors, DE x (1-IL) %