

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

Entwicklung und Untersuchung eines Temperaturkompensators für Faser Bragg-Gitter zur Anwendung in der Astronomie

Carlos Enrique Rodriguez Alvarez

Studiengang Maschinenbau

Matrikelnummer 0404324

Wissenschaftliche Betreuung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Klinge

Dr.-Ing. Dragan Marinković

Technische Universität Berlin

Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme

Institut für Mechanik

Dr. Aashia Rahman

Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)

Astroptonik (innoFSPEC)

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig ohne Hilfe Dritter und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die den benutzten Quellen und Hilfsmitteln unverändert oder sinngemäß entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Sofern generative KI-Tools verwendet wurden, habe ich Produktnamen, Hersteller, die jeweils verwendete Softwareversion und die jeweiligen Einsatzzwecke (z.B. sprachliche Überprüfung und Verbesserung der Texte, systematische Recherche) benannt. Ich verantworte die Auswahl, die Übernahme und sämtliche Ergebnisse des von mir verwendeten KI-generierten Outputs vollumfänglich selbst.

Die Satzung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der TU Berlin vom 8. März 2017.¹ habe ich zur Kenntnis genommen.

Ich erkläre weiterhin, dass ich die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe.

Berlin, 11. Dezember 2024

Unterschrift

¹<https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10000060/FSC/Promotion-Habilitation/Dokumente/Grundsaeetze-gute-wissenschaftliche-Praxis-2017.pdf>

Danksagung

An meine liebe Kristin:

Danke für Deine unglaublich große und bedingungslose Unterstützung und dein Vertrauen in diese Arbeit, dein Vertrauen ist eine große Energiequelle. Es war so schön zu sehen, dass du dich mit mir gefreut hast, als dieses Projekt immer größer wurde und mehr Ziele zu erreichen auftauchten. Danke, dass wir immer wieder Zeitfenster auf unserer Reise gefunden haben, um dieses Projekt voranzutreiben. Besonders dankbar bin ich dir, dass du mir trotz deiner Arbeit und Verantwortungen meine Sorgen zu Hause genommen hast und ich mich nur auf diese Arbeit konzentrieren konnte, danke für deine Gelassenheit. Es gibt nicht genug Worte, um dir für die große Unterstützung zu danken, die du mir nicht nur während der langen Zeit dieser Masterarbeit gegeben hast, sondern seit wir uns kennen. Danke Krisi.

A la familia Alvarez Botero:

muchas gracias por el apoyo incondicional, es indescriptible lo mucho que valoro el apoyo moral que toda la vida me han brindado, la certeza de que se siempre me respaldan sin importar la situación, lo que facilita y me ayuda a tomar todo tipo de decisiones teniendo la certeza de que no importe la consecuencia siempre estarán para mí.

An Dr. Hakan Önel:

Die positive Entwicklung und das Ergebnis dieser Arbeit ist nur möglich durch dein Engagement für das Projekt, danke, dass du es so unterstützt hast, wie du es getan hast. Danke, dass du mir das Gefühl gegeben hast, dass ich in dieser Arbeit nicht allein bin und ich immer die Sicherheit hatte, dass es immer eine Lösung geben wird, sowohl für die technischen Probleme als auch für andere Probleme, das hat die Motivation enorm gesteigert, die Qualität zu erreichen, die diese Masterarbeit erreicht hat.

Ich bin besonders dankbar für dein Vertrauen, sowie für die großartigen Tipps und die Einweisung in \LaTeX , die ich erhalten habe. Es ist eine neue Fähigkeit, die ich für mein zukünftiges Berufsleben dank deiner Lehre gewonnen habe. Ich kann gar nicht wörtlich genug ausdrücken, wie dankbar ich für deine enorme Unterstützung in den verschiedenen Aspekten bin, die ich vom ersten Tag bis heute von dir gehabt habe.

An Dr. Aashia Rahman:

Auch dir habe ich viel zu verdanken, ich habe unglaublich viel von dir gelernt, danke für deine immer gute Laune und die Geduld, mit der du mir die verschiedenen Grundkenntnisse beigebracht hast. Dieses Wissen wird mich mein ganzes Berufsleben begleiten und mich zu einem besseren Ingenieur machen. Vielen Dank für die Struktur und Genauigkeit, die du in das gesamte Arbeit eingebracht hast und für deine Bereitschaft, meine Fragen in kurzer Zeit zu beantworten, was dazu beigetragen hat, dass dieses Arbeit den Anforderungen erfüllt hat. Besonders geprägt hat mich deine Unterstützung bei meinem ersten wissenschaftlichen Vortrag.

An Karin Wolf und Reinhard Bensch für die Beratung bei der Ausdrucksweise während dieser Masterarbeit.

Besonderer Dank gilt allen meine Kolleginnen und Kollegen am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), die mich bei dieser Arbeit mit produktiven und konstruktiven Gespräche unterstützt haben, danke für die genialen Ideen und Tipps, die die Qualität dieser Arbeit enorm gesteigert haben.

Zusammenfassung

Die bodengebundene Nahinfrarot-Astronomie (NIR), wird durch Hydroxyl Emissionslinien (OH-Ausstrahlungen) aus der Erdatmosphäre stark beeinträchtigt. Diese OH-Linien haben eine um mehrere Größenordnungen höhere Intensität als das „wissenschaftliche Licht“ eines weit entfernten Objekts und tragen erheblich zum Streulicht innerhalb des Spektrographen bei, was die Messung der Signale von schwachen Galaxien oder Sternen äußerst schwierig macht.

Obwohl verschiedene Methoden zur OH-Unterdrückung eingesetzt werden, wie z. B. Masken mit hoher Dispersion, Rugate-Filter und holografische Filter, erwiesen sich diese aufgrund der Streueigenschaften der dispersiven Optik als ungeeignet für astronomische Anwendungen. Vor fast zwei Jahrzehnten wurde ein ungewöhnlicher Ansatz mit Faser-Bragg-Gittern (FBGs) erstmals im Instrument GNOSIS als Demonstrator für die OH-Unterdrückung mit einem bestehenden NIR-Spektrographen am Anglo-Australian Telescope (AAT) eingeführt.

FBG-Filter, die in der Lage sind, bestimmte Wellenlängen mit herausragender Präzision zu filtern, werden mit Hilfe von Phasenmasken- oder Interferometrietechiken in den Kern einer lichtempfindlichen optischen Faser mit einem UV-Laser von 244 nm eingeschrieben. Da FBGs sehr empfindlich auf Dehnungs- und Temperaturschwankungen reagieren, Die Anforderung ist, dass während der Beobachtungskampagnen alle Temperaturschwankungen auskompensiert werden. Dies stellen wir sicher, indem wir den Kompensator so bauen, dass er von 20° C bis -20° C funktioniert.

Während die physikalische Dehnung die Hauptrolle bei der Dehnungsempfindlichkeit eines FBGs spielt, bestimmen die thermooptischen Eigenschaften der optischen Faser die Empfindlichkeit des FBGs für eine Temperaturänderung maßgeblich.

Das Thema dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer temperaturkompensierenden Baugruppe für FBG-Filter, die bei Temperaturschwankungen eine positive oder negative Kraft auf die Glasfaser ausübt, um die temperaturbedingte Wellenlängenverschiebung zu kompensieren.

Abstract

Ground based near-infrared (NIR) astronomy is severely affected by the presence of the hydroxyl (OH) emission lines originating in the Earth's atmosphere. These OH lines are several orders higher in intensity than the science light from a distant object contributing significantly to the stray light inside the spectrograph, making the measurement of the signals from faint galaxies or stars extremely challenging.

Although various OH suppression methods are used for high dispersion masking (Rugate filters and holographic filters), these have proved inadequate for astronomical use due to the inherent scattering properties of dispersive optics. Almost two decades ago, an exceptional approach using Fibre Bragg Gratings (FBGs) was first introduced in the GNOSIS instrument as an OH suppression demonstrator with an existing NIR spectrograph at the Anglo-Australian Telescope (AAT).

FBG filters which have the capability of filtering specific wavelengths with outstanding precision, are inscribed inside the core of a photosensitive optical fiber with 244 nm UV laser by using phase mask or interferometry techniques. Given that FBGs are highly sensitive to strain and temperature variations, one important requirement is packaging the FBG filters in a such a way that the wavelength of the FBG filters remain aligned with the OH lines over a temperature range 20°C to -20°C . While physical elongation plays the major role in the strain sensitivity of an FBG, thermo-optic properties of the optical fiber majorly dictate the sensitivity of the FBG for a temperature change.

The topic of this master thesis is to develop a temperature compensating package for the FBG filters, wherein the variations in temperature will induce a strain (tensile or compressive) on the fiber to cancel the wavelength shift due to the temperature variations (decrease or increase in temperature with respect to the room temperature).

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Ausarbeitung und Aufbau der Masterarbeit	2
1.3. Technische Beschreibung der Randbedingungen und wichtige Fakten . .	2
2. Kurzer Überblick: Faser-Bragg-Gitter-Filter in der Astronomie	5
2.1. Infrarotstrahlung (IR)	5
2.2. Hydroxyl-Radikal Ausstrahlung (OH)	6
2.3. Glasfaser oder Lichtwellenleiter	7
2.3.1. Lichtempfindliche Monomode-Faser	9
2.4. Faser-Bragg-Gitter (FBG)	9
2.4.1. FBG Herstellung am AIP	10
3. FBG Temperaturkompensation und Stand der Technik	15
3.1. Spannungs- und Temperaturempfindlichkeit eines FBG	15
3.2. Athermalisierung eines verpackten FBG	16
3.3. Stand der Technik	17
4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen	21
4.1. Methodologie	21
4.2. Experimente	24
4.2.1. Untersuchung verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten	30
4.2.2. Bestimmung des Elastizitätsmoduls	33
4.2.3. Bestimmung der (FBG) Temperaturempfindlichkeit	35
4.2.4. Bestimmung der notwendige Vorspannung	37
4.2.5. Manuelle Temperaturkompensation des Faser-Bragg-Gitters . . .	39
4.3. Der neue Prüfstand	42
5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation	45
5.1. Mathematische Auslegung & Werkstoffauswahl	45
5.1.1. Bestimmung der Länge der Bauteile mittels Tabellenkalkulation .	47
5.2. Konzeptbeschreibung & 3D-Modellierung	48
5.2.1. 3D-Modellierung	49
5.3. FEM Simulation	56

6. Herstellung & Funktionsprüfung	73
6.1. Prototyp Herstellung	74
6.2. Prüfung der Funktionsweise des Prototyps	77
7. Veröffentlichungen, Diskussion, Zukünftige Arbeit und Fazit	83
7.1. Veröffentlichungen	83
7.1.1. Wissenschaftliche Artikel	83
7.1.2. Vorträge	84
7.1.3. Patentanmeldung	84
7.2. Diskussion	84
7.3. Zukünftige Arbeiten	85
7.4. Zusammenfassung	87
A. Datenblätter	XV
A.1. Datenblatt Glasfaser GF	XVI
A.2. Datenblatt UV Laser	XVII
B. Prüfstand Zeichnungen	XIX
B.1. Entwickelte Komponenten für den Experimentaufbau	XXI
B.2. Modernisierter Prüfstand	XXV
C. Fertigungszeichnungen	XXIX
C.1. Fertigung Zeichnung des Temperaturkompensators	XXXI
D. Messreihe Experiment	XLI
D.1. Messreihe verschiedene Versuche	XLII
E. Inhalt der Dateien auf der CD	XLIX
E.1. CD Inhalt	XLIX

Abbildungsverzeichnis

2.1. Emissionsspektrum OH	6
2.2. 2MASS Airglow Experiment	7
2.3. Aufbau eines Glasfaserkabels	8
2.4. Aufbau Mono- und Multimode Glasfaser	8
2.5. Monomode- und Multimode-Glasfasern	9
2.6. Funktions Prinzip Faser-Bragg-Gitter (FBG)	10
2.7. Fertigungsanlage im AIP	12
2.8. FBG-Herstellungsmasken	12
4.1. Entwicklungsmethodik	23
4.2. Prüfstand für verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten	31
4.3. Prüfstand zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls	34
4.4. Prüfstand zur Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit	36
4.5. Prüfstand zur Bestimmung der Vorspannung	38
4.6. Prüfstand zur Bestimmung des FBG Kompensations Wegs	40
4.7. Verwendete Prüfstand zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften	43
4.8. Modernisierter Prüfstand	44
5.1. Funktionsprinzip eines Temperaturkompensators für FBG	46
5.2. Grafische Darstellung der Tabellenkalkulation Parameter	47
5.3. Kalkulationstabelle	48
5.4. 3D Modell des Temperaturkompensators	49
5.5. Spannvorrichtung	50
5.6. Faserhalter	51
5.7. Winkelversteller	52
5.8. Sicherungskappe	53
5.9. Distanzscheiben	54
5.10. Abdeckung	54
5.11. Präzisionsdistanzscheiben	55
5.12. Haupt FEM-Modell	57
5.13. Lage des globalen Koordinatensystems	59
5.14. Verwendete Kontakte für das FEM Modell	60
5.15. FEM Netz	63
5.16. Vernetzung Präzisionsdistanzscheibe	64

Abbildungsverzeichnis

5.17. Vernetzung Klebstoff und Glasfaser	65
5.18. Vernetzung Klebstoff und Glasfaser 2 Klebestelle	66
5.19. Räumliche Fixierung	67
5.20. Simulation Vorspannung	68
5.21. Thermische Kondition	68
5.22. Ergebnis FEM Simulation	69
5.23. Automatisierte FEM-Analyse	71
6.1. Zusammenbau Temperaturkompensator	74
6.2. Überprüfung der Funktionsprinzip	78
6.3. Transmissionsspektrum eines temperaturkompensierten FBG	80
6.4. Vergleich der Transmissionsspektrum	81
7.1. Konzept zukünftige Temperaturkompensator	86

Tabellenverzeichnis

3.1. kommerziellen Lösungen für FBG Temperaturkompensatoren	19
4.1. Materialien und Geräte für die Experimente	25
4.7. Ergebnisse Messzyklen zur Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit	37
4.8. Ergebnisse einer Messreihe Bestimmung des Zug- oder Entspannungswegs	42
5.1. In der FEM-Simulation verwendete Werkstoffeigenschaften	58
5.2. FEM Verbindungen	61
5.4. Ausgewählte End-Material und Länge	70
6.1. Gefertigte Bauteile	75

Kapitel 1

Einführung

In diesem Kapitel werden die Aspekte von Faser-Bragg-Gittern, ihre physikalischen Fähigkeiten bei der Verarbeitung von Licht und ihre Anwendung in der Astronomie vorgestellt. Die Motivation für diese Arbeit, die Ausarbeitung und Gliederung dieser Masterarbeit werden ebenfalls in diesem Kapitel ausführlich beschrieben.

1.1. Motivation

Ein wichtiges Gebiet der Astronomie ist die Erforschung astronomischer Objekte im Infrarotbereich, für die unter anderem mit Hilfe der bodengebundenen Astronomie (Teleskope) Licht z.B. von Galaxien oder Sternen gesammelt und untersucht wird. Das Licht weit entfernter astronomischer Objekte wird von Teleskopen gesammelt und mit Lichtdetektoren untersucht. Zwischen den Teleskopen und den astronomischen Objekten liegt die Erdatmosphäre. In der Erdatmosphäre finden chemische Reaktionen statt, bei denen auch Licht im Infrarotbereich emittiert wird. Licht aus beiden Quellen trifft auf das Teleskop und diese sogenannten OH-Emissionen sind als Kontamination des untersuchten Strahlungsspektrums zu verstehen. Wie das 2MASS Airglow Experiment [9] zeigt, haben die OH-Strahlen eine konstante Wellenlänge, aber unterschiedliche Intensitäten.

Die Filterung dieser Lichtverschmutzung durch Faser-Bragg-Gitter (FBG) ist ein Forschungsgebiet am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP). Bei diesem Verfahren wird der Brechungsindex des Kerns einer Glasfaser mit Hilfe eines UV-Lasers (siehe Datenblatt A.2) aperiodisch verändert. Diese Veränderungen werden als Gitterebenen bezeichnet, die mehrfach in den Glasfaserkern eingeschrieben werden. Durch diese Modifikation der wird das Lichtspektrum einer bestimmten Wellenlänge selektiv reflektiert, während das restliche Licht weitergeleitet wird.

Der effektive Brechungsindex des Kerns der optischen Faser und die Periodizität der Gitterebenen, d.h. der Abstand zwischen benachbarten index-modulierten Bereichen in der Faser, bestimmen die Bragg-Länge, d.h. eine bestimmte Wellenlänge, die vom Gitter reflektiert wird. Wenn sich die Temperatur ändert, treten verschiedene Effekte

1. Einführung

auf, die die Lichtfilterung beeinflussen. Die Effekte zeigen sich in den Änderungen der physikalischen Eigenschaften der Glasfaser, diese Änderungen und ihre Folgen im Faser-Bragg-Gitter(FBG), können mit Hilfe verschiedener Koeffizienten mathematisch beschrieben werden. Die eine wesentliche Rolle spielenden sich verändernden Koeffizienten sind der thermische Ausdehnungskoeffizient (α_f) und der thermooptische Koeffizient (ζ) wobei der letzte (ζ) den größten Einfluß auf die reflektierte Wellenlänge hat. FBGs werden in der Praxis in Infrarot-Teleskopen eingesetzt, bei denen die Betriebstemperatur zwischen -10°C und 35°C liegt.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines passiven Kompensatorsystems für eine 110 mm lange Glasfaser vom Typ GF1 des Herstellers Thorlabs GmbH (siehe Datenblatt A.1). Das System soll die Auswirkungen von Temperaturänderungen durch Zug und Entspannung der Glasfaser kompensieren. Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgt auch die Fertigung und Prüfung des Kompensators, bei dem die Toleranz der Über- oder Unterkompensation der reflektierten Wellenlänge unter 0,9 pm liegen darf.

1.2. Ausarbeitung und Aufbau der Masterarbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Im ersten Teil werden die für das Verständnis des Themas notwendigen Grundlagen und ein Überblick über den Stand der Technik gegeben. Dazu gehören die Ermittlung und Definition der physikalischen Ausgangsbedingungen, die für die mathematischen Berechnungen notwendig sind, die als Grundlage für die spätere Designphase dienen, die ebenfalls in diesen beiden Kapiteln beschrieben wird, sowie die Designstrategie und die Prototypenentwicklung mit verschiedenen „Engineering-Tools“.

Es folgt eine detaillierte Beschreibung der Herstellungsmethoden und Besonderheiten, sowie der verschiedenen erfolgreichen Tests, die mit dem ersten Prototyp durchgeführt wurden. Ein Fazit der gesamten Arbeit wurde gezogen, sowie die Weiterentwicklung und andere mögliche Anwendungen des Kompensators diskutiert. Am Ende dieser Masterarbeit sind die wissenschaftlichen Zwischenergebnisse wie wissenschaftliche Veröffentlichungen, Vorträge und Patentanmeldungen für den Temperaturkompensator in der Bibliographie zu finden.

1.3. Technische Beschreibung der Randbedingungen und wichtige Fakten

Im Kern einer Glasfaser mit einem Durchmesser von $125\ \mu\text{m}$ werden FBG beschriftet, d.h. der Brechungsindex des Glasfaserkerns wird an verschiedenen Stellen verändert, die Länge, in der diese Veränderungen stattfinden, beträgt 110 mm. Es handelt sich um eine Photoempfindliche Glasfaser vom Typ G1 der Firma Thorlabs (siehe Datenblatt A.1 auf Seite XVI). Die FBG reflektieren selektiv eine bestimmte Wellenlänge des Lichtes und lassen andere Wellenlängen durch, also es wird Licht filtriert. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der FBG kommt es bei Temperaturveränderungen zu einer falschen

1.3. Technische Beschreibung der Randbedingungen und wichtige Fakten

Flitrierung, die Temperaturveränderungen müssen mit einer Baugruppe mechanisch in einem Temperaturbereich von -10°C bis 35°C kompensiert werden.

Kapitel 2

Kurzer Überblick: Faser-Bragg-Gitter-Filter in der Astronomie

In diesem Kapitel werden verschiedene Grundlagen, Konzepte und physikalische Prinzipien erläutert, es wird die Funktionsweise von Glasfaser und FBG qualitativ und quantitativ erklärt. Abschließend wird erläutert, wie FBGs am AIP hergestellt werden und welche anderen ähnlichen Systeme zur Temperaturkompensation von FBGs verwendet werden.

2.1. Infrarotstrahlung (IR)

Infrarotstrahlung ist elektromagnetische Strahlung, deren Wellenlänge größer ist als die des optischen Teils des Spektrums. Längere Wellenlängen ermöglichen z.B. die Beobachtung durch Staub hindurch oder die Beobachtung sehr alter und weit entfernter Objekte (Doppler-Effekt). Die Wellenlängen befinden sich zwischen 780 nm und 1 mm. (Dies entspricht einem Frequenzbereich von 300 GHz bis 400 THz) [29]. Anwendungen finden sich in der Fernerkundung, der Thermografie, in Fernbedienungen und in andern Bereichen. Die Infrarotastronomie ist ein experimenteller Zweig der Astronomie, der die Infrarotstrahlung von astronomischen Objekten wie Sternen und Galaxien erforscht.

2.2. Hydroxyl-Radikal Ausstrahlung (OH)

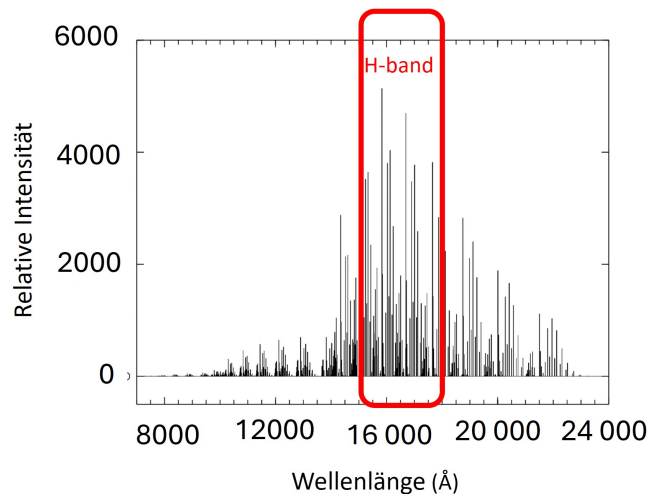


Abbildung 2.1.: Emissionsspektrum von Hydroxyl (OH) am Nachthimmel [7]

OH-Radikale entstehen durch eine chemische Reaktion zwischen Wasserstoffatomen und Ozonatomen in der Erdatmosphäre. Es handelt sich um eine Schicht mit einer Dicke zwischen 6 km und 10 km in einer Höhe von etwa 87 km [2]. Diese Ausstrahlung haben eine Wellenlänge zwischen 1 470 nm und 1 700 nm [13] in anderen Worten befinden sich im H-Band somit dominieren in der Nahinfrarotspektre (siehe Abbildung 2.1). Wie das 2MASS-Experiment [9] zeigt, sind die Wellenlängen konstant, die Strahlungsintensitäten jedoch nicht, sondern fluktuierend was die Filterung erschwert (siehe Abbildung 2.2). Für die bodengestützte Astronomie ist die Entfernung dieser Linien aus astronomischen Spektren ein wesentlicher Bestandteil der Verarbeitung von Nahinfrarot-Spektraldaten.

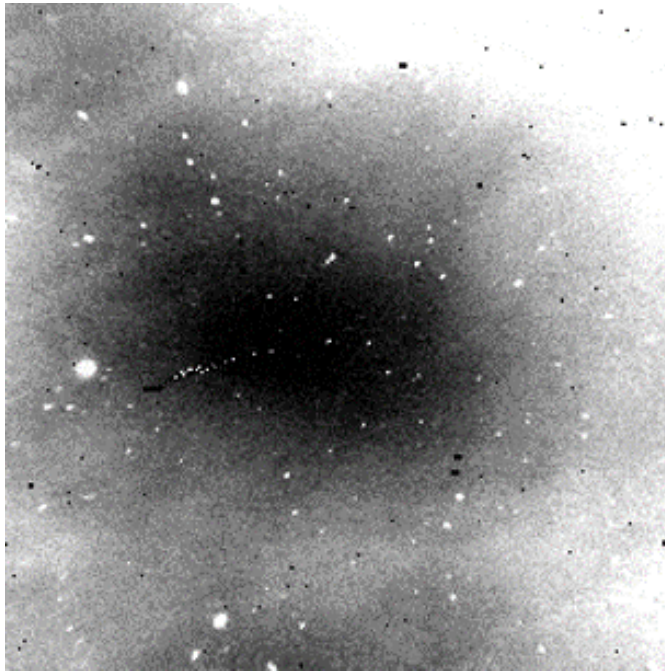


Abbildung 2.2.: Die Abbildung zeigt, dass die OH-Strahlungsintensitäten nicht konstant sind [9]

2.3. Glasfaser oder Lichtwellenleiter

Ein Lichtwellenleiter (LWL) ist eine lange, dünne Glasfaser zur Übertragung von Licht. Das Licht wird in Fasern aus Quarzglas oder Kunststoff (polymeroptische Faser) geführt. Aus physikalischer Sicht sind Lichtwellenleiter dielektrische Wellenleiter. Die Glasfasern sind meist kreisförmig und aus verschiedenen Schichten aufgebaut, wie die Abbildung 2.4 zeigt. Im Zentrum befindet sich der lichtführende Kern, der von einem Mantel mit etwas niedrigerem Brechungsindex und Schutzschichten aus Kunststoff umgeben ist. Je nach Anwendung hat der Kern einen Durchmesser von wenigen Mikrometern bis zu mehr als einem Millimeter. Man unterscheidet Lichtwellenleiter nach dem Verlauf des Brechungsindex zwischen Kern und Mantel (Stufenindex- oder Gradientenindexfasern) und nach der Anzahl der ausbreitungsfähigen Schwingungsmoden.

Lichtwellenleiter gibt es in zwei verschiedenen Arten: Multimode und Monomode siehe Abbildung 2.5, bei dem Kompensator wird eine Monomode Glasfaser montiert bzw. angewendet.

2. Kurzer Überblick: Faser-Bragg-Gitter-Filter in der Astronomie

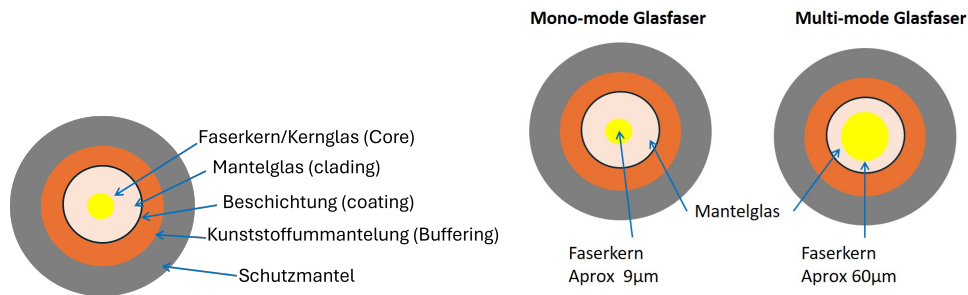


Abbildung 2.3.: Aufbau
Glasfaserkabels

Abbildung 2.4.: Grundsätzlicher Aufbau der Lichtwellenleiter Monomode und Multimode [19]

Beschreibung der Funktion der einzelnen Glasfaserkomponenten: Faserkern: transportiert das Licht, hat einen höheren Brechungsindex als das Mantelglas und je größer der Kerndurchmesser, desto mehr Licht kann transportiert werden. Mantelglas: begrenzt die Ausbreitung des Lichtes, hat einen geringeren Brechungsindex als der Faserkern, hat eine Totalreflexion und schickt das Licht in den Faserkern zurück.

Beschichtung: Schützt den Faserkern und die Ummantelung vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit, mechanischen Kräften usw. Die Beschichtung ermöglicht das Biegen der Glasfaser. Kunststoffummantelung: Schutz die Glasfaser gegen Druck und Spannung.

Schutzmantel: Schutz die Glasfaser gegen Druck und Spannung. (viel robuster als die Kunststoffummantelung)

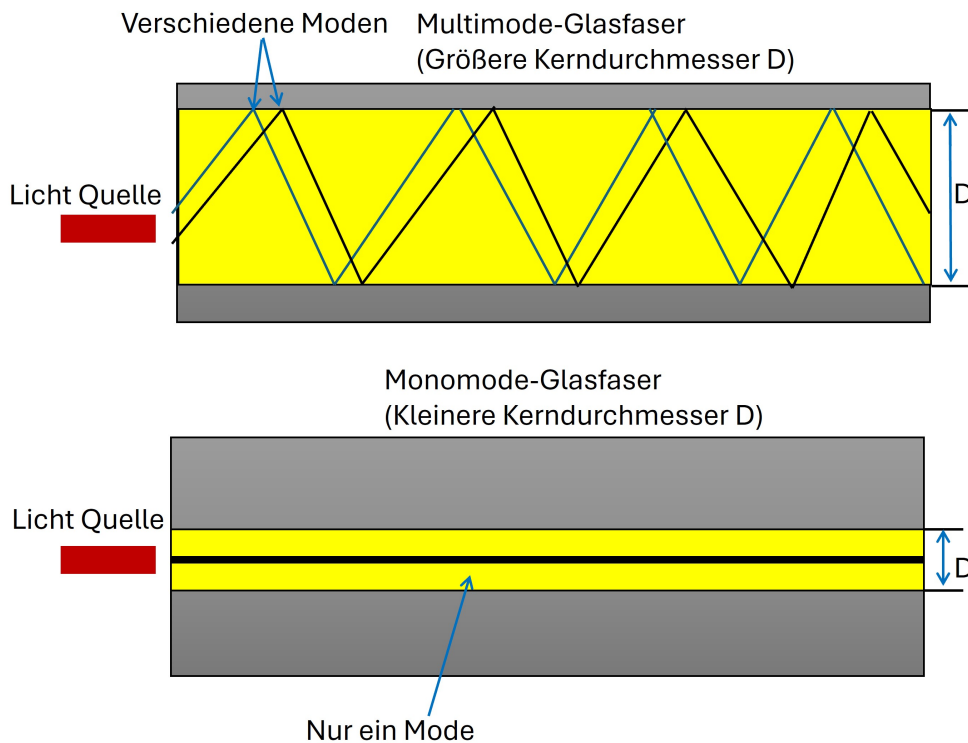


Abbildung 2.5.: Die Abbildung zeigt den Unterschied zwischen Monomode- und Multimode-Glasfasern.

2.3.1. Lichtempfindliche Monomode-Faser

Monomode Glasfasern haben normalerweise einen sehr kleinen Kerndurchmesser, aufgrund dieses kleinen Kerndurchmessers können sich nur die sogenannte Grundmode ausbreiten. Die Anzahl der auftretenden Moden hat einen Einfluss auf die Signalübertragung, da jede Mode einen unterschiedlich langen Lichtweg nimmt. Bei Multimode ist der Kern wesentlich größer als bei den Monomodefaser und deswegen können tausend Moden sich ausbreiten, die ein stark strukturiertes Strahlprofil aufweisen.

2.4. Faser-Bragg-Gitter (FBG)

In 1978 entdeckte K.O. Hill [1] eine dauerhafte Änderung des Brechungsindex einer mit Germanium dotierten optischen Faser, wenn sie mit ultraviolettem Licht bestrahlt wurde. Dieser veränderte Glasfaserkern wird Faser-Bragg-Gitter (FBG) genannt. Faser-Bragg-Gitter (FBG) ist eine periodische Mikrostruktur im Kern einer optischen Monomode-Faser, die eine präzise Wellenlänge selektiv reflektiert und somit wirkt als optischer Filter. Diese periodische Mikrostruktur wird durch Modulation des Kernbre-

2. Kurzer Überblick: Faser-Bragg-Gitter-Filter in der Astronomie

chungsindexes durch einen Hochleistungslaserstrahl erzeugt, dabei soll die optische Faser photoempfindlich sein. Durch die Modulation des Kernbrechungsindex wird das Licht zwischen den sich vorwärts ausbreitenden und den sich rückwärts ausbreitenden Moden gekoppelt, wie in Abbildung 2.6 beschrieben wird. Dabei ist die reflektierte Wellenlänge abhängig vom Abstand zwischen benachbarten Gitterebenen, der Abstand wird mit Λ beschrieben und als Gitterperiode bezeichnet, n ist der Brechungsindex, der von den Parametereinstellungen des Beschriftungssystems abhängt. In diesem Fall werden die FBG mit einem UV-Laser beschriftet, P_{I} ist die Eingangsleistung, P_{B} ist die reflektierte Leistung, was in diesem Fall das Rauschen oder die Lichtverschmutzung, P_{T} ist die Durchgangsleistung und λ ist die Wellenlänge des Lichts.

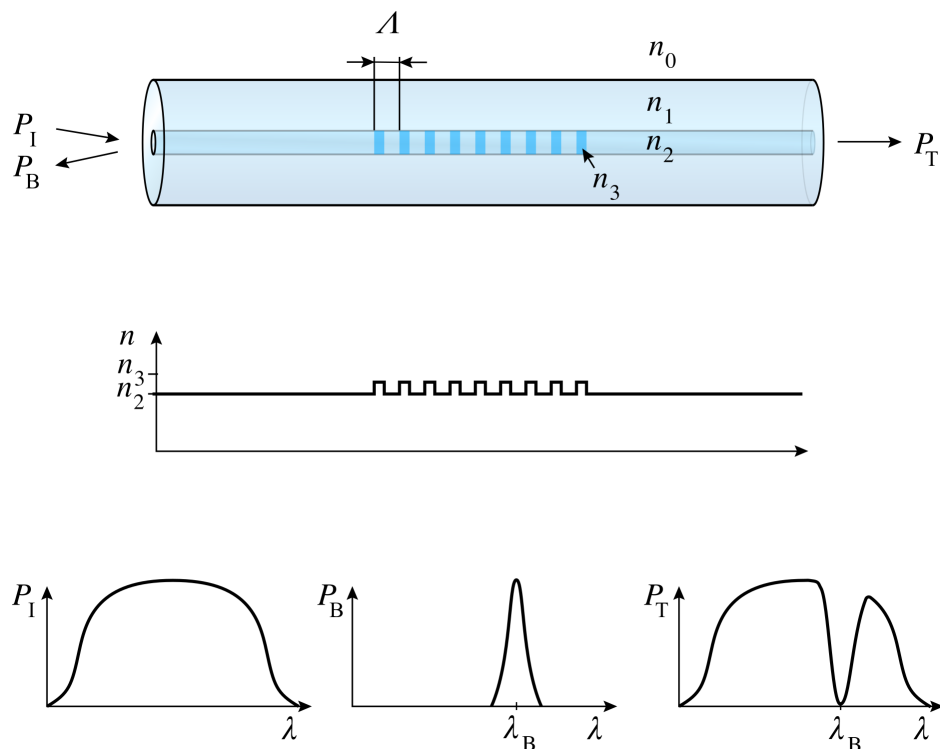


Abbildung 2.6.: Funktions Prinzip Faser-Bragg-Gitter (FBG)[36]

2.4.1. FBG Herstellung am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)

Am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) werden seit 2017 zwei der drei etablierten Technologien zur Herstellung von Faser-Bragg-Gittern für Forschungszwecke eingesetzt. (siehe Abbildung 2.7). In diesem Abschnitt wird zunächst das Faser-Bragg-Gitter-Herstellungsverfahren, das vor der Entwicklung des Temperatur-Kompensators verwendet wurde beschrieben. Zum Schluss wird genau das neue Herstellungsverfahren

ren erläutert, das nach der Entwicklung des Temperatur-Kompensators entstanden ist:

1. Mit einer Phasenmaske (Abbildung 2.8) mit einem periodischen Muster:
Die Phasenmaske wird mit einem starken UV-Laser beleuchtet, wobei sich der Brechungsindex des Faserkerns entsprechend dem Muster ändert (die Masterarbeit befasste sich mit dieser Art der FBG-Herstellung).
2. Ultrafast Laser Inscription (ULI)
basierend auf der direkten Beschriftung mit einem Femtosekundenlaser.
3. Talbot-Interferometrie
Einprägung von Faser-Bragg-Gitter bzw. FBG mit Laserstrahlen.
In der Talbot-Interferometrie wird die Lauflichtinterferometrie zur Beschriftung der FBGs verwendet, wobei wichtige Informationen aus der Phasenmaskenmethode in die Beschriftungsparameter einfließen.

Von diesen Methoden werden die ersten beiden für die Beschriftung von aperiodischen FBGs für astronomische Anwendungen weiterentwickelt.

Mit Phasemaske Zu 1:

Die Faser-Bragg-Gitter, mit denen sich diese Masterarbeit beschäftigt, werden mit einem UV-Laser des Herstellers Coherent beschriftet (siehe Datenblatt A.2 auf Seite XVII). Die Strahlung des Lasers wird mit verschiedenen Spiegeln und optomechanischen Elementen umgelenkt und mittels einer Kreislinse auf den Glasfaser fokussiert. Zwischen dem Glasfaser und der Kreislinse befindet sich eine sogenannte Maske (siehe Abbildung 2.8). Die Maske ist eine Glasplatte, die eine bestimmte und definierte Struktur hat. Diese Struktur definiert die Bragg Periode, genauer gesagt den Abstand zwischen Gitterebene und damit die Wellenlänge des Lichtes, das zurückreflektiert wird. Die Abstände zwischen Gitterebene zu einander können unterschiedlich sein und liegen im Picometer Bereich (siehe Abbildung 2.7).

2. Kurzer Überblick: Faser-Bragg-Gitter-Filter in der Astronomie

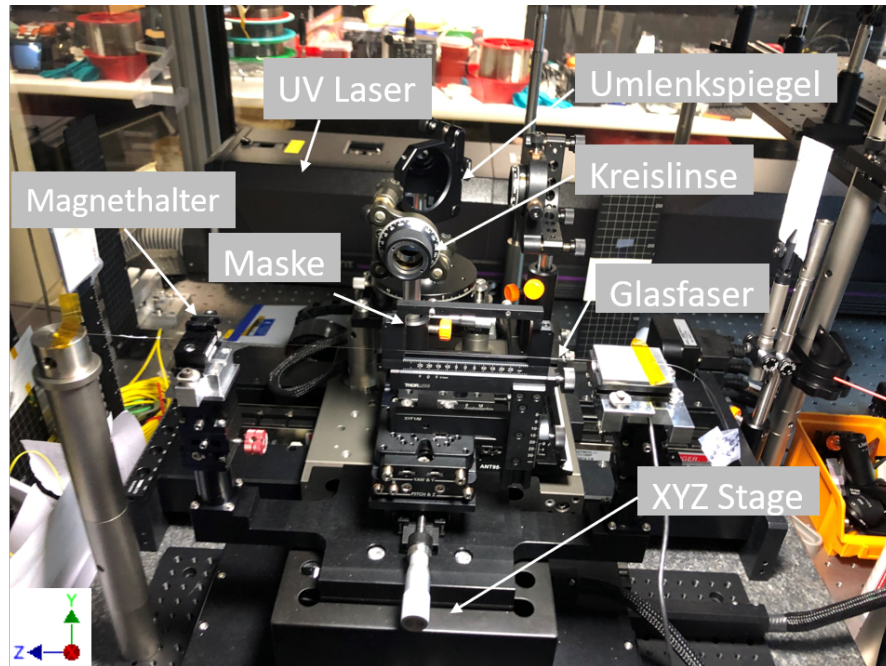


Abbildung 2.7.: Fertigungsanlage für aperiodische Faser-Bragg-Gitter mit Maskenverfahren am AIP

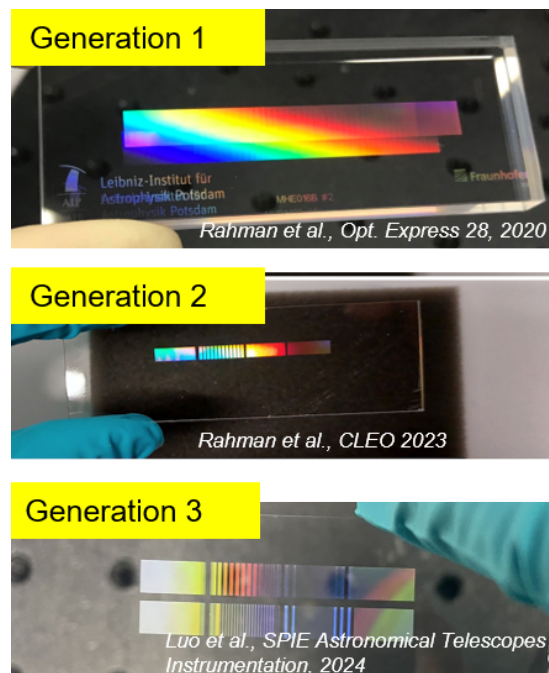


Abbildung 2.8.: Masken, die als Schablonen für die Erstellung von FGB am AIP verwendet werden

FBG Beschriftung vor Entwicklung des Temperaturkompensators: Die Glasfaser wird an zwei Punkten mittels Magnethalterung vorgespannt und fixiert, hier ist es wichtig zu betonen, dass zwischen den beiden Fixierungspunkten die Glasfaser keine Kunststoffummantelung und auch keine Beschichtung hat bzw. nur das Mantelglas und das Kernglas aufgestellt ist. Die beiden Befestigungspunkte haben einen Abstand von ca. 200 mm voneinander und sind mechanisch miteinander verbunden, so dass die gesamte Baugruppe auf einem hochpräzisen Linearmotor montiert ist und man die Glasfaser in Längsrichtung (Z) bewegen kann (siehe Abbildung 2.7), während die Bragg-Gitter geschrieben werden. Vorteil dieser Montage ist, dass sowohl die Maske als auch die Laserstrahlung statisch bleiben können und sich nur die Glasfaser bewegt.

An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass die Fokussierung des Laserspots auf die 125 μm Glasfaser äußerst anspruchsvoll ist, da die Positionierung der Glasfaser nicht perfekt ist und sich daher immer in einer Schiefelage befindet. Die Änderung des Brechungsindex in der Glasfaser durch den Laser ist aufgrund dieser Schrägstellung nicht über den gesamten Querschnitt zu 100 % homogen, was sich auf die reflektierte Wellenlänge und damit auf die Filterung auswirkt.

FBG Beschriftung mit den Optimierungen durch den Temperaturkompensator Obwohl das Faser-Bragg-Gitter-Verfahren keinen direkten Bezug zu dieser Masterarbeit und der Aufgabenstellung hat, wird am Ende der Entwicklung im Rahmen einer Toleranz- und einer Qualitätssicherungsanalyse mögliche Fehlerquellen identifiziert, die einen Einfluss auf die FBG-Kompensation haben könnten. Diese möglichen Fehlerquellen wurden analysiert und durch eine mechanische Modifikation der Form des Kompensatoraufbaus vermieden.

Das Ergebnis ist ein neues Beschriftungsverfahren, dabei ist die wichtigste Änderung die Öffnung von vier Fenstern im Kompensator: Zwei Öffnungen ermöglichen den Durchgang der Laserstrahlung und die Beschriftung der Faser mit dem Bragg-Gitter nach dem Verkleben und nach dem Anlegen der Vorspannung. Die anderen Öffnungen ermöglichen die genaue Erfassung der Lage der 125 μm dicken Glasfaser mit Hilfe eines Mikroskops oder einer hochauflösenden Kamera. Genauer gesagt, die Glasfaser wird in den Endzustand gebracht und danach werden die Bragg-Gitter beschriftet. So werden Fehler vermieden, die durch eine falsche Vorspannung entstehen können und erhöht die Wiederholbarkeit des Beschriftungsprozesses. Die Öffnungen können mit einer Kappe und einer Verschraubung wieder sicher verschlossen werden. Die Umsetzung dieser Design-Idee verbessert die Handhabung der FBG und erhöht die Produktsicherheit, da die FBG nicht manuell gehandhabt, eingefädelt, geklebt etc. werden muss. Stattdessen wird die Glasfaser beschriftet, wenn sie in das Endlager eingeklebt ist.

Kapitel 3

FBG Temperaturkompensation und Stand der Technik

In diesem Kapitel wird die Athermalisierung einer FBG innerhalb und außerhalb eines Temperaturkompensators mathematisch beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse einer Literatur und Internetrecherche vorgestellt, in der verschiedene Lösungen für die Temperaturkompensation von FBGs auf dem Markt vorgestellt werden.

3.1. Spannungs- und Temperaturempfindlichkeit eines FBG

Die Modulation im Brechungsindexkern koppelt das Licht zwischen den Vorwärts- und Rückwärtsmoden. Die Bragg-Wellenlänge eines Gitters, λ_B , ist die Wellenlänge, die bei der konstruktive Interferenz zwischen den entgegengesetzten Moden innerhalb der Gitterstruktur auftritt. λ_B wird durch die Bragg-Phasenanpassungsbedingung definiert [6].

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (3.1)$$

n_{eff} ist der effektive Brechungsindex des Faserkerns, und Λ ist der Abstand der Gitterränder, d.h. die Periodizität der Brechungsindexmodulation. Die relative Änderung der Bragg-Wellenlänge ist gegeben durch

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}. \quad (3.2)$$

Beide n_{eff} und Λ hängen von der Temperatur und der Dehnung ab, und die kombinierte Wirkung auf das FBG führt zu einer Wellenlängenverschiebung, die wie folgt angegeben wird

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \underbrace{\epsilon_x}_{1. \text{ Term}} - \underbrace{\frac{n_{\text{core}}^2}{2} [\epsilon_r (P_{11} + P_{12}) + P_{12}\epsilon_x]}_{2. \text{ Term}} + \underbrace{(\alpha_f + \zeta) \Delta T}_{3. \text{ Term}}, \quad (3.3)$$

3. FBG Temperaturkompensation und Stand der Technik

Die ϵ_x ist die Axialspannung, ϵ_r ist die Radialspannung, n_{core} ist der Brechungsindex des Faserkerns, in den das FBG eingeschrieben ist, α_f und ζ sind der Wärmeausdehnungskoeffizient und der thermooptische Koeffizient des Fasermaterials, $P_{11} \approx 0,113$, $P_{12} \approx 0,252$ sind die photoelastischen Konstanten von Siliziumdioxid und $\nu_s \approx 0,17$ ist die Querkontraktionszahl des Fasermaterials [3]. In Gl. (3.3), der erste Term bezeichnet die Änderungen der Streifenabstände durch ϵ_x , der zweite Term durch n_{core} bezieht sich auf photoelastische Änderungen des Brechungsindexes des Faserkerns, und der dritte Term beziehen sich auf die Änderung der Form und des Brechungsindexes des Fasermaterials bei Temperaturänderungen, ΔT . wenn die FBG axial gedehnt wird ϵ_r wird durch das Poisson-Gesetz wie folgt bestimmt:

$$\epsilon_r = -\nu_s \epsilon_x, \quad (3.4)$$

Für eine Germanosilikatfaser gilt, $n_{\text{core}} \approx 1.46$, $\zeta \approx 7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\alpha_f \approx 5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Unter Berücksichtigung von, $\nu_s \approx 0.17$ für Siliziumdioxid, ergibt sich die photoelastische Konstante, $p_e = (n_{\text{core}}^2/2)[P_{12} - \nu_s(P_{11} + P_{12})] \approx 0.22$. jetzt Gl. (3.3) kann wie folgt vereinfacht werden

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_x + (\alpha_f + \zeta)\Delta T \quad (3.5)$$

Gleichung (3.5) führt zu einer FBG-Dehnungsempfindlichkeit $\approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ und eine Temperaturempfindlichkeit von $\approx 10 \text{ pm}/\text{K}$ bei 1550 nm. Das Dehnungs- und Temperaturverhalten eines FBG wird nicht nur von Fasereigenschaften wie dem effektiven Brechungsindex, dem Elastizitätsmodul und der Querkontraktionszahl beeinflusst, sondern auch von Faktoren, die mit dem Herstellungsverfahren des FBG zusammenhängen [11, 12]. Es ist daher unbedingt erforderlich, die Dehnungs- und Temperaturempfindlichkeit der FBG, die man verwendet genau zu bewerten.

3.2. Athermalisierung eines verpackten FBG

Um eine passive Temperaturkompensation der Glasfaser mit FBG durch einen Temperaturkompensator oder eine athermische Baugruppe zu erreichen, ist es wichtig, das Verhalten des FBG innerhalb des Temperaturkompensators oder der athermischen Baugruppe zu berücksichtigen. Dieses Verhalten kann durch die Gleichung 3.6 beschrieben werden.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \xi\Delta T + \alpha_a\Delta T - p_e(\alpha_a - \alpha_f)\Delta T, \quad (3.6)$$

Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung (3.6) drückt den thermooptischen Effekt auf den Brechungsindex in der optischen Faser aus. Der zweite Term ist der Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) des athermischen Pakets (α_a), der das thermische Verhalten des Abstands zwischen den beiden Verankerungspunkten *A* und *B* charakterisiert, wie in Abbildung 5.1 dargestellt. Der letzte Term stellt die Auswirkung des Brechungsindexes aufgrund mechanischer Spannungen dar, die berücksichtigt werden

müssen, da die optische Faser mit einer gewissen Vorspannung montiert werden muss, damit sich diese Spannung bei einem Temperaturanstieg löst. Die Athermalisierung ist erreicht, wenn die rechte Seite von Gl. (3.6) z.B. gleich 0 ist:

$$\alpha_a = -\frac{\alpha_f p_e + \xi}{1 - p_e} \quad (3.7)$$

3.3. Stand der Technik

Volumenänderungen von Materialien aufgrund von Temperaturänderungen sind in mehrere technischen Bereichen und in optomechanischen Systemen von großer Bedeutung. Aus diesem Grund gibt es in der Forschung und auf dem Markt verschiedene Lösungen für optomechanische Systeme, z.B. Linsenhalter, bei denen der Brennpunkt durch Temperatur-Kompensatoren konstant gehalten werden kann, ohne dass Temperaturänderungen innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs eine Auswirkung haben.

Eine genaue Literaturrecherche hat gezeigt, dass es keine fertigen Kompensatoren für 100 mm lange Bragg-Gitter auf dem Markt gibt, es kann sich nur um Sonderanfertigungen handeln.


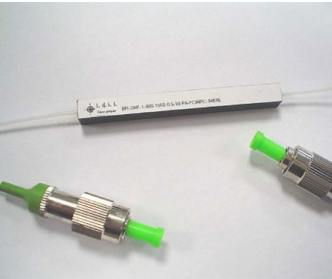
Yoffe *et al.* entwickelte einen Temperaturkompensator mit einer Länge von 50 mm unter Verwendung von zwei Materialien, Siliziumdioxid und Aluminium [4]. Ein FBG mit einer Länge von 2 cm zeigte eine Bragg-Wellenlängenverschiebung von 0,07 nm über einen Temperaturbereich von 100°C. Während Yan *et al.*, einen Temperaturkompensator für ein 1,5 cm FBG entwickelte, handelte es sich um ein asymmetrisches Gehäuse aus organischem Glas und Quarzglas. Mit diesem Kompensator zeigte das kompensierte FBG eine Wellenlängenverschiebung von 0,035 nm von -19°C bis 60°C, während das unkompensierte FBG eine Verschiebung von 0,79 nm über den gleichen Temperaturbereich [10] zeigte. Ein anderer Temperaturkompensator wurde von T. Iwashima *et al.* entwickelt, bei dem das FBG mit Epoxid auf ein flüssigkristallines Polymerrohr geklebt wird, was zu einer Temperaturkompensation der Bragg-Wellenlänge von 0,13 nm pro 100°C führte [5]. Ein anderer Temperaturkompensator wurde von Huang *et al* unter Verwendung von Cuprum und organischem Glas entwickelt, hier ergab sich eine Wellenlängenverschiebung von 0,028 nm über einen Temperaturbereich von -18°C bis 50°C [8].


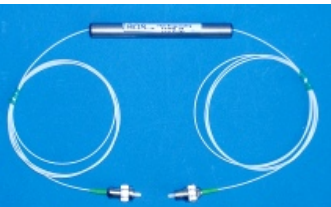
Die Beschriftungstechnologie zur Herstellung von FBG mit 10 sogenannte „Segmente“ ist noch nicht sehr weit entwickelt und findet bisher nur in der Forschung, hauptsächlich in der Astronomie Anwendung so dass es weltweit nur wenige Hersteller gibt. In der Industrie werden FBG als Temperatur-, Verformungs- oder Kraftsensoren eingesetzt, die auch temperaturkompensiert sein müssen, wobei die FBG nur 2 bis 5 Notches haben. Ein „segment“ kann bis zu 15 Bragg-Gitter haben, der Abstand zwischen den Gittern liegt im Pikometerbereich, während ein Segment eine Länge im Zentimeterbereich hat.

3. FBG Temperaturkompensation und Stand der Technik

In der folgenden Tabelle 3.1 sind die in der Literatur und im Internet recherchierten Temperaturkompensatoren aufgeführt, die auf dem Markt erhältlich sind.

Tabelle 3.1.: Ergebnisse der Recherche nach kommerziellen Lösungen für Faser-Bragg-Gitter-Temperaturkompensatoren.

Hersteller	Abbildung	Inkompatibilität	Quelle
At Grating Technologies		<ul style="list-style-type: none"> • Länge der zu verlegenden Glasfaser 46 mm zu kurz • Die Betriebswellenlänge liegt zwischen 1460 nm und 1610 nm. • Der Infrarotbereich, der gefiltert werden soll, hat eine Wellenlänge von 1590 nm bis 1800 nm. 	[37]
IDIL Fibres Optiques		<ul style="list-style-type: none"> • Die Betriebswellenlänge liegt zwischen 1000 nm und 1800 nm • Der Infrarotbereich, der gefiltert werden soll, hat eine Wellenlänge von 1590 nm bis 1800 nm • Das Datenblatt enthält keine Angaben zur thermischen Stabilität 	[31]

Hersteller	Abbildung	Inkompabilität	Quelle
Opelink		<ul style="list-style-type: none"> • Länge der zu verlegenden Glasfaser 55 mm zu kurz • Die Betriebswellenlänge liegt zwischen 1526 nm und 1565 nm Der Infrarotbereich, der gefiltert werden soll, hat eine Wellenlänge von 1590 nm bis 1800 nm • Das Datenblatt enthält keine Angaben zur thermischen Stabilität 	[30]
Advanced Optics Solutions GmbH		<ul style="list-style-type: none"> • Länge der zu verlegenden Glasfaser 55 mm zu kurz 	[17]

Kapitel 4

Methodologie und experimentelle Ermittlung der physikalischen Grundlagen

Diese Kapitel behandeln die Herangehensweise an das technische Problem, die Entwurfsmethodik und die Entwurfsstrategie sowie die Experiment Planung, Durchführung und Auswertung, um die physikalischen Eigenschaften der Glasfaser zu bestimmen und die physikalischen Randbedingungen als Grundlage für den Entwurf zu definieren.

4.1. Methodologie

Aufgrund des Mangels an genauen Informationen über die physikalischen Eigenschaften der zu kompensierenden Glasfaser und der hohen Anforderungen an die Genauigkeiten von der Temperaturkompensation, ist es notwendig alle physikalischen Eigenschaften zu untersuchen und zu charakterisieren, die bei der Temperaturkompensation eine Rolle spielen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Versuche geplant, aufgebaut, durchgeführt und ausgewertet. Im Abschnitt 4.2 werden alle durchgeführten Versuche aufgelistet und beschrieben. Folgende Versuche wurden durchgeführt:

1. Untersuchung der verschiedenen Arten der Befestigung der Glasfaser
2. Bestimmung des Elastizitätsmoduls der Glasfaser mit FBG
3. Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit des Glasfaserkerns
4. Bestimmung der notwendige Vorspannung
5. Manuelle Temperaturkompensation des Faser-Bragg-Gitters

Im Anschluss an die Versuche wurden die gesammelten Daten kritisch analysiert und ausgewertet; alle Informationen zur Planung, Durchführung und Auswertung aller Versuche sind im Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben. Die Auswertung diente als

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

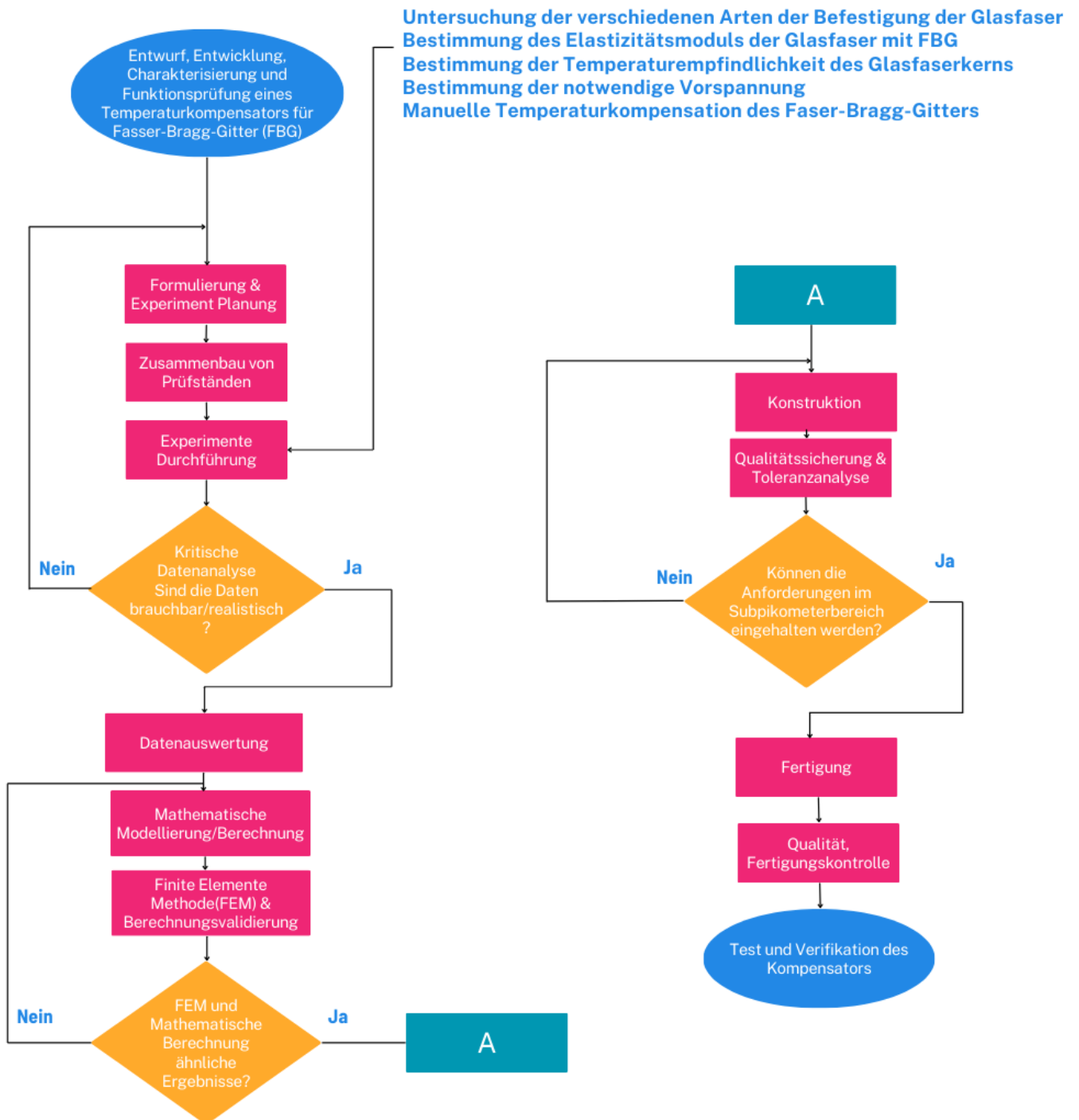
Grundlage für die ersten Entwurfsideen des Kompensators und die entsprechenden Berechnungen. Es wurden verschiedene Lösungskonzepte und Kompensatortypen entwickelt und deren Funktionalität kritisch analysiert, bewertet und beurteilt. Anschließend wurde die endgültige Form des Kompensators und seiner Komponenten ausgewählt.

Nachdem das Funktionsprinzip und die Form des Temperaturkompensators klar waren, war die entscheidende Frage, welche Materialien und welche Abmessungen in Längsrichtung die einzelnen Bauteile haben sollten, um eine Temperaturkompensation im Faser-Bragg-Gitter zu erreichen. Hierfür wurde eine Gleichung ersten Grades entwickelt (siehe Gl. 5.2), in die der Ausdehnungskoeffizient und die Länge jedes Bauteils eingesetzt werden konnten, eine Gleichung, mit der die gesamte Kombination aus Material, Länge und Temperaturänderung mathematisch abgebildet werden konnte. Die Gleichung hatte als einzige Unbekannte die gesuchte Länge des Bauteils „Winkelversteller“. Gleichzeitig ermöglicht sie einen Überblick über das Verhalten der verschiedenen Werkstoffe zueinander. Nach der Auswahl des Materials und der Länge aller Komponenten des Kompensators wurde der Kompensator mit dem CAD-Programm „Autodesk Inventor Professional 2024“ modelliert. Die Modellierung erfolgte im Hinblick auf die spätere FEM-Analyse, die mit dem Programm „Ansys Mechanical 2024 R2“ durchgeführt wurde und als Validierung für die ausgewählten Längen aller Komponenten und ihrer Materialien diente. Mehr zu den Berechnungsverfahren ist im Kapitel 5 dargestellt.

Im nächsten Schritt wurden die Zeichnungen unter Berücksichtigung der möglichen Fertigungsfehler und der notwendigen Qualitätskontrolle erstellt, wobei alle Parameter, die bei der Kompensation eine Rolle spielen und die Genauigkeit beeinflussen können, kritisch analysiert wurden; mehr dazu im Kapitel 5. Bei dieser Analyse wurde festgestellt, dass beim Verkleben der fertigen FBG sowie bei der Einstellung der Vorspannung die Wiederholgenauigkeit aufgrund menschlichen Fehlverhaltens nicht gewährleistet werden kann. Die dadurch mögliche Fehlerquelle der Über- oder Unterkompensation wurde dadurch beseitigt, dass der Kompensator so konstruiert wurde, dass nach dem Einkleben und Einspannen der Glasfaser in den Kompensator die FBG im Kompensator beschriftet werden kann. Mehr zur Konstruktion ist im Kapitel 5 dargestellt.

Nach der Herstellung der verschiedenen Komponenten wurde eine Qualitätskontrolle durchgeführt, bei der alle Komponenten nach 24 Stunden Akklimatisierung bei einer bestimmten Temperatur in Längsrichtung vermessen wurden. Anschließend wurden die Faser-Bragg-Gitter eingeklebt, zusammen mit den anderen Komponenten in den Kompensator integriert und im Labor unter verschiedenen Temperaturbedingungen getestet.

Abbildung 4.1.: Entwicklungsmethodik





4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen




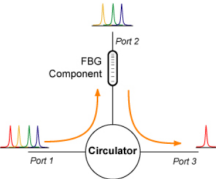
4.2. Experimente




In diesem Abschnitt werden die angewandte Versuchsmethodik sowie die einzelnen Versuche, die Planung, der Aufbau und die Auswertungen beschrieben, mit denen die Monomode-Glasfaser des Typs G1 des Herstellers Thorlabs untersucht wurde und bei denen die physikalischen Eigenschaften weiterer Parameter, die die thermische Kompensation beeinflussen, wie z. B. die erforderliche Glasfaservorspannung, der Ausdehnungskoeffizient der Glasfaser und die Befestigungsmöglichkeiten, charakterisiert und dokumentiert wurden.



Tabelle 4.1.: Notwendige Materialien und Geräte für die Experimente.

Versuchsmaterialien	Abbildung	Beschreibung	Quelle
U-Vorrichtung		<ul style="list-style-type: none"> Aluminium U - Vorrichtung 	Hergestellt am AIP
Linear Achse M-DS25-Z		<ul style="list-style-type: none"> Bereich 3 mm Belastbarkeit 22 N 	[23]
Kraftsensor KD34s-5N		<ul style="list-style-type: none"> Nennkraft $F_x = 500 \text{ mN}$ Genauigkeitsklasse 0,1 	[26]

Versuchsmaterialien	Abbildung	Beschreibung	Quelle
Lichtquelle		<ul style="list-style-type: none"> • Wellenlängenbereich 1 530 nm bis 1 610 nm • Spektrale Leistungsdichte: • > -18 dBm/nm bei 1 530 nm • > -11 dBm/nm bei 1 540 nm bis 1 600 nm • > -18 dBm/nm bei 1610 nm 	[38]
Confocaler confocalDT-IFS2405	sensor 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung max. 0,01 μm • Linearität max. 0,15 μm 	[28]

Versuchsmaterialien	Abbildung	Beschreibung	Quelle
Faserhalter HFF003		<ul style="list-style-type: none"> Die Spannkraft wird mit Hilfe eines Magneten erzeugt. 	[39]
Modifizierte Faserhalter HFF003		<ul style="list-style-type: none"> Die Spannkraft wird mit Hilfe eines Schrauben erzeugt. 	[39]
Faserhalter HFF003		<ul style="list-style-type: none"> Es wird als Schnittstelle für die Verklebung mit Akrylaten verwendet. 	[39]
Optische Zirkulator		<ul style="list-style-type: none"> Mittlere Wellenlänge von Wellenlängenbereich 1530 nm – 1610 nm 	[40]

Versuchsmaterialien	Abbildung	Beschreibung	Quelle
Präzisions-Digital-Messuhr Mitutoyo 543		<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung max. 0,01 mm • Genauigkeit 0,003 mm 	[35]
Spektrumanalysator AQ6375B		<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung 10 pm 	[24]
Heizplatte PTC1/M		<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturbereich von 5°C bis 45°C • Auflösung der Temperaturanzeige $\pm 0,001^\circ\text{C}$ • Temperaturstabilität 0.1°C. 	[41]

Versuchsmaterialien	Abbildung	Beschreibung	Quelle
Pattex Sekundenkleber		<ul style="list-style-type: none"> • Akrylatenkleber 	[22]
Standard Innensechskant-schlüssel		<ul style="list-style-type: none"> • Standard 	[18]

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

Alle Experimente wurden in einem klimatisierten Labor durchgeführt bei einer Umgebungstemperatur von $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Bei allen Experimenten, bei denen die Glasfaser mit Hilfe der Lineartische auseinandergezogen wird, werden die Lineartische so eingestellt, dass die Befestigungspunkte der Glasfaser in X- und Y-Richtung die gleiche Höhe und die gleiche Orientierung aufweisen, d.h. die Punkte sind auf der gleichen Achse. Dadurch wird verhindert, dass die Glasfaser schräg gezogen wird und das Experiment durch die bei Schrägstellung auftretenden Querkräfte gestört wird. Die Position in Y-Richtung wird optisch kontrolliert, die Höhe der beiden Befestigungspunkte bzw. die Position in X-Richtung wird mit einer Wasserwaage kontrolliert.

4.2.1. Untersuchung verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten für Glasfasern

Aufgrund des geringen Durchmessers der zu untersuchenden Glasfaser ($125\ \mu\text{m}$), was eine geringe Auflagefläche bedeutet, ist die Befestigung eine Herausforderung. Diese Befestigung spielt eine entscheidende Rolle, denn die Stabilität der Verbindung zwischen Glasfaser und Prüfstand sowie zwischen Glasfaser und Kompensator bestimmt nicht nur über die Lebensdauer des optischen Filters, sondern auch die Qualität der Temperaturkompensation und die Wiederholbarkeit der Vorspannung. Aus diesen Gründen wurden verschiedene Experimente mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt, um diese Verbindung zu untersuchen und eine Befestigungsmethode auszuwählen.

Prüfstand & Versuchsmaterialien (siehe Nummerierung gemäß Abb. 4.2)

- Glasfaser (1)
- Kraftsensor (2)
- Präzisions-Digitalmessuhr (3)
- Spektrumanalysator (4)
- Kraftsensor-Steuereinheit (5)
- Faserhalter HFF003 magnetisch (6A)
- Faserhalter HFF003 modifiziert mit Schraube (6B)
- Faserhalter mit V Nut als Klebefläche (6C)
- Lineartisch (7)
- U-Vorrichtung (8)
- Konfokalsensor
- Optischer Zirkulator
- Kraftsensor-Adapter (9)

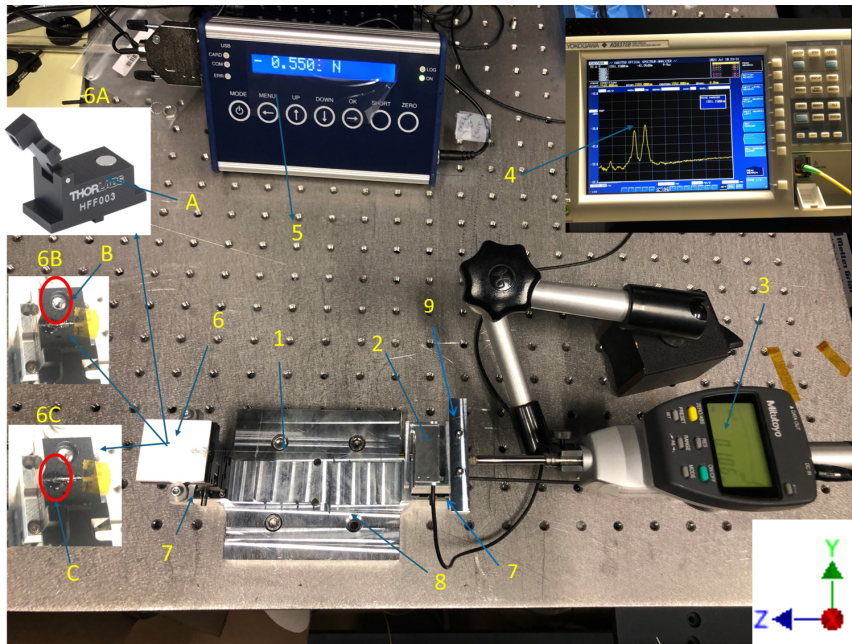


Abbildung 4.2.: Prüfstand zur Untersuchung der verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten von Glasfasern.

Versuchsablauf: Untersuchung der verschiedenen Befestigungsmöglichkeiten für Glasfasern

Die mit FBG beschriftete Glasfaser wird an zwei Punkten fixiert. Der Abstand zwischen den Klebepunkten bzw. die Länge der Glasfaser beträgt am Anfang der Experimente 98,85 mm. Diese Punkte werden mechanisch mit einer sogenannten U-Vorrichtung (8), (die normalerweise in der FBG-Beschriftung verwendet wird), verbunden und in gleicher Position in X- und Y-Richtung zueinander positioniert. Auf der linken Seite werden die zu untersuchenden Befestigungssysteme (6A, 6B, 6C) montiert, Auf der rechten Seite ist die Glasfaser mit einer Schraube verklebt, die mit dem Kraftsensor verschraubt ist.

Der Kraftsensor wird mit dem Adapter (9) am Gerät befestigt. Der Adapter (9) sowie die notwendige Schnittstelle zum Einkleben der Glasfaser in den Kraftsensor wurden konstruiert, gefertigt und montiert. Alle Zeichnungen befinden sich im Anhang (B.1 auf Seite XXI)

Die Glasfaser (1) wird über einen optischen Zirkulator an den Spektralanalysator angeschlossen, wo die Veränderung der Glasfaser in Längsrichtung (Z) mit einer Genauigkeit im Pikometerbereich gemessen werden kann. Gleichzeitig kann die Zugkraft, die auf die Glasfaser wirkt, mit dem Kraftsensor (2) gemessen werden und die Positionsänderung der Lineartische wird mit der Mitutoyo Messuhr (3) erfasst.

Die beiden Punkte werden voneinander ausgezogen, indem man einen der Lineartische (7) in 12 Schritten in (Z)-Richtung verschiebt. Bei jedem Schritt werden alle angezeigten

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

Werte (Wellenlänge des reflektierten Lichts, Zugkraft, Position, Veränderung der Linearität zur Ausgangsposition) dokumentiert. Im Experiment wird die Glasfaser auf 0,082 mm auseinandergezogen, dies entspricht einer Zugkraft von 0,4123 N. In dieser Position wird der Lineartisch mit der dafür vorgesehenen Schraube arretiert und gesichert. Die von FBG reflektierte Lichtwellenlänge beträgt 1549,0760 nm.

Das Experiment wird 24 Stunden lang beobachtet. Wenn nach 24 Stunden alle angezeigten Werte unverändert sind, gilt das Befestigungssystem als geeignet.

Die Versuche werden in zwei Konfigurationen durchgeführt, d.h. die erste Versuchsreihe wird mit der Parameter: Glasfaser **mit Schutzmantel** und die zweite Versuchsreihe mit der Glasfaser **ohne Schutzmantel** durchgeführt. Folgende Befestigungssysteme für Glasfasern werden getestet:

HFF003 - Quick-Release mit V-Nut: Hier wird die Glasfaser geklemmt und durch Reibungskraft gehalten. Die Reibungskraft ist das Produkt aus der Klemmkraft die der Magnet erzeugt und dem Reibungskoeffizienten des an dem Oberteil befestigten Gummis.

Ergebnisse mit und ohne Schutzmantel: Beide Versuche ergaben das gleiche Ergebnis: Die Glasfaser ist gerutscht und hat die Zugkraft von 0,4 N nicht gehalten.

Modifizierte HFF003 - Quick-Release mit V-Nut Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde der Magnet entfernt und ein M3 Gewinde in das Unterteil geschnitten. Die Glasfaser wird eingeklemmt und durch die Klemmkraft gehalten. Die Klemmkraft hängt vom Drehmoment ab, das man auf die M3 Schraube ausübt.

Ergebnisse mit Schutzmantel: Die Glasfaser ist gerutscht und hat die Zugkraft unter 0,4 N nicht gehalten. Bei höherem Drehmoment der Schraube ist die Glasfaser gebrochen.

Ergebnisse ohne Schutzmantel: Die Glasfaser ist gerutscht und hat die Zugkraft unter 0,4 N nicht gehalten. Bei höherem Drehmoment der Schraube ist die Glasfaser gebrochen.

Verklebung mit Alkylcyanacrylat auf HFF003 mit V-Nut Hier wird die Glasfaser mit dem Sekundenkleber Pattex der Firma Henkel auf den Halter geklebt, nach 24 Stunden Aushärtung des Klebers in Laborumgebung wird das Experiment durchgeführt.

Ergebnisse mit Schutzmantel: Die Glasfaser ist verrutscht und hat der Zugkraft von 0,4 N nicht standgehalten.

Ergebnisse mit Schutzmantel: Die Glasfaser hat ihre Position unter der Zugkraft von 0,4 N 24 Stunden lang gehalten. Die Befestigung gilt somit als geeignet.

Ergebnisse des Experiments:

Wenn die Glasfaser ohne Schutzmantel geklebt wird, hält sie eine Zugkraft von min 0,4 N. Es wird angenommen, dass der Kleber die Position 24 Stunden gehalten hat, hält er sie auch für längere Zeit. Es wurden minimale Veränderungen von weniger als 5% in den angezeigten Werten (Wellenlänge des reflektierten Lichts, Zugkraft, Position, Veränderung der Lineartische im Vergleich zur Ausgangsposition) beobachtet, was auf eine nicht konstante Umgebungstemperatur hinweist.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird das Kleben der Glasfaser als Befestigungsart gewählt. Diese Befestigungsart wird nicht nur in den kommenden Experimenten, sondern auch in der Endmontage des Kompensators verwendet.

4.2.2. Bestimmung des Elastizitätsmoduls (E-Modul) der Glasfaser mit FBG

An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass die Experimente bzw. E-Modul-Messung an der Glasfaser ohne Schutzmantel durchgeführt werden. Der Schutzmantel muss für die FBG-Beschriftung entfernt werden und wird daher im Temperaturkompensator ohne Schutzmantel montiert. Das Elastizitätsmodul, die Querkontraktionszahl und der Wärmeausdehnungskoeffizient sind die wichtigsten Größen für eine FEM-Simulation. Das typische Elastizitätsmodul von reinen Glasfasern liegt zwischen 70/,000 Mpa und 90/,000 Mpa. In unserem Fall benötigen wir eine genauere Angabe, um die Glasfaser im FEM-Programm Ansys 2024 R2 exakt simulieren zu können, daher wurde ein Prüfstand gebaut (siehe Abbildung 4.3) und versucht der Elastizitätsmodul zu messen. Hier wurde auch versucht, eine Änderung des Elastizitätsmoduls nach der FBG-Beschichtung zu untersuchen und nachzuweisen.

Prüfstand & Versuchsmaterialien(siehe Nummerierung gemäß Abb. 4.3)

- Glasfaser (1)
- Kraftsensor (2)
- U-Vorrichtung (3)
- Kraftsensor-Steuereinheit (5)
- Faserhalter als Klebefläche (6)
- Lineartisch (7)
- Konfokalsensor(8)
- Kraftsensor-Adapter(9)

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

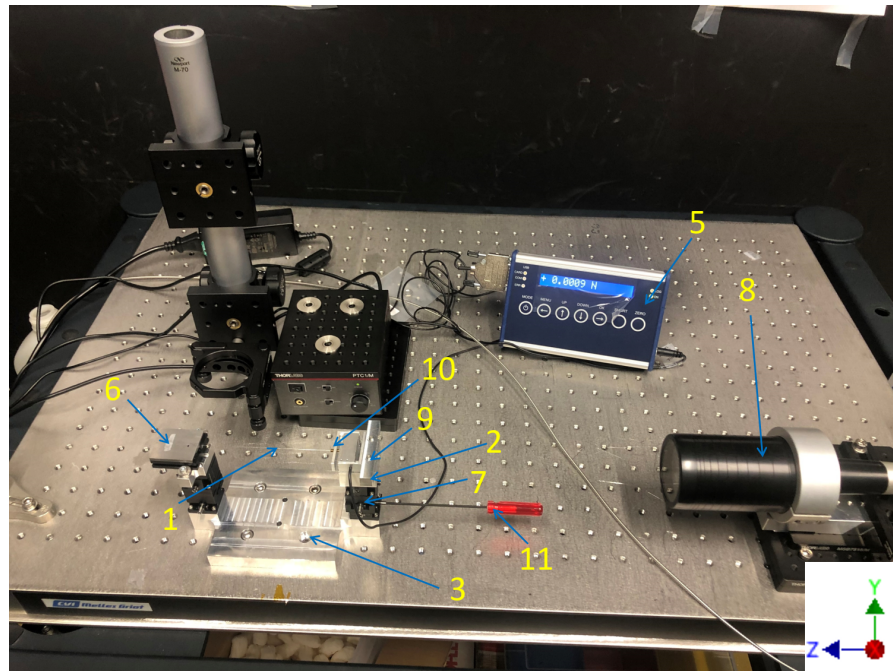


Abbildung 4.3.: Prüfstand zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls einer Monomode-Glasfaser nach FBG-Beschriftung.

Versuchsablauf: Bestimmung des Elastizitätsmoduls einer Monomode-Glasfaser nach FBG-Beschriftung

Der rechte Lineartisch (7) wird in Richtung der Glasfaserachse (Z) bewegt, so dass die Glasfaser auseinandergezogen wird. Diese Bewegung erfolgt in mehreren Schritten, wobei bei jedem Schritt die Verschiebung des Lineartisches mit dem konfokalen Sensor (8) gemessen wird. Die in der Glasfaser wirkende Kraft wird am Display des Sensor-Controllers (5) abgelesen.

Die Positionsänderung des Lineartisches (7) wird am Adapter (3) gemessen. Anfangs wird eine Messuhr von Mitutoyo verwendet, aber die ersten Bewegungen waren so klein, dass die Auflösung nicht ausreichte, um den zurückgelegten Weg zu messen. Um diese Messunsicherheit zu beseitigen, wird die Bewegung mit dem Konfokalsensor (8) gemessen.

Da der Durchmesser des Glasfaserkerns $125 \mu\text{m}$ bekannt ist, wird der Elastizitätsmodul aus dem Probenquerschnitt, den gesammelten Daten, dem Verfahrensweg des Lineartisches und der erzeugten Kraft berechnet.

Ergebnisse des Experiments

Für die Glasfaser GF1 des Herstellers Thorlabs wurde ein E-Modul von 29 000 Mpa gemessen. Nach einer kritischen Analyse der verschiedenen Werte und der Tatsache, dass

der gemessene Elastizitätsmodul um 58% kleiner ist als der in der Literatur [14] bekannte Elastizitätsmodul 70 000 Mpa, wurden die Ergebnisse als nicht realistisch eingestuft. Für die FEM-Analyse wurde ein Elastizitätsmodul von 12 000 Mpa für die Glasfaser verwendet, der Wert stammt aus der Werkstoffbibliothek Ansys 2024 R2. Der mögliche Fehler ist die Verformung des Kraftsensors, der offensichtlich nicht steif genug ist, um die Zugkraft ohne Verformung zu halten, wodurch der gemessene Weg länger ist als der tatsächliche.

4.2.3. Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit des Faser-Bragg-Gitter

Es ist bekannt, dass FBG sehr empfindlich auf Temperatur- und Spannungsänderungen reagieren, aufgrund dieser Eigenschaften werden FBG als Kraftsensoren und Temperatursensoren eingesetzt, aber wie genau sich die reflektierte Wellenlänge der am AIP hergestellten FBG bei einer Temperaturänderung ändert, wurde bisher nicht gemessen. Dazu wurde ein Experiment geplant und durchgeführt, das die Änderung der reflektierten Wellenlänge je nach Temperaturänderung in $\text{pm}/^\circ\text{C}$ liefert. Dieser Wert ist sehr wichtig, um z. B. den thermooptischen Koeffizienten oder auch die thermooptische Konstante dieser speziellen FBG zu erhalten, um damit die mathematische Modelle erstellen zu können.

Prüfstand & Versuchsmaterialien (siehe Nummerierung gemäß Abb. 4.4)

- Glasfaser (1)
- Faser-Bragg-Gitter (2)
- Heizplatte PTC1/M (3)
- Spektrumanalysator (4)
- Optischer Zirkulator
- Lichtquelle (5)
- Gewichte (6)

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

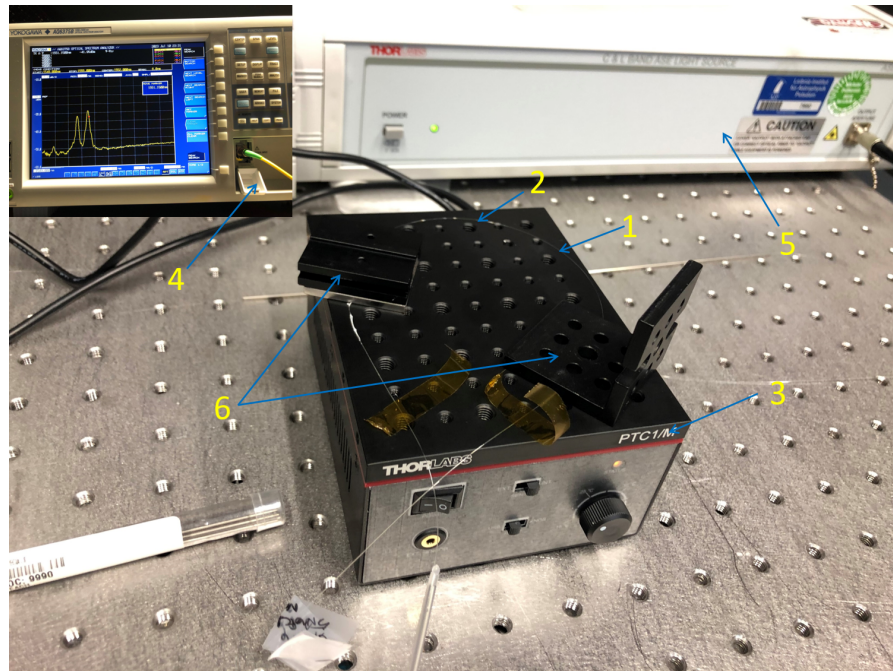


Abbildung 4.4.: Prüfstand zur Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit der am AIP hergestellten Faser-Bragg-Gitter.

Versuchsablauf Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit der am AIP hergestellten FBG

Die Glasfaser (1) mit dem beschriftet FBG (2) wird über einen optischen Zirkulator (3) an eine Lichtquelle (5) und einen Spektralanalysator (4) angeschlossen. Die Glasfaser wird auf die Heizplatte (3) gelegt und mittels der Gewichte (6) und der Klebewand wird sichergestellt, dass die Glasfaser dort, wo sich die FBG befindet, einen homogenen Kontakt mit der Heizplatte hat (siehe Abbildung 4.4).

Es wurden drei Messzyklen durchgeführt (von 25°C bis 40°C, von 22°C bis 10°C und von 7°C bis -4°C), wobei jeder Messzyklus aus mindestens 4 Messreihen bestand, bei denen die reflektierte Wellenlänge aufgenommen wurde (siehe Tabelle 4.7).

Tabelle 4.7.: Ergebnisse der drei Messzyklen zur Bestimmung der Temperaturempfindlichkeit des Faser-Bragg-Gitters.

Eingestellte Temperatur [°C]	Reflektierte Wellenlänge (λ) [nm]
Messzyklus 1	
25	1 551,0
28	1 551,03
31	1 551,06
34	1 551,09
37	1 551,12
40	1 551,15
Messzyklus 2	
22	1 550,97
19	1 550,95
16	1 550,92
13	1 550,89
10	1 550,86
Messzyklus 3	
7	1 550,91
4	1 551,0
1	1 551,05
-4	1 551,10

Ergebnisse des Experiments

Bei der photoempfindlichen Glasfaser vom Typ Gf1 des Herstellers Thorlabs wurde eine FBG mit einem UV-Laser beschriftet. Für diese FBG wurde eine Temperaturempfindlichkeit von $10\text{pm}/^\circ\text{C}$ gemessen.

4.2.4. Bestimmung der notwendige Vorspannung

Eine Vorspannung der Glasfaser ist für die Kompensation notwendig, wenn ein Temperaturanstieg auftritt, in diesem Moment muss der Temperaturkompensator die reflektierte Wellenlänge kompensieren, indem es die Glasfaser "zusammendrückt", genauer gesagt, durch Rückgabe der Länge, die durch die Vorspannung in der Glasfaser gespeichert ist, damit die eingestellte reflektierte Lichtwellenlänge wieder in ihre Position zurückkehrt. Ohne die Vorspannung der Glasfaser im Temperaturkompensator würde die Kompensation zu einer Durchbiegung der Glasfaser und damit zu einer ungewünschte Änderung des Abstands zwischen den Gitterebenen im FBG führen.

Aufgrund des optoelastischen Effekts ist diese Vorspannung auch kontraproduktiv und muss so gering wie möglich gehalten werden, wobei zu betonen ist, dass genau die gleiche Vorspannung erreicht werden muss, wie sie bei der FHG-Beschriftung im Temperaturkompensator verwendet wird. Nur so kann eine gute Lichtfilterung gewährleistet werden.

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

Prüfstand & Versuchsmaterialien (siehe Nummerierung gemäß Abb. 4.5)

- Glasfaser (1)
- Faser-Bragg-Gitter (2)
- Heizplatte PTC1/M (3)
- Spektrumanalysator (4)
- Optischer Zirkulator
- Lichtquelle (5)
- Faserhalter als Klebefläche (6)
- Lineartisch (7)
- Konfokalsensor (8)
- U-Vorrichtung (9)
- Schraubendreher (11)

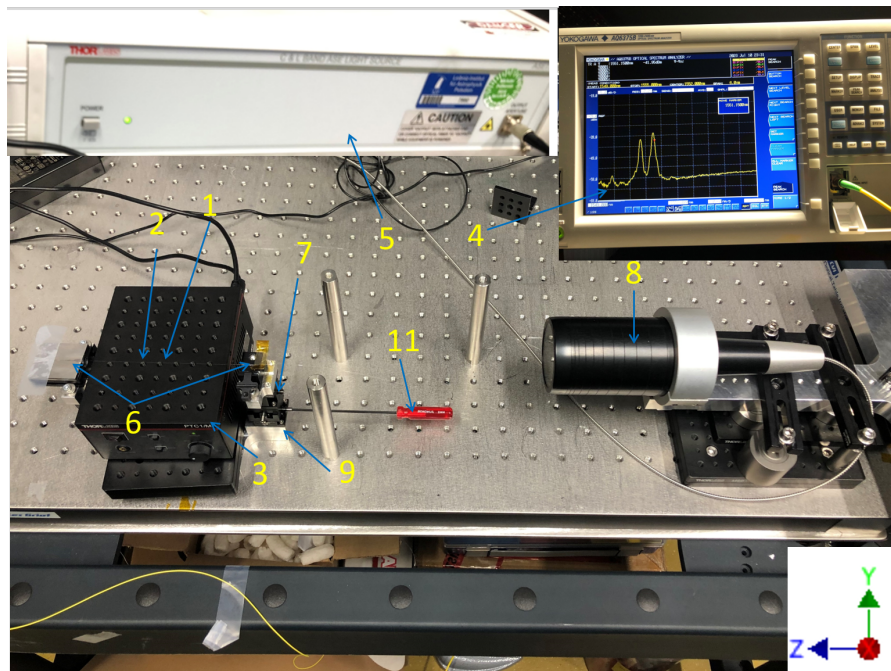


Abbildung 4.5.: Prüfstand zur Bestimmung der notwendige Vorspannung.

Versuchsablauf Bestimmung der Vorspannung

Die Glasfaser (1) mit dem beschrifteten FBG (2) wird an zwei Punkten verklebt (6) und nach dem Aushärten des Klebers (24 Stunden) wird über den optischen Zirkulator an der Lichtquelle (5) und dem Spektrumanalysator (4) angeschlossen.

Aus den Experimenten in Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 ist bekannt, dass die Glasfaser nicht weiter als 0,4 N gespannt werden darf; die Wellenlänge des reflektierten Lichts bei 0,4 N ist bekannt. Die Glasfaser wird gespannt, bis der Spektrumanalysator eine reflektierte Wellenlänge von (1 551 nm) anzeigt. Dann wird die Glasfaser durch die Heizplatte (8) auf 35°C erwärmt. Dann wird ein Linearschlitten in (Z)-Richtung zurückbewegt, bis die eingestellte Wellenlänge wieder auf dem Spektrumanalysator erscheint. Die Bewegung des linearen Tisches wird mit dem Konfokalsensor aufgezeichnet. Es wurde festgestellt, dass der Tisch nur 0,01628 nm bewegt wurde, um 35°C zu kompensieren. Das Experiment wird wiederholt, aber diesmal wird die Glasfaser nur um 0,55 mm auseinandergezogen, wieder auf 35°C erwärmt und mit dem Lineartisch entlastet. Der Versuch wird 10 Mal wiederholt.

Ergebnisse des Experiments:

Experimentell wird eine Vorstreckung von der Glasfaser von 0.02339 mm als geeignet bewertet, genau gesagt für die FBG-Beschriftung sowie bei der Montage der Glasfaser im Temperaturkompensator muss die Glasfaser um 0.02339 mm auseinandergezogen und damit vorgespannt werden.

4.2.5. Manuelle Temperaturkompensation des Faser-Bragg-Gitters

Das Ziel dieses Versuchs ist es, herauszufinden, wie groß die lange Änderung der Glasfaser sein muss, damit sie nach einer Temperaturänderung (abkühlen oder erwärmen) wieder die eingestellte Lichtwellenlänge reflektiert. Genauer gesagt, wie weit die Glasfaser auseinandergezogen oder entlastet werden muss, damit die eingestellte reflektierte Lichtwellenlänge nach einer Temperaturänderung wieder reflektiert wird.

Das Experiment wird sowohl mit kalter als auch mit heißer Last durchgeführt, um die Linearität nachzuweisen oder zu verwerfen: Bei Erwärmung der Glasfaser wird die Vorspannung in der Glasfaser entlastet, so dass die FBGs die gleiche Lichtwellenlänge reflektieren wie vor der Erwärmung eingestellt. Während der Abkühlung der Glasfaser wird die Vorspannung der Glasfaser abgebaut.

Die Ergebnisse dieser Experimente werden eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung des Temperaturkompensators spielen. Der daraus resultierende „Kompensationswert“ wird als Grundlage für alle Berechnungen und Simulationen dienen.

Prüfstand & Versuchsmaterialien (siehe Nummerierung gemäß Abb. 4.6)

- Glasfaser (1)
- Faser-Bragg-Gitter (2)

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

- Heizplatte PTC1/M (3)
- Spektrumanalysator (4)
- Optischer Zirkulator
- Lichtquelle(5)
- Lineartisch (7)
- Konfokalsensor(8)
- U-Vorrichtung (9)
- Schraubendreher(11)

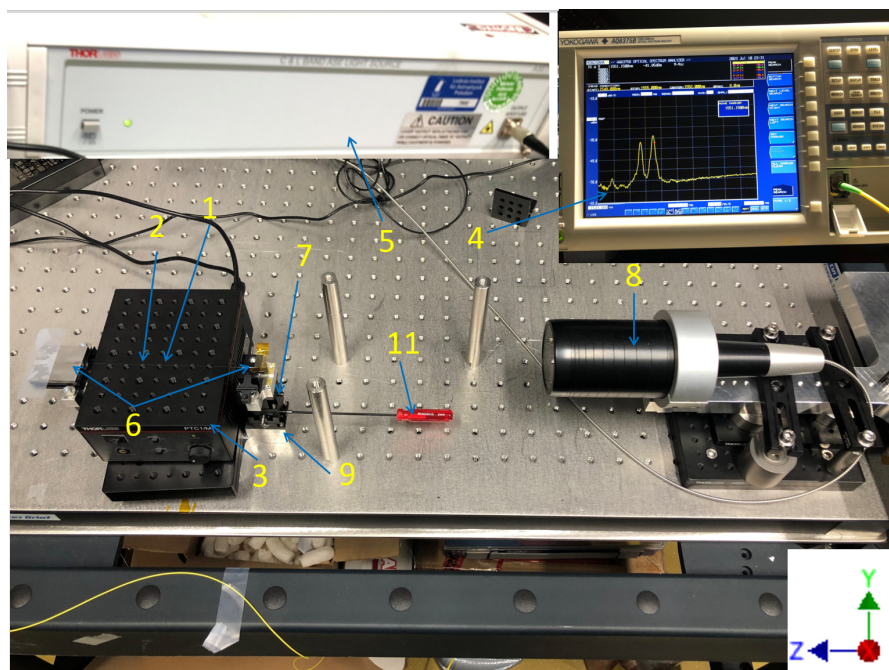


Abbildung 4.6.: Prüfstand zur Bestimmung des Kompensations Wegs des Faser-Bragg-Gitters.

Versuchsablauf FBG Manuelle Temperaturkompensation

Die Glasfaser (1) mit dem beschrifteten FBG (2) wird an zwei Punkten verklebt (6) und nach dem Aushärten des Klebers (24 Stunden) wird die Glasfaser mit der Lichtquelle (5) und dem Spektrumanalysator (4) über den optischen Zirkulator verbunden. Die Glasfaser wird vorgespannt, bis die erforderliche Länge der reflektierten Lichtwellen im Spektrumanalysator angezeigt wird, an dieser Stelle ist zu betonen, dass die Vorspannung der Glasfaser, die erreicht werden muss, die gleiche ist, die bei der Beschriftung

der FBG eingestellt wurde. Das Spannen der optischen Glasfaser erfolgt durch die Bewegung des Lineartisches (7) mit Hilfe des Schraubendrehers (11). (Siehe Teststand in Abbildung 4.6)

Nachdem die richtige Vorspannung eingestellt wird, wird das Glasfasser mit der Heizplatte (3) erwärmt oder abgekühlt, dabei ändert sich die reflektierte Wellenlänge, dann wird der Lineartisch in die Richtung bewegt, so dass die reflektierte Wellenlänge wieder in die Ausgangsposition zurückkehrt, die Bewegung des Tisches wird mit dem konfokalen Sensor (8) erfasst. Auf diese Weise konnte ermittelt werden, um wieviel Mikrometer die Glasfaser gezogen oder entlastet werden musste, um die durch die Temperaturänderung verursachten Effekte zu kompensieren.

Zuerst wird die FBG in fünf Stufen von 22°C auf 35°C aufgeheizt und in einer anderen Messung in 4 Stufen Abgekühlt von 32°C bis 22°C, nachdem sich die eingestellte Temperatur stabilisiert, wird der Lineartisch so lange bewegt, bis die erforderliche reflektierte Lichtwellenlänge auf dem Spektrumanalysator sichtbar ist. Dabei hat der Konfokalsensor die Positionsänderung des Lineartisches erfasst. Ein Beispiel für eine Messreihe ist in Tabelle 4.8 dargestellt. Die anderen Messreihen, bei denen die Ergebnisse sehr ähnlich sind und die Abweichung im Mikrometerbereich liegt, sind im Anhang zu finden. (Siehe D.1 auf Seite XLII)

Bei den verschiedenen Messreihen, bei denen die Entfernung, die Temperatur oder die Wellenlänge des reflektierten Lichts gemessen werden, werden die Änderungen in „großen“ Schritten vorgenommen. Auf diese Weise können die Messungen innerhalb der Auflösung der verschiedenen Messgeräte durchgeführt und die Messfehler besser abgeschätzt werden. Das Experiment wird in einem Temperaturbereich von -4°C bis 35°C durchgeführt.

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

Tabelle 4.8.: Ergebnisse einer Messreihe von sechs zur Bestimmung des Zug- oder Entspannungswegs der Glasfaser zur Kompensation der Temperaturänderung.

Erwärmung der Vorgespannte Glasfaser

Ausgangsbedingungen
Position des Lineartisches relativ zum Konfokalsensor: 16,66540 mm
Sollwert der reflektierten Wellenlänge: 1550,2680 nm
22°C

Pos. lineartisch[mm]	Temperature	Reflektierte Wellenlänge λ [nm] nach manueller Kompensation
16,66540	25°C	1 550,2680
Erwärmung auf 25°C		1 550,2960
Zugspannung wird reduziert		
16,67240	25°C	1 550,2680
Erwärmung auf 30°C		1 550,3200
Zugspannung wird reduziert		
16,67459	25°C	1 550,2680
Erwärmung auf 35°C		1 550,3240
Zugspannung wird reduziert		
16,67678	35°C	1 550,3240

Ergebnisse des Experiments

Bei der photoempfindlichen Glasfaser vom Typ Gf1 des Herstellers Thorlabs wurde eine FBG mit einem UV-Laser beschriftet. Um die reflektierte Wellenlänge dieser FBG nach einer Temperaturänderung von 1°C kompensieren zu können, muss die Glasfaser um 104086000 μm gestreckt oder entspannt werden. Der Wert wurde durch Mittelwertbildung aus mehreren Messreihen ermittelt. (Siehe Anhang D.1 auf Seite XLII). Eine Fehlerbetrachtung wurde nicht durchgeführt, da die Abweichungen im Mikrometerbereich liegen, dies würde nur zu einer genaueren Tolerierung der unterschiedlichen Bauteillängen führen, diese können in der ersten Phase oder beim Prototyp nicht genauer gefertigt werden.

4.3. Der neue Prüfstand

Wie aus den Tabellen 4.7 und 4.8 ersichtlich ist, stimmen die gemessenen Werte nicht immer genau überein, was zu Messfehlern führen kann. Nach einer kritischen Analyse aller Werte und einer kritischen Analyse der Teststände, wo die Experimente gemacht wurden, wurden mögliche Fehlerquellen identifiziert. Alle identifizierten Fehlerquellen beeinflussen die mechanische Stabilität des Prüfstands und damit die Messgenauigkeit. Ob die mechanischen Instabilitäten die Fehlerquelle für die geringen Messabweichungen sind, kann nur durch eine Wiederholung aller Experimente mit dem neuen Prüf-

stand bestätigt werden. Mit dem neuen Prüfstand könnten genauere Messungen durchgeführt werden mit dem Ziel, eine neue Dimensionierung der verschiedenen Kompensatorbauteile zu berechnen oder die Toleranzen nur in eine Richtung (Übermaß oder Untermaß) zu definieren.

Mögliche Ursachen für Messunsicherheiten Wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, besteht die Grundstruktur des Prüfstandes aus dem gleichen Komponenten des Aufbaus für die FBG-Beschriftung verwendet wird. Der Prüfstand verfügt über fünf Lineartische (2) und (3), die eine genaue Einstellung der Position der Glasfaser erlauben, aber für die verschiedenen Experimente sind diese Einstellungen nicht notwendig und können von Anfang an fest definiert werden. Die Lineartische sind untereinander und mit der Grundplatte mit M3 Schrauben (1) verschraubt, insgesamt sind es 24 Schraubenverbindungen, die zu Instabilitäten führen können. Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Verhältnis zwischen Höhe und Breite der beiden Säulen (4), die in der Höhe (Y) etwa 5 mal länger sind als in der Breite (Z) und in der Tiefe (X).

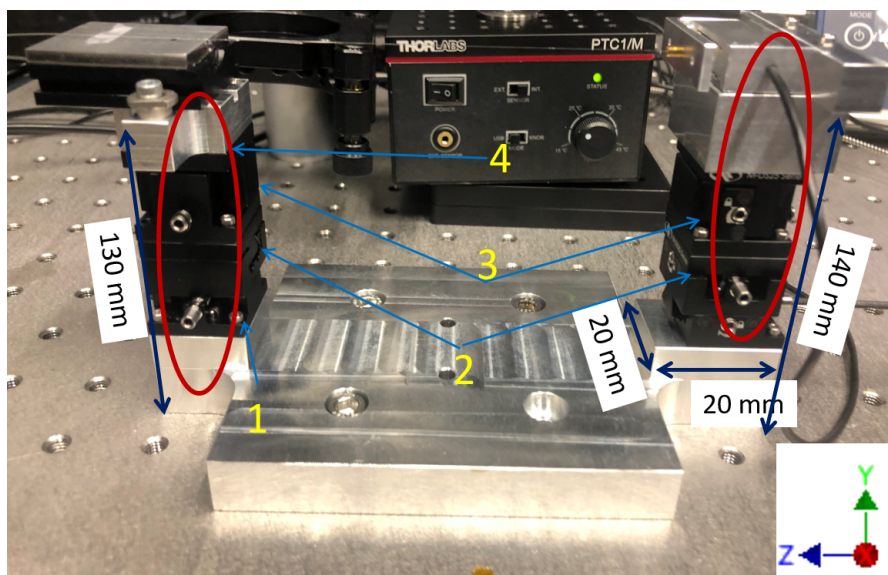


Abbildung 4.7.: Verwendete Prüfstand zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von Glasfasern des Typs GF1 mit FBG-Beschriftung.

4. Methodologie und Ermittlung der physikalischen Grundlagen

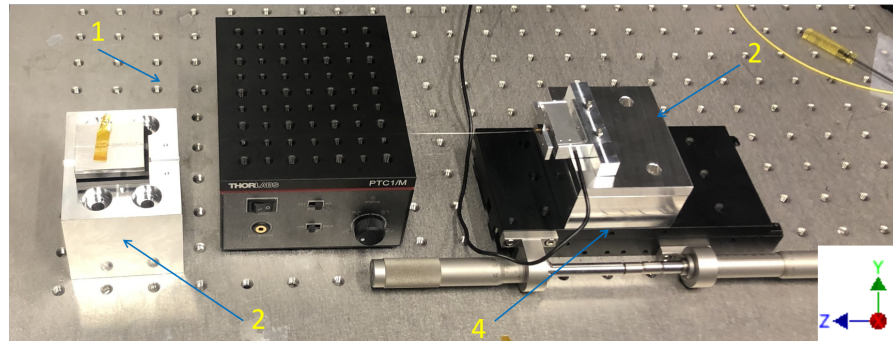


Abbildung 4.8.: Neuer und modernisierter Prüfstand zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von Glasfasern des Typs GF1 mit FBG-Beschichtung.

Der neue Prüfstand (siehe Abbildung 4.8) wurde mechanisch stabil konstruiert, er verwendet nur einen linearen Tisch (4) in (Z)-Richtung, die Schnittstellen zu den Faserhaltern (2) sind etwa so breit wie hoch, was zu einem tieferen Schwerpunkt der Komponenten auf beiden Seiten im Vergleich zum verwendeten Prüfstand führt. Die Glasfaser wird an zwei Punkten auf den Faserhalter geklebt; von unten gesehen gibt es nur eine Komponente zwischen dem Glasfaserhalter und der Grundplatte (1), die die beiden Seitenteile verbindet. Dieses Bauteil wird mit einer M6-Schraube auf die Grundplatte (1) geschraubt und bildet eine stabile Verbindung.

Der neue Prüfstand wurde im Rahmen dieser Masterarbeit konzipiert und entwickelt, die Zeichnungen der einzelnen Komponenten sind im Anhang zu finden. (Siehe Zeichnung B.2 auf Seite XXV)

Kapitel 5

Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

In diesem Kapitel wird explizit erklärt, wie der thermische Kompensator entwickelt und welche Entwurfsstrategie verwendet wurden, sowie welche Berechnungen in der Entwurfsphase durchgeführt wurden, um sicherzustellen, dass der Kompensator wie gefordert funktioniert. Die Berechnungen wurden durch eine FEM-Simulation validiert, die verschiedenen Parameter und Randbedingungen sind hier ebenso zu finden wie das erforderliche CAD-Modell.

5.1. Mathematische Auslegung & Werkstoffauswahl

Die Wahl des Materials und die Länge der Bauteile spielen bei diesem Projekt die entscheidende Rolle, daher müssen diese beiden Elemente, die direkt miteinander gekoppelt sind, bestimmt werden.

Der Abstand $L_{1,start}$ ist genau der Abstand zwischen dem Klebepunkt A und dem Klebepunkt B , an dem die Glasfaser geklebt wird. Somit befinden sich die FBGs in der Mitte zwischen den beiden Klebepunkten (siehe Abbildung 5.1). Der richtige Abstand nach einer Temperaturänderung, bei der sich die beiden Punkte je nach Temperaturänderung einander annähern oder voneinander entfernen, wird als Athermalisierung bezeichnet.

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

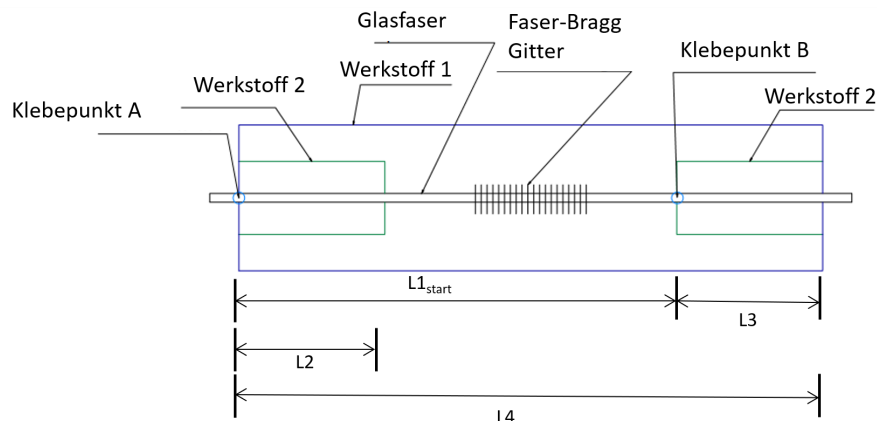


Abbildung 5.1.: Funktionsprinzip eines Temperaturkompensators für FBG

Die folgende Gleichung (5.1) wurde entwickelt, um die verschiedenen Faktoren, ihre Wechselwirkungen und die daraus resultierenden Längenänderungen mathematisch darzustellen, mit dem Ziel, verschiedene Parameter, wie z. B. Material, Temperatur, Länge der Bauteile, Ausdehnungskoeffizient, zu variieren und die Ergebnisse simulieren und untersuchen zu können. Die Gleichung spielte eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung des Temperaturkompensators.

$$L1_{\Delta T} = L1_{\text{start}, 22^{\circ}\text{C}} + \Delta L4 - \Delta L2 - \Delta L3 \quad (5.1)$$

Wobei:

$$\Delta L2 = L_{\text{anfang}} \cdot \alpha_{\text{Werkstoff 2}} \cdot T_{(T \text{ anfang}-T \text{ ende})}$$

$$\Delta L3 = L_{\text{anfang}} \cdot \alpha_{\text{Werkstoff 3}} \cdot T_{(T \text{ anfang}-T \text{ ende})}$$

$$\Delta L4 = L_{\text{anfang}} \cdot \alpha_{\text{Werkstoff 4}} \cdot T_{(T \text{ anfang}-T \text{ ende})}$$

L_1, L_2, L_3, L_4 sind in der Abbildung 5.1 grafisch dargestellt.

ΔL , ist die Längenänderung jedes Bauteils nach Temperaturänderung in Millimeter. L steht bei der Gleichung (5.1) für die Länge eines Bauteils in Millimeter bei der jeweiligen Raumtemperatur, α steht für den Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) des Materials jeder Komponente in $1/\text{K}$ und T steht für die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$.

Das Material der Bauteile 2 und 3 sowie deren Längen L_2 und L_3 sind in der Gleichung als konstant einzutragen. Beide Längen sind so gewählt, dass die 110 mm Glasfaser hineinpasst.

Kennt man aus dem Experiment (Kapitel 4) die erforderliche Länge L_1 nach einer Temperaturänderung, den sogenannten Kompensationswert, d.h. den erforderlichen Abstand zwischen den beiden Klebepunkten, damit das FBG nach der Temperaturän-

5.1. Mathematische Auslegung & Werkstoffauswahl

derung kompensiert ist, so kann man mit Hilfe der Gleichung (5.2) die erforderliche Größe des Bauteils L_4 bestimmen:

$$L_4 = \frac{L1_{\Delta T} + \Delta L3 + \Delta L2 - L1_{\text{start}}}{\Delta T \cdot \alpha_{\text{Werkstoff4}}} \quad (5.2)$$

5.1.1. Bestimmung der Länge der Bauteile mittels Tabellenkalkulation

Mit der Gleichung (5.1) als Grundlage, wurde eine Tabellenkalkulation (Excel 2019 Version 1808) verwendet. Die Tabelle ermöglicht die Untersuchung der Kombination aller Werkstoffe und Längen (siehe Abbildung 5.3). Als Ergebnis erhält man die erforderliche Länge L_4 und das erforderliche Material α_4 des Bauteils 4 unter der Bedingung, dass sich der Abstand zwischen den beiden Klebepunkten L_1 bei einer definierten Temperaturänderung um einen bestimmten Wert ändert (siehe Abbildung 5.3).

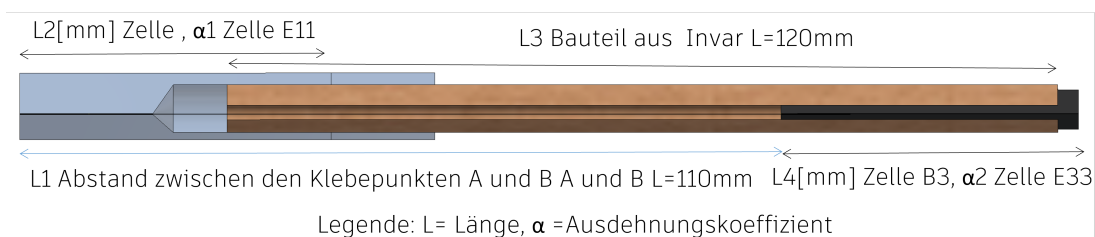


Abbildung 5.2.: Grafische Darstellung der Tabellenkalkulation Parameter

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

	C	D	E		C	D	E
5				5			
6		Raum T[°C]	20	6		Raum T[°C]	20
7	Variable	Temperature Änderung[°C]	-20	7	Variable	Temperature Änderung[°C]	-20
8		ΔT [°C]	40	8		ΔT [°C]	=E6-E7
9				9			
10	Variable	Kompensation pro 1°C [m #####]		10	Variable	Kompensation pro 1°C [mm]	0,00104086
11	Variable	α Aluminium[C°-6]	2,34E-05	11	Variable	α Aluminium[C°-6]	=23,4*10^-6
12	Variable	α Messing [x10^-6]	1,90E-05	12	Variable	α Messing [x10^-6]	=19*10^-6
13		α Invar[x10^-6]	1,20E-06	13		α Invar[x10^-6]	=1,2*10^-6
14				14			
15	Variable	L Anfang [mm]	118,373	15	Variable	L Anfang [mm]	118,373
16		L bei ΔT -10[°C]	118,41463	16		L bei ΔT -10[°C]	=E15+(E8*E10)
17		Diferenz	-0,041634	17		Diferenz	=E15-E16
18				18			
19	Variable	Original L Invar Bauteil [m]	188,5	19	Variable	Original L Invar Bauteil [mm]	188,5
20	Variable	Original L Messing Bauteil	35	20	Variable	Original L Messing Bauteil [mm]	35
21		ΔT x α Aluminium[mm]	0,000936	21		ΔT x α Aluminium[mm]	=E11*E8
22				22			
23				23			
24		ΔL Invar Bauteil [mm]	0,009048	24		ΔL Invar Bauteil [mm]	=E8*E13*E19
25		ΔL Messing Bauteil [mm]c	0,03276	25		ΔL Messing Bauteil [mm]cte alu	=E8*E11*E20
26		ΔL Aluminium [mm]		26		ΔL Aluminium [mm]	
27				27			
28				28			
29				29			
30				30			
31				31			
32				32			
33		Berechnete notwendige L4 [mm]	89,147863	33		Berechnete notwendige L4 [mm]	=(E16-(E15-E24-E25))/E2

Abbildung 5.3.: Excel-Tabelle zur Untersuchung des resultierenden Abstandes L4 bei der Kombination mehrerer Bauteile, Längen und Werkstoffe unter Berücksichtigung der Temperaturänderung.

5.2. Konzeptbeschreibung & 3D-Modellierung

Wie in der Abbildung 5.4 zu sehen ist, besteht der Temperaturkompensator aus elf Bauteilen, die meisten aus Aluminium und in der Mitte das Bauteil Spannvorrichtung (3) aus Invar, von denen jedes eine genaue und teilweise vorausberechnete Funktion hat. Mit dieser Konstruktion wurde nicht nur versucht, eine genaue Temperaturkompensation der FBG zu erreichen, sondern auch den Herstellungsprozess der FBG im Hinblick auf eine zukünftige Massenproduktion genauer und wiederholbarer zu machen, wobei berücksichtigt wurde, dass heutzutage faserbasierte astronomische Instrumente mehrere tausend Fasern verwenden.

Die Glasfaser wird mit einem Klebstoff auf Acrylatbasis an zwei Stellen verklebt, zuerst in das Bauteil Winkelversteller, das nach dem Trocknen und Aushärten des Klebstoffs in das Bauteil Spannvorrichtung eingeschoben wird, wobei darauf zu achten ist, dass die Distanzscheiben zwischen den beiden Bauteilen positioniert werden (zwischen Winkelversteller und Spannvorrichtung). Die Glasfaser wird dann durch das Bauteil Faserhalter eingefügt, anschließend wird das Bauteil Faserhalter in die Spannvorrichtung eingeschraubt und mit einem Drehmoment von 0,5 Nm angezogen.

Wenn alle Bauteile an der richtigen Stelle sind, wird das andere Ende der Glasfaser ein-

5.2. Konzeptbeschreibung & 3D-Modellierung

geklebt. Nach dem Aushärten werden die Distanzscheiben mit den Präzisionsdistanzscheiben eingetaucht. Hier erhält die Glasfaser eine Vorspannung, da die Präzisionsdistanzscheiben dicker sind als die Distanzscheiben. Zum Verschließen der Baugruppe wird die Sicherungskappe mit 0,5 Nm eingeschraubt, dabei müssen die Zylinderstifte mit einer Vorrichtung horizontal gehalten werden, um eine Torsion in der Glasfaser zu vermeiden.

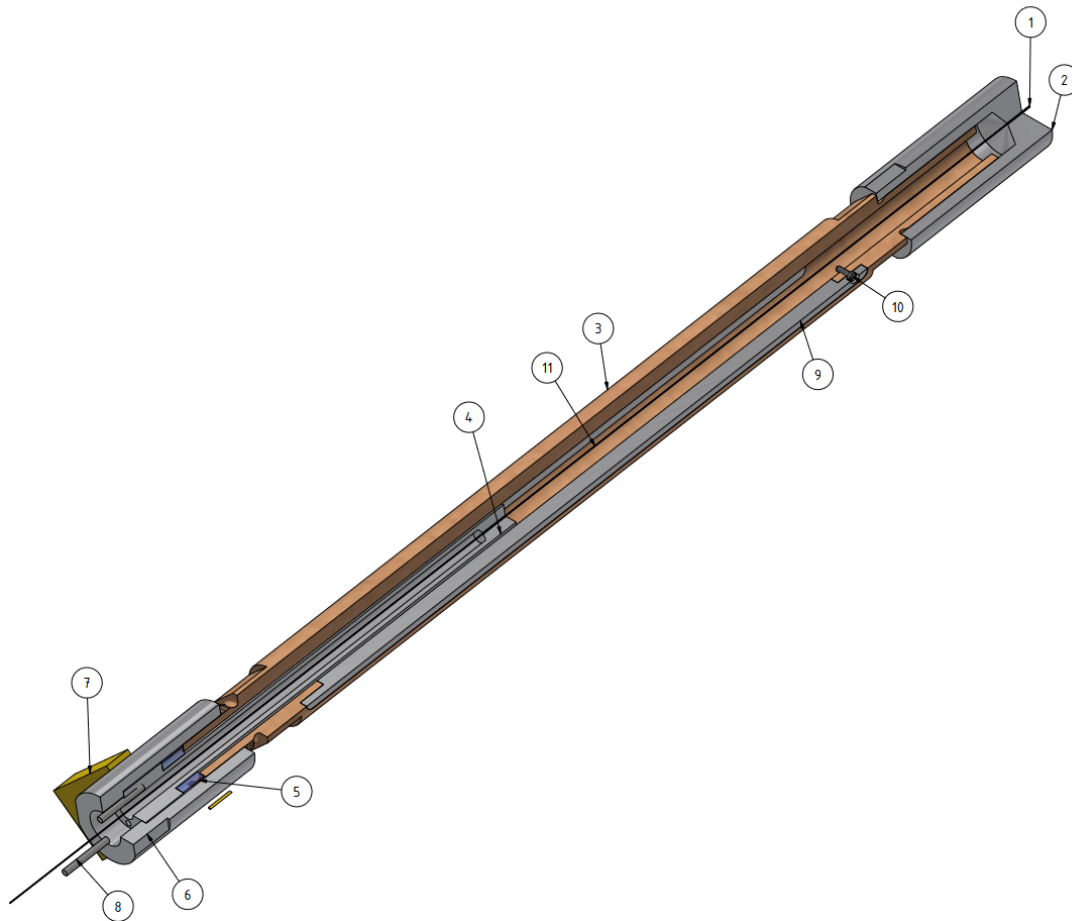


Abbildung 5.4.: 3D Modellierung der gesamten Baugruppe des Temperaturkompensators. (1) Glasfaser, (2) Faserhalter, (3) Spannvorrichtung, (4) Winkelversteller, (5) Präzisionsdistanzscheiben, (6) Sicherungskappe, (7) Distanzscheibe, (8) Zylinderstifte, (9) Abdeckung, (10) M1 Schraube.

5.2.1. 3D-Modellierung

Zur dreidimensionalen Visualisierung des Konzepts, für die spätere Simulation mittels Finite Elemente Methode Simulation (FEM) sowie für die Fertigungszeichnungen, wird ein erster Prototyp mit dem Computer Aided Design (CAD) Programm Inventor mo-

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

delliert (siehe Abbildung 5.4). Dieses CAD-Modell wird so entwickelt, dass es in einer späteren Entwicklungsphase ohne Änderungen für die FEM verwendet werden kann und weitere Änderungen im CAD-Programm von Ansys (Spaceclaim) vorgenommen werden können, ohne das gesamte Modell modifizieren zu müssen.

Die optische Faser (1) wird ohne die Faser-Bragg-Gitter (11) und in drei verschiedenen Teilen modelliert, von denen zwei gleich groß, aber kleiner als der mittlere Teil sind. Der Grund für die Aufteilung des Lichtwellenleiters in drei Teile ist, dass die Auswirkungen von Temperaturänderungen in den beiden Klebepunkten in der FEM Analyse genauer und einfacher analysiert werden können.

Spannvorrichtung

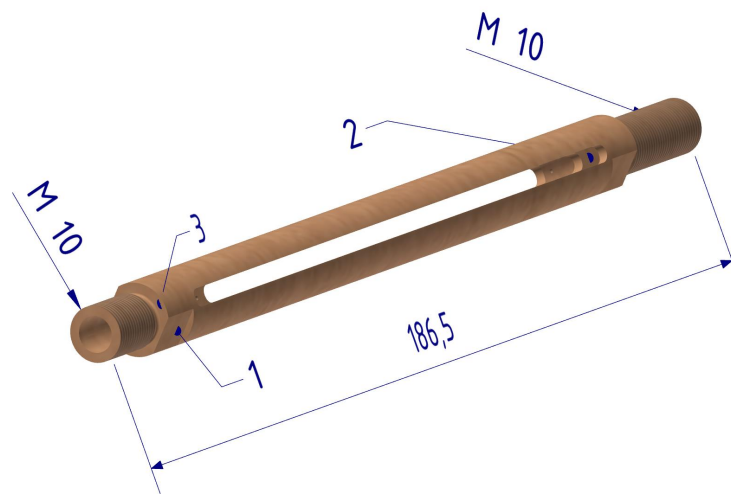


Abbildung 5.5.: Spannvorrichtung (Einheiten in mm)

Dieses Bauteil ist mit einer Nennlänge von 185,6 mm aus dem Werkstoff Invar modelliert. Das Bauteil hat zwei Gewinde M10 x 0,75. Auf das längere Gewinde wird das Bauteil Faserhalter geschraubt, auf das kürzere die Schutzkappe mit 0,5 Nm eingeschraubt wird. Die Planflächen (1) spielen eine wichtige Rolle, da sie nicht nur eine wiederholgenaue Positionierung des Kompensators während der FBG-Beschriftung ermöglichen, sondern auch als Referenzflächen für verschiedene Messungen sowie als Schnittstelle für einen Momentschlüssel zur Einstellung des richtigen Drehmoments zwischen dem Gewinde des Bauteils Faserhalter und der Spannvorrichtung dienen.

Die Ausschnitte (2) oder Öffnungen ermöglichen den Durchgang des Laserstrahls und seine Positionsbestimmung auf der Glasfaser. Dies hat der Herstellung von FBG am AIP eine neue Perspektive gegeben, da diese Möglichkeit die Wiederholbarkeit und Genauigkeit des FBG-Beschriftungsprozesses enorm erhöht. Außerdem wird das Risiko eines Faserbruchs nach der Beschriftung eliminiert, da sie nicht mehr berührt werden muss. Die andere Öffnung im 90-Grad-Winkel zur Öffnung für den Laserstrahleneingang ermöglicht die Positionserfassung der Glasfaser in XY-Richtung mittels einer Kamera oder

5.2. Konzeptbeschreibung & 3D-Modellierung

einem Mikroskop. Wenn der Kompensator fertig montiert und das FBG beschriftet ist, können die Fenster geschlossen werden, um die Glasfaser vor äußeren Einflüssen wie mechanischer Berührung oder Feuchtigkeit zu schützen.

Faserhalter

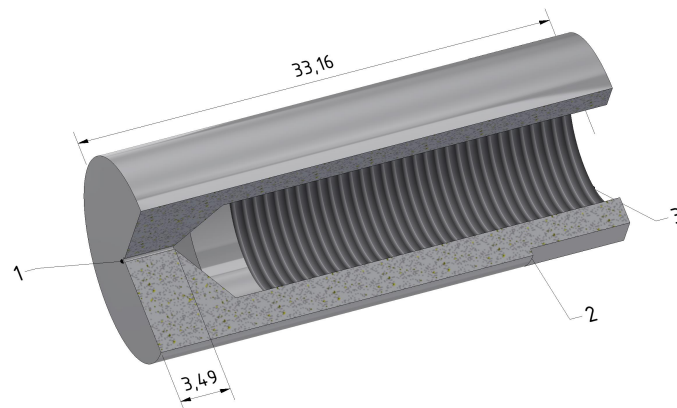


Abbildung 5.6.: Faserhalter (Einheiten in mm)

Dieses Bauteil besteht aus Aluminium und muss aus dem gleichen Werkstoff, d. h. aus dem gleichen Halbzeug wie der Winkelversteller und die Präzisionsdistanzscheiben hergestellt werden. Mit einer Nennlänge von 33,16 mm und einem Durchmesser von 14 mm wird ein Ende der Glasfaser eingeklebt, (siehe Abbildung 5.6). Die Durchgangsbohrung (1) mit einem Durchmesser von 0,4 mm wird so klein wie möglich gewählt, um die Glasfaser möglichst zentriert zu halten, aber groß genug, damit der Klebstoff eine ausreichende Schichtdicke hat. Um auch das Volumen und den Beginn der Klebnaht klar zu definieren, wird die Durchgangsbohrung zunächst in ein Testteil gebohrt, um mittels verschiedener Versuche die erforderliche Kleberschichtdicke sowie die Machbarkeit des Klebens und Abklebens der Glasfaser zu bestimmen. Auf der anderen Seite befindet sich ein M10×0,75 Gewinde (3), wo das Bauteil Spannvorrichtung eingeschraubt wird. Die flachen Flächen (2) dienen als Schnittstelle für die Drehmomentschlüssel.

Winkelversteller & Zylinderstifte

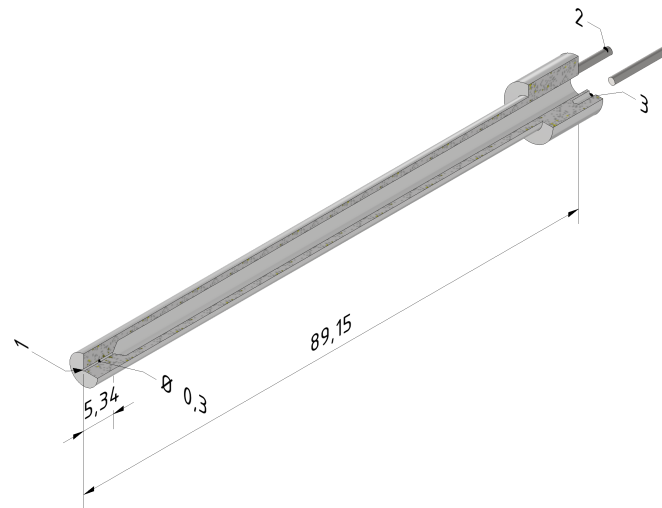


Abbildung 5.7.: Winkelversteller und Zylinderstifte (Einheiten in mm)

Der Winkelversteller besteht ebenfalls aus Aluminium, die Nennlänge ist $89,147\text{mm}$ und den Durchmessern 5mm und 8.8mm bildet er die notwendige Schnittstelle zum Einkleben der Glasfaser durch die Durchgangsbohrung (1) am anderen Ende. Wenn der Kompensator zusammengebaut ist, kann die Glasfaser ausgedreht werden, falls durch den Klebevorgang ein Verdrehen oder eine leichte Torsion entstanden ist, oder nach Neueinstellung der Vorspannung durch Herausdrehen des Bauteils Faserhalter. Die beiden Bohrungen (3) mit einem Durchmesser von 1mm und einer vorgegebenen gering gehaltenen Parallelitätstoleranz zueinander dienen als Referenz für einen torsionsfreien Glasfaser, in den zwei Stifte (2) eingesetzt werden und beide während des Klebevorgangs auf einer ebenen Fläche gehalten werden (siehe Abbildung 5.7).

Sicherungskappe (Einheiten in mm)

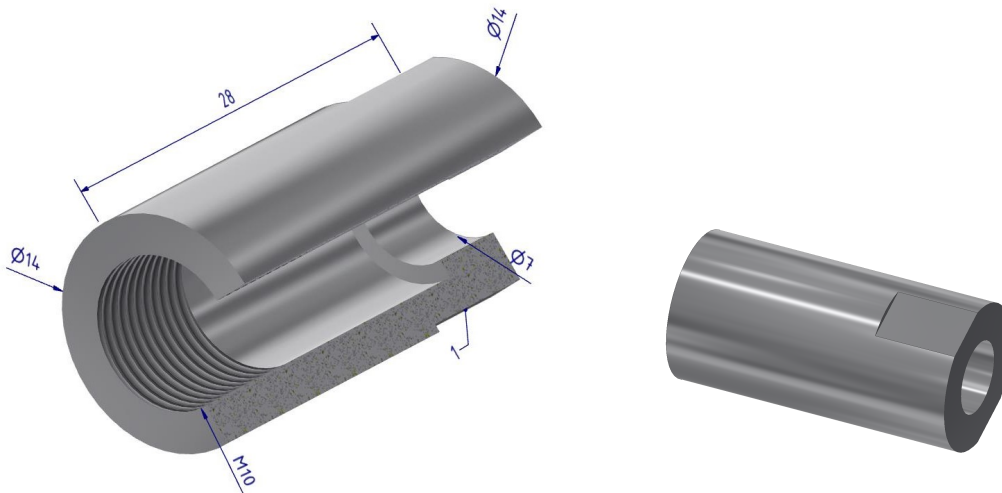


Abbildung 5.8.: Sicherungskappe (Einheiten in mm)

Dieses Bauteil besteht aus Aluminium, hat eine Nennlänge von 28 mm, einen Außendurchmesser von 14 mm und ein M10 Gewinde. Das Bauteil spielt während der Kompensation keine Rolle, daher werden seine Abmessungen und Materialeigenschaften in der Gleichung nicht berücksichtigt. Aus optomechanischer Sicht spielt dieses Bauteil jedoch eine wichtige Rolle, da ohne dieses Bauteil die Glasfaser die einzige Verbindung zwischen allen Bauteilen wäre und zusätzlich durch das Gewicht des Bauteils Winkelversteller eine Zugkraft auf die Glasfaser wirken würde, wenn der Kompensator in eine ungünstige Position geraten sollte. Außerdem hält das Bauteil Winkelversteller in der richtigen Stellung, so dass die Winkelversteller in fünf Freiheitsgraden blockiert bzw. gehalten wird und sich nur um die Längsachse drehen kann. Mittels der Sicherungskappe wird die Wiederholbarkeit bei Serienfertigung erhöht, da durch die ebenen Flächen ein definiertes Moment eingehalten werden kann und somit die Endlage und die Belastung auf das Bauteil Winkelversteller immer gleich eingestellt werden kann.

Distanzscheiben in nominaler Dicke

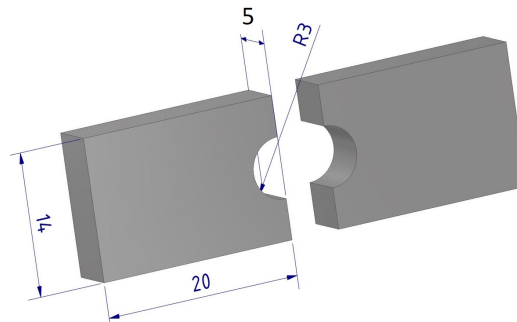


Abbildung 5.9.: Distanzscheiben (Einheiten in mm)

Die zwei Distanzscheiben bestehen aus Aluminium, die Breite (5 mm) hat eine Toleranz von $\pm 0,01$ mm. Diese Bauteile werden immer paarweise in gleicher Dicke hergestellt und werden immer zusammen montiert. Diese wichtigen Bauteile werden während der Montage der Glasfaser verwendet, genauer gesagt während des Klebevorgangs der Glasfaser im Kompensator; sie halten einen Platz frei für die Präzisionsdistanzscheiben, die am Ende montiert werden. Mit diesen beiden Bauteilen erreicht man eine Wiederholbarkeit im Klebevorgang, aber vor allem im Vorspannvorgang, da sie dünner sind als die Präzisionsdistanzscheiben. Der Austausch findet statt, wenn beide Klebepunkte ausgehärtet sind und erzeugt automatisch eine vorberechnete und wiederholbare Zugspannung in der Glasfaser.

Abdeckkappe

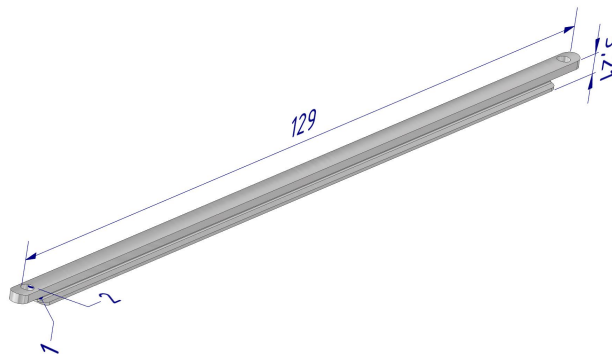


Abbildung 5.10.: Abdeckkappe (Einheiten in mm)

Die Abdeckung hat die Aufgabe, die Glasfaser vor mechanischen Berührungen zu schützen, sowie das Eindringen von Feuchtigkeit in das System zu verhindern. Dazu

5.2. Konzeptbeschreibung & 3D-Modellierung

hat die Abdeckkappe einen Dichtungsring mit 1 mm Durchmesser. Feuchtigkeit ist ein relevanter Aspekt bei der Temperaturkompensation. Es wird vermutet, dass es bei auftretender Feuchtigkeit einen Effekt in der Athermalisierung gibt, was darauf hindeutet, dass der Klebstoff seine physikalischen Eigenschaften ändert, wenn er feucht wird. Als zweite Maßnahme gegen Feuchtigkeit im System werden auch Silica-Kügelchen auf die Abdeckkappe geklebt. Die Abdeckkappe ist aus dem Material Invar modelliert, wird aber zunächst mit anderen Materialien, wie z.B. 3D-Druck (Nylon) getestet, um den Fertigungsaufwand und die Kosten zu reduzieren. Die Eignung anderer Materialien wird experimentell ermittelt.

Präzisionsdistanzscheiben

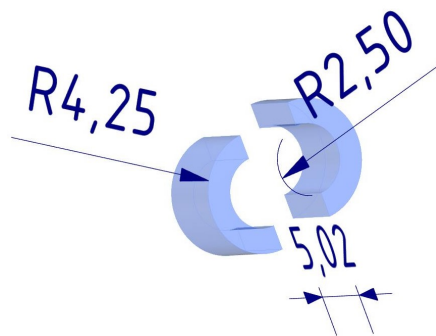


Abbildung 5.11.: Präzisionsdistanzscheiben zum Vorspannen der Glasfaser (Einheiten in mm)

Diese sehr wichtigen Bauteile bestehen ebenfalls aus Aluminium. Mit einem Durchmesser von 8,5 mm, einem Innendurchmesser von 5 mm und einer Dicke von 5,02 mm bis 5,03 mm, sind sie immer paarweise herzustellen, damit keine Dickenunterschiede auftreten und werden auch paarweise montiert. Die Dicke dieser Komponenten spielt eine entscheidende Rolle bei der Temperaturkompensation. Es wird eine Dicke gewählt, die die Herstellung vereinfacht, d.h. nicht so dünn wie die normalen Ausgleichsplatten die für den Maschinenbau verwendet werden. Die Dicke wird von der Länge des Bauteils Winkelversteller entnommen. Es wurde untersucht und nachgewiesen, dass man eine beliebige Dicke wählen kann. Diese Dicke soll von der Länge des Bauteils Winkelversteller 5.1.1 subtrahiert werden. L_4 -Dicke (siehe Gleichung 5.1 auf Seite 46). Hier ist es wichtig zu betonen, dass dies eine nominale Dicke der Präzisionsdistanzscheiben liefert. Es war notwendig eine Toleranzanalyse durchzuführen, um von einer Dicke auszugehen, die tolerierbar und messbar ist und mit den Mitteln, die in der Werkstatt des AIP zur Verfügung stehen, hergestellt werden kann.

Ein weiterer sehr wichtiger Vorteil ist, dass im Falle einer Über- oder Unterkompensation bei der Funktionsprüfung die Präzisionsdistanzscheiben nachgeschliffen oder neu angefertigt werden können, während die anderen Bauteile unverändert bleiben.

5.3. Simulation des Temperaturkompensators mit der Finite Elemente Methode

Ziel der FEM-Analyse ist es, die geeignete Kombination aus Bauteillänge und Bauteilwerkstoff zu finden. Diese beiden Parameter wurden mit einer Tabellenkalkulation (siehe Abschnitt 5.1.1) berechnet und müssen durch die FEM validiert werden. Die FEM-Analyse soll nicht nur eine Validierung der berechneten Werte, sondern auch die Verformungsfiguren und die Untersuchung der Temperaturkompensation unter mehreren Randbedingungen liefern, was mit der Tabellenkalkulation nicht ermittelt wurde. Aufgrund der Komplexität der Untersuchung durch die Vielzahl der einstellbaren Parameter wurde eine Automatisierung mit der Ansys-Funktion ein sogenannte „Parametrisches Design“ durchgeführt.

Zuerst wurde ein rotationsymmetrisches System entlang der Z Achse modelliert und ein $1/4$ -Schnittmodell davon erstellt, damit es realistische Fixierungspunkte im FEM-Modell hat, und genügend Flächen hat, um die Anfangsbedingungen zu setzen. Mit der Software ANSYS Version 2024 R2 wurde eine lineare Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine sogenannte „Statische Strukturanalyse“ .

Die FEM ist gemäß der „Design of Experiment-Methode“ durchgeführt, d.h., verschiedene Parameter wurden als Bedingungen programmiert und konnten verändert werden, um die Auswirkungen dieser Änderungen auf das Gesamtsystem zu untersuchen, ohne die einzelnen Parameter (Bauteillänge, Bauteilwerkstoff, Wärmeausdehnungskoeffizient und ΔT) im Hauptmodell manuell ändern zu müssen. Die Parameter repräsentierten die möglichen Szenarien, wie z.B. unterschiedliche Längen der Bauteile sowie unterschiedliche Materialien, d.h. unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten. Es hat sich gezeigt, dass dies eine sehr effiziente Methode ist, da man mit nur einem FEM-Modell viele Szenarien untersuchen kann, ohne den Aufwand betreiben zu müssen, mehrere FEM-Modelle zu erstellen. Die FEM-Berechnungen wurden am AIP-Cluster „Leibniz“ durchgeführt.

Modell Aufbau

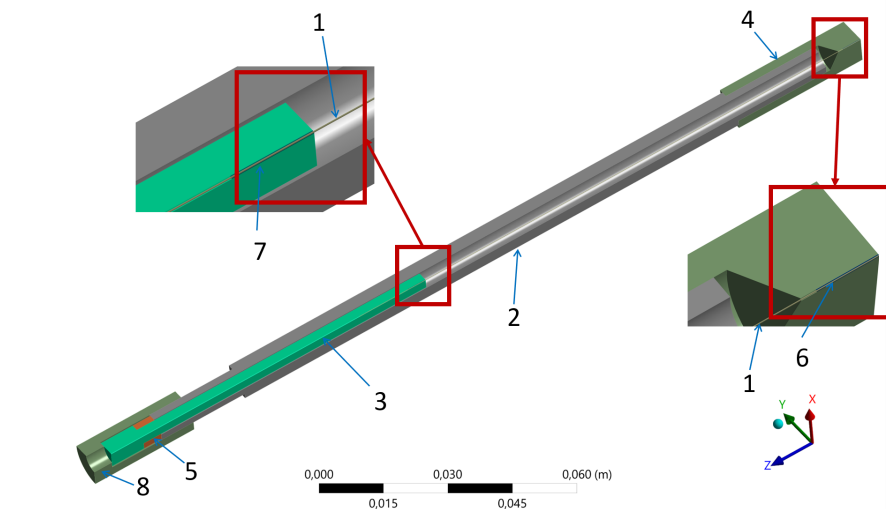


Abbildung 5.12.: Verschiedenen Geometrien, aus denen sich das FEM-Modell zusammensetzt

Das FEM-Modell besteht aus folgenden acht Geometrien (siehe Abbildung 5.12):

- Glasfaser (1)
- Spannvorrichtung (2)
- Winkelversteller (3)
- Faserhalter (4)
- Präzisionsdistanzscheiben (5)
- Klebstoff am Faserhalter (6)
- Klebstoff am Winkelversteller (7)
- Sicherungskappe (8)

An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass das FEM-Modell nur aus den absolut notwendigen Bauteilen und Komponenten besteht, die bei der Temperaturkompensation eine strikte Rolle spielen. Bauteile wie die Abdeckklappen, Schrauben und Bolzen sind nicht modelliert und auch nicht durch Randbedingungen ersetzt, da sie bei der Temperaturkompensation keine Rolle spielen.

Material Eigenschaften

Die Materialauswahl ist eine der Hauptaufgaben dieser Arbeit, daher werden mehrere Materialien und Materialkombinationen mit Hilfe der Funktion „Parametrisches Design“ von Ansys (Version 2024 R2) untersucht. Aufgrund dieser Funktion war die erste Idee, alle anderen Parameter als Konstanten in Ansys einzugeben (Länge, Position und Randbedingungen der verschiedenen Bauteile) und das Material abzufragen. Die Wahrscheinlichkeit, ein Material zu finden, das genau diesen Ausdehnungskoeffizienten hat (was Ansys als Lösung ermittelt hätte), wäre sehr gering, daher werden zunächst Materialien ausgewählt, die auf dem Markt waren, für die das geeignete Halbzeug verfügbar sind und für die der Ausdehnungskoeffizient und seine mögliche Abweichung bekannt sind.

Die folgende Tabelle 5.1 listet die untersuchten Werkstoffe und ihre in Ansys verwendeten physikalischen Eigenschaften auf:

Tabelle 5.1.: In der FEM-Simulation verwendete Werkstoffeigenschaften

Werkstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	E Modul ¹ [GPa]	Querkontraktionszahl ²	Quelle
Aluminium	23,8	71	0,33000	[25]
Invar	1,2	143	0,28980	Ansys Bibliothek
Aluminium AlSiMgMn	23,4	71	0,33000	[27]
Epoxy (Klebstoff)	19,8	0,81	0,41	[15]
Glas (Faser)	44,18	72	0,15490	Ansys Bibliothek

Die in der Tabelle 5.1 aufgeführten Werkstoffe und ihre Zuordnung zu den einzelnen Bauteilen wurden zur Validierung der analytischen Ergebnisse verwendet (Siehe Abschnitt 5.1.1 Tabellenkalkulation).

¹Elastizitätsmodul, auch E-Modul genannt.

²Die Querkontraktionszahl oder Poissonzahl ist definiert als Verhältnis aus relativer Dickenänderung zur relativen Längenänderung bei Einwirkung einer äußeren Kraft oder Spannung [20].

Koordinatensystem

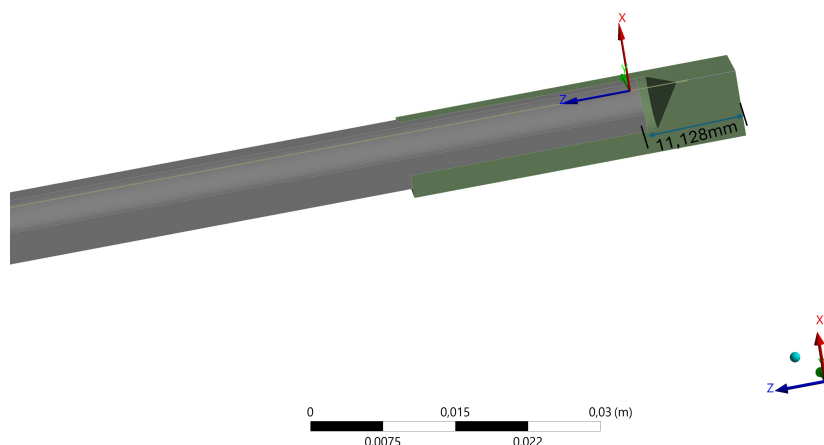


Abbildung 5.13.: Lage des globalen Koordinatensystems

Wie in Abbildung 5.13 zu sehen ist, wurde das globale Koordinatensystem auf die Glasfaser gelegt, genauer gesagt entspricht die Z-Achse des Koordinatensystems der sogenannten optischen Achse. Das Koordinatensystem wurde auf die Glasfaser gelegt, weil die Hauptkomponente des optischen Filters die Glasfaser ist und dass die Geometrie und die physikalischen Eigenschaften der Glasfaser nicht verändert werden. Darüber hinaus ist die Hauptaufgabe dieser FEM Analyse zu klären, welche Kräfte und vorallem welche Verschiebungen der Glasfaser während einer Temperaturkompensation erzeugt werden. Das Koordinatensystem auf dem Bauteil erleichtert das Ablesen der Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen. Die XY-Ebene ist parallel zum Querschnitt des Bauteils und der Koordinatenmittelpunkt liegt 11,128 mm von der Kante des Glasfaserträgers entfernt. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass die Position und die Ausrichtung des Koordinatensystems keinen Einfluss auf die Ergebnisse der FEM haben, daher wurde nur die Position der Z-Achse, der Mittelpunkt des Koordinatensystems und die Ausrichtung der XY-Ebene als Orientierung verwendet, wobei die XY-Ebene um die Z-Achse rotieren kann.

Verbindungen

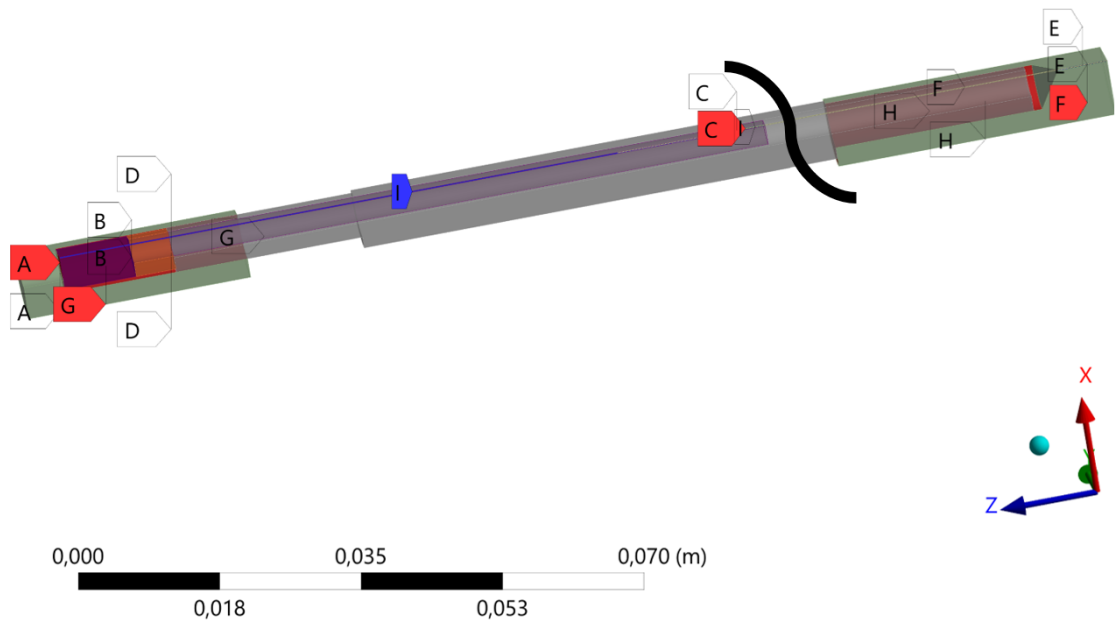


Abbildung 5.14.: Verwendete Kontakte für das FEM Modell

In dieser FEM-Analyse werden die acht Bauteile durch zwei Kontaktkarten zusammengehalten, „keine Trennung und Verbund“, (siehe Abbildung 5.14). Die Kontaktkörper, die Zielkörper sowie der Bauteilname sind in der folgenden Tabelle 5.2 aufgelistet. Alle Kontakte wurden zwischen zwei Flächen erstellt.

Tabelle 5.2.: Für die FEM-Analyse verwendete Verbindungen

Kontakt	Kontaktkörper	Zielkörper	Kontakttyp	Beschreibung
A	Winkelversteller	Sicherungskappe	Keine Trennung	Sicherungskappe drückt den Winkelversteller in Z Richtung
B	Winkelversteller	Präzisions- distanzscheiben	Keine Trennung	Winkelversteller drückt die Präzisions- distanzscheiben in Z Richtung.
C	Kleber	Glasfaser	Verbund	Der Klebstoff verbindet die Glasfaser mit dem Winkelversteller.
D	Präzisions- distanzscheiben	Spannvorrichtung	Keine Trennung	Die Präzisionsdistanzscheibe drücken gegen die Spannvorrichtung.
E	Kleber	Winkelversteller	Verbund	Der Klebstoff verbindet die Glasfaser mit dem Winkelversteller.
F	Kleber	Faserhalter	Verbund	Der Klebstoff verbindet die Glasfaser mit dem Faserhalter.
G	Kleber	Glasfaser	Verbund	Der Klebstoff verbindet die Glasfaser mit dem Faserhalter.
H	Faserhalter	Spannvorrichtung	Verbund	Der Faserhalter wird mit der Spannvorrichtung verschraubt.
I	Kleber	Winkelversteller	Verbund	Der Klebstoff verbindet die Glasfaser mit dem Winkelversteller.

5. *Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation*

Vernetzung in der FEM-Simulation

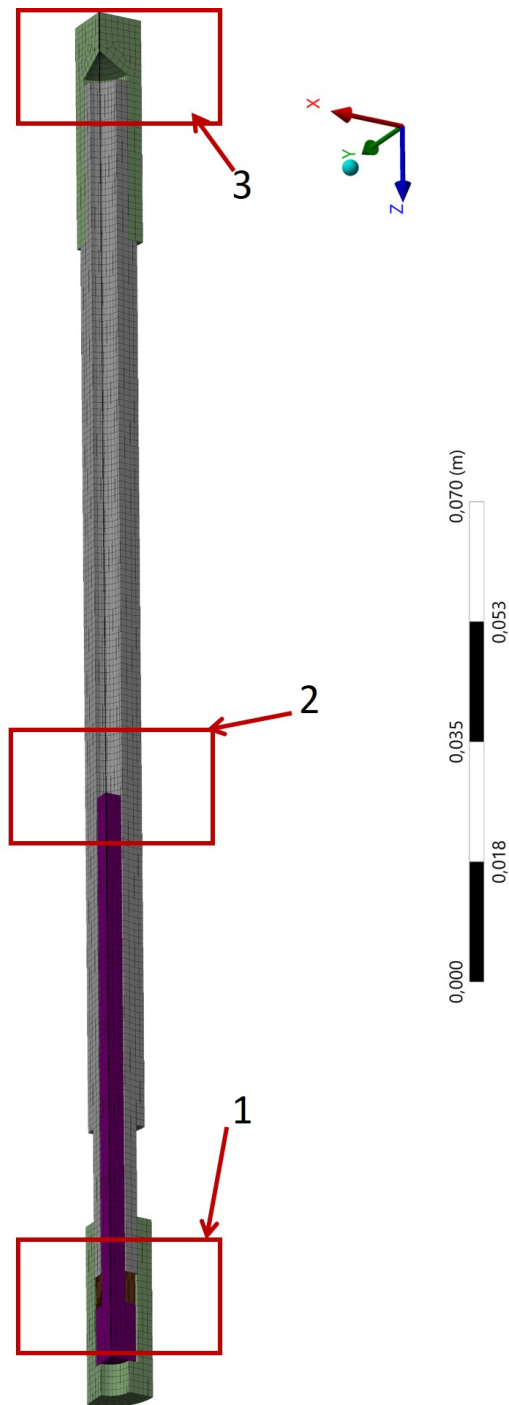


Abbildung 5.15.: Verwendetes Netz für die FEM-Analyse

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

Das Netz besteht aus Hexaederelementen und Tetraederelementen, das Modell hat insgesamt 61 856 Elemente und 266 065 Knoten. Die Dichte des Netzes ist unterschiedlich, abhängig von der Topologie des Bauteils und wird grafisch in Abbildungen 5.16, 5.17 und 5.18 dargestellt. Aufgrund der Topologie der Baugruppe und der Symmetrie der Z-Achse wurde die sogenannte „Sweep-Methode“ verwendet. Mit dieser Technik kann der Körper sehr effizient mit Hexaederelementen vernetzt werden [21]. Die Eignung dieser Vernetzungsmethode wird mit Ansys überprüft und dient auch als Unterstützung bei der Auswahl.

Das Netz wurde an den Stellen verfeinert, die für die Untersuchungen relevant sind, d.h. an den Verbindungen zwischen den optischen Fasern und den Metallkomponenten.

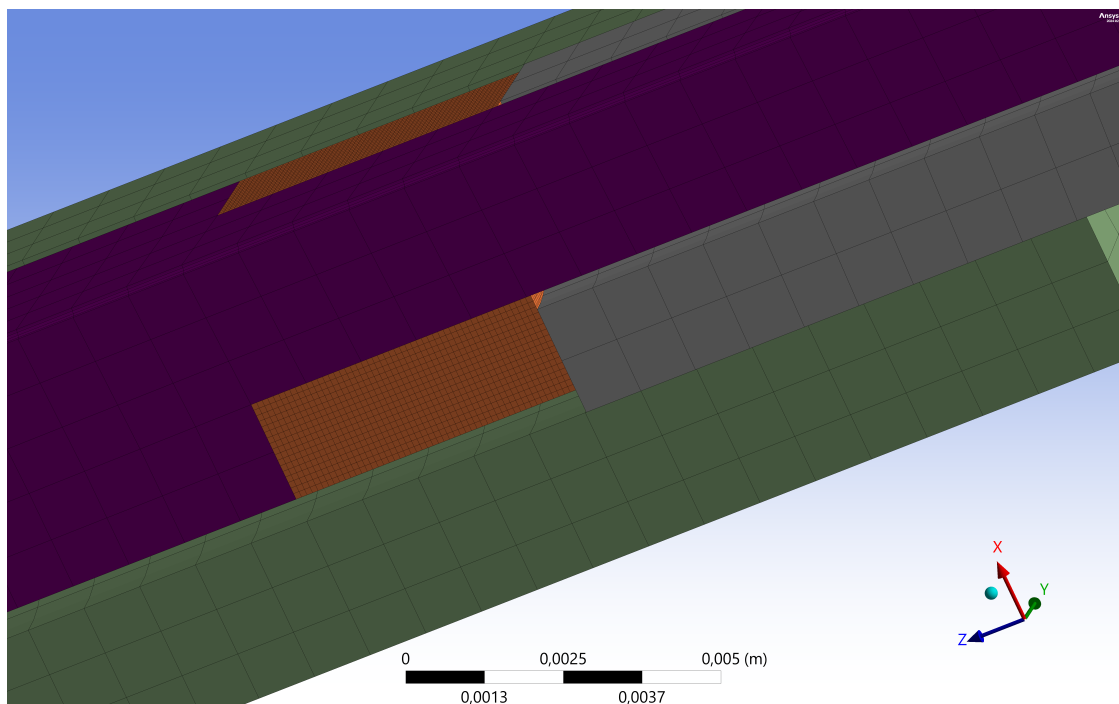


Abbildung 5.16.: Vernetzung des Bauteils Präzisionsdistanzscheibe

Die Abbildung 5.16 stellt eine Vergrößerung des Bereichs Nummer 1 der Abbildung 5.15 dar, hier ist zu erkennen, dass bei dem Bauteil Präzisionsdistanzscheiben die Vernetzung fein gemacht wurde mit einer Elementgröße von 1 mm. Das Bauteil wurde mit Hexaederelementen vernetzt.

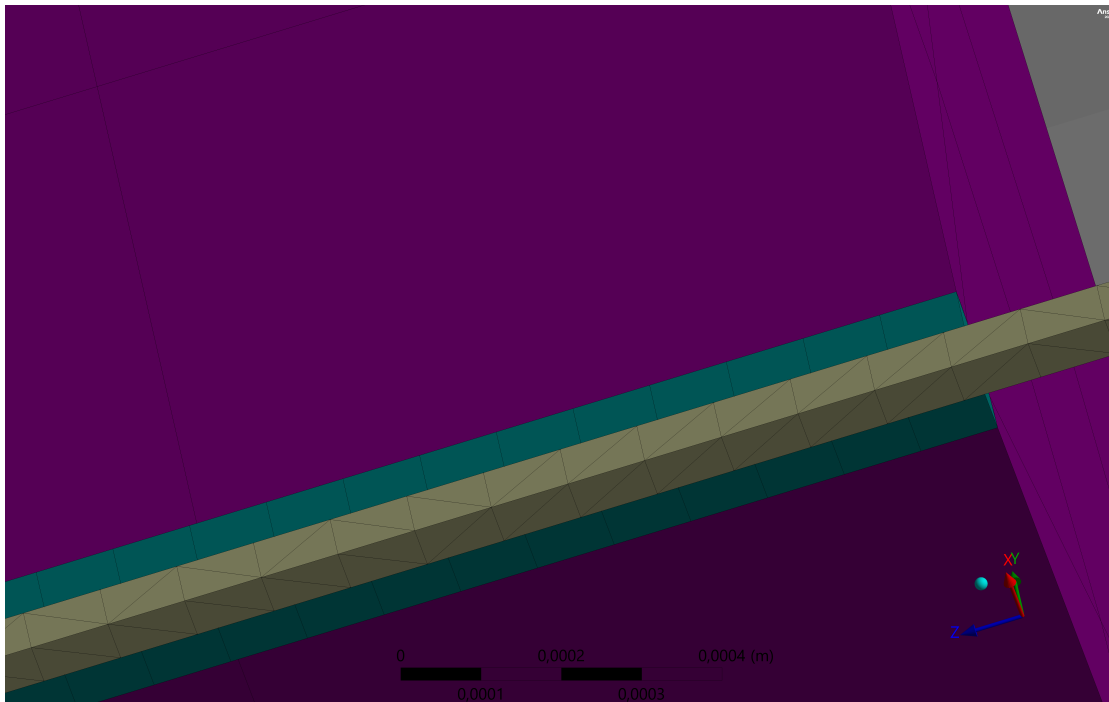


Abbildung 5.17.: Bereich 2: Zeigt die viel feinere Vernetzung der Komponenten Klebstoff und Glasfaser im Vergleich zu den anderen Komponenten

Die Abbildung 5.16 stellt eine Vergrößerung des Bereichs Nummer 2 der Abbildung 5.15 dar, hier wird gezeigt, dass bei den Bauteilen Kleber und Glasfaser die Vernetzung feiner ist als die andere Bauteilen mit einer Elementgröße von 1 mm, an der Stelle, an der die Glasfaser mit dem Bauteil Winkelversteller verklebt ist. Die Bauteile sind mit Tetraederelementen vernetzt.

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

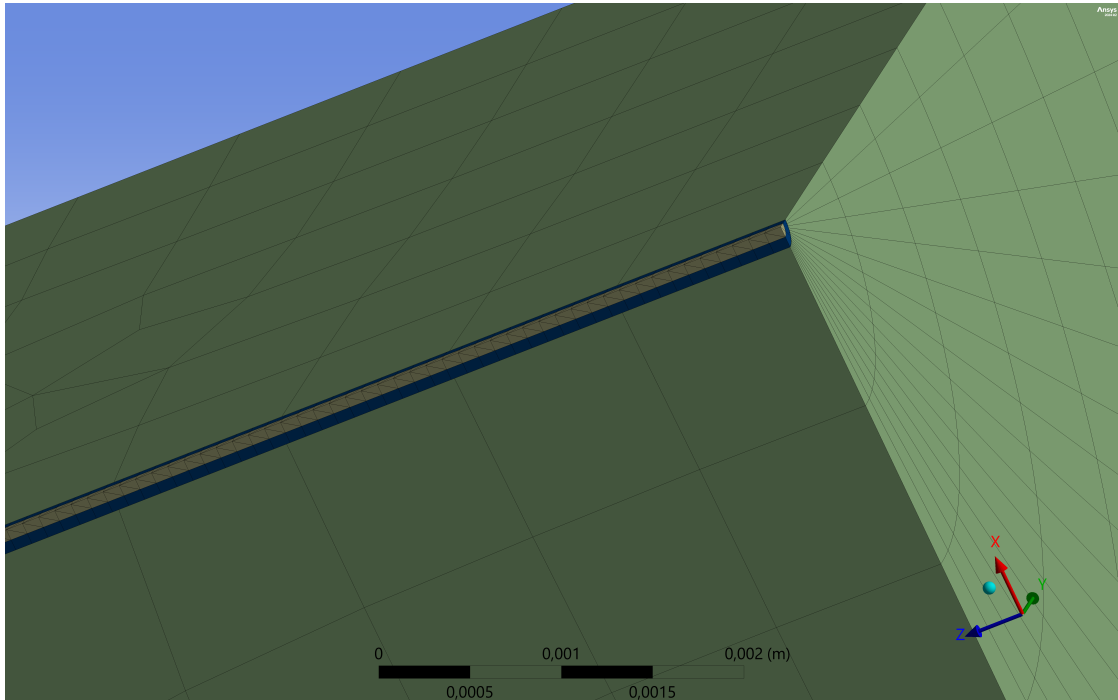


Abbildung 5.18.: Bereich 3: Vernetzung der Bauteile Klebstoff und Glasfaser

Die Abbildung 5.18 stellt eine Vergrößerung des Bereichs Nummer 3 der Abbildung 5.15 dar, hier wird gezeigt, dass bei den Bauteilen Klebstoff und Glasfaser die Vernetzung feiner ist als andere Bauteilen mit einer Elementgröße von 1 mm, an der Stelle, an der die Glasfaser mit dem Faserhalter verklebt ist. Die Bauteile wurden mit Tetraederelementen vernetzt.

Randbedingungen

Räumliche Fixierung

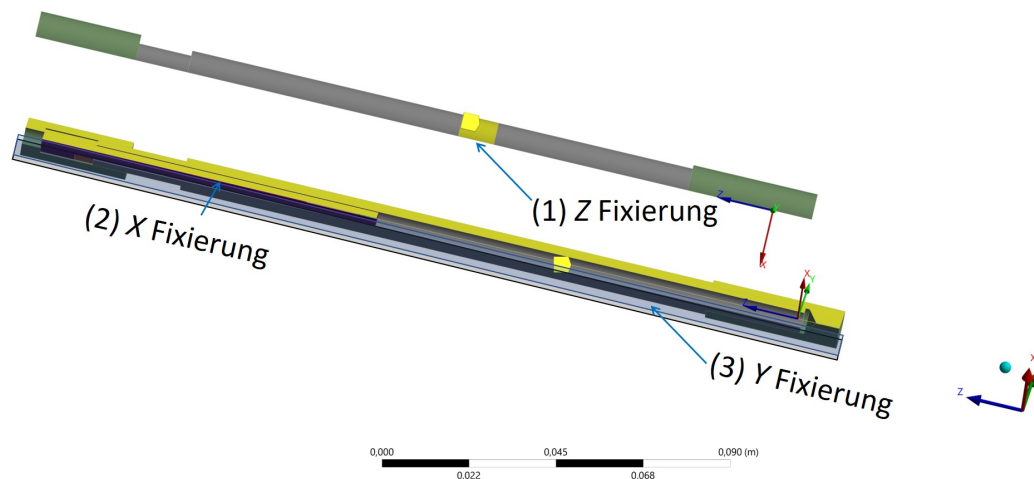


Abbildung 5.19.: Räumliche Fixierung der Baugruppe

Abbildung 5.19 zeigt die räumliche Fixierung der Bauteile für die FEM-Analyse. Beim Fixierungspunkt (1) wurde eine Fläche in der Mitte des Bauteils Spannvorrichtung erzeugt, um die Baugruppe in Z-Richtung zu fixieren. In der gelben Fläche (2) sind alle Bauteile in X-Richtung fixiert. Im blau markierten Bereich (3) sind alle Bauteile in Y-Richtung fixiert.

Schraubenvorspannung Die in der Realität vorhandene Vorspannung wird in der FEM-Analyse durch die Funktion „Schraubenvorspannung“ simuliert (siehe Abbildung 5.20). Diese virtuelle Kraft wirkt in der optischen Achse der Glasfaser. Die Größe der Kraft beträgt 0,152 N und wird in zwei Schritten aufgebracht: Im ersten Schritt wird die Kraft linear auf die Glasfaser aufgebracht, im zweiten Schritt bleibt die Kraft (0,152 N) konstant auf die Glasfaser wirkt.

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

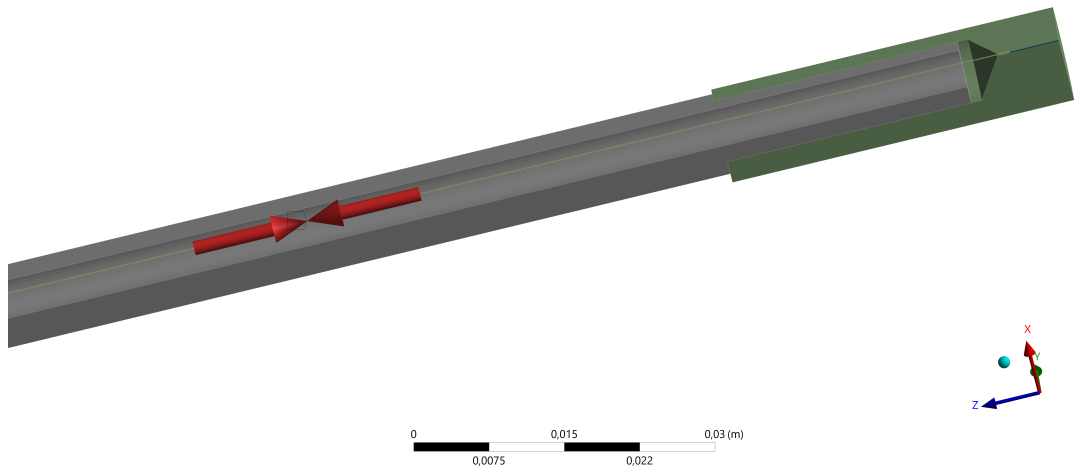


Abbildung 5.20.: Simulation der Vorspannung

Thermische Kondition

Diese Untersuchung bildet den Kern der FEM-Analyse. Die Temperaturbedingungen wurden in zwei Schritten simuliert. Wie Abbildung 5.21 zeigt, wurden die Temperaturbedingungen in zwei Schritten simuliert: Im ersten Schritt ist die Umgebungstemperatur 20°C . Diese Umgebungstemperatur dauert eine Sekunde, dann ändert sich die Temperaturbedingung im zweiten Schritt auf -20°C .

Da die zu erwartende Längenänderung relativ klein ist, geht man davon aus, dass die Volumenänderung des Materials aufgrund von Temperaturänderungen linear ist, obwohl dies in der Realität nicht der Fall ist. Aus diesen Gründen wird in dieser FEM-Analyse nur eine Temperaturänderung untersucht.

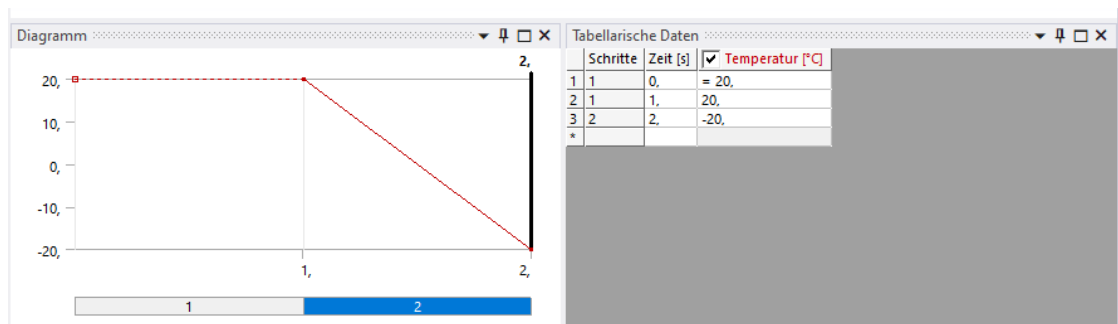


Abbildung 5.21.: Simulation der Temperaturänderung

Ergebnisse und Auswertung

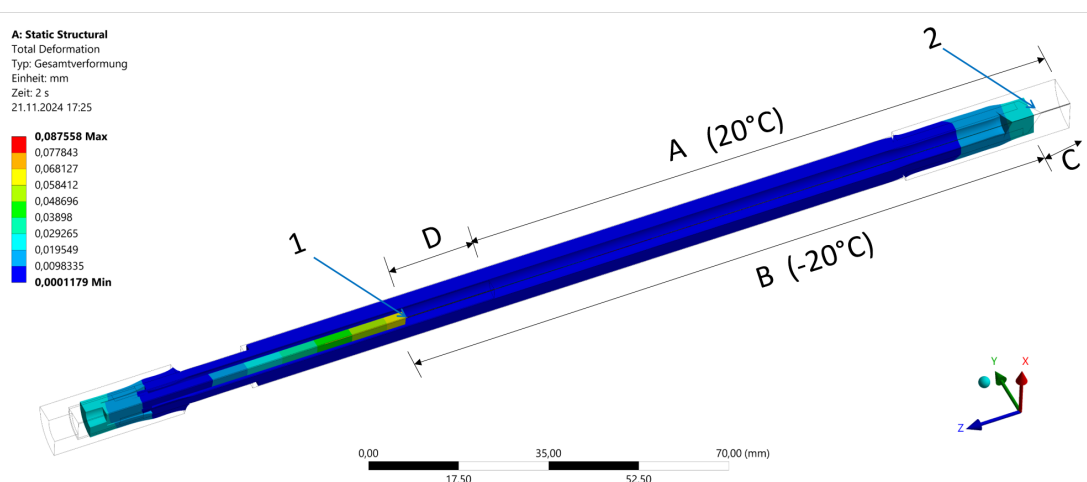


Abbildung 5.22.: Ergebnis der Simulation, die Verformung ist in der grafischen Darstellung um den Faktor 300 vergrößert.

Der Abstand A bei einer Umgebungstemperatur von 20°C beträgt $118,37\text{ mm}$, was in der Realität dem Abstand B zwischen den beiden Klebepunkten entspricht. Erfährt die Baugruppe Temperaturkompensator eine Temperaturänderung von 20°C auf -20°C ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$), vergrößert sich der Abstand zwischen den Flächen 1 und 2 auf $118,41\text{ mm}$ B . Es bedeutet, dass die Glasfaser um $0,040\text{ mm}$ auseinander gezogen wird. (siehe Abbildung 5.22).

Die Länge des Bauteil Winkelversteller C wird $112,31\text{ mm}$ kürzer und das Bauteil Faserhalter wird $6,1\text{ mm}$ kürzer (Abstand D). Die Ergebnisse der Abstandsänderungen zwischen den Klebepunkten wurden ermittelt, indem die Positionsänderung der Flächen 1 und 2 mit der Funktion „user defined result“ abgefragt wurde. Hier wird als Ausdruck die Funktion „LOC_DEZ“ zusammen mit dem globalen Koordinatensystem verwendet.

Wenn für $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ die Glasfaser um $0,040\text{ mm}$ auseinandergezogen wird, bedeutet dies, dass die Glasfaser bei 1°C um $0,001\text{ mm}$ auseinandergezogen wird, um die temperaturbedingten Effekte zu kompensieren. Dieser sogenannte Kompensationswert aus der FEM Analyse nähert sich an dem in der Tabellenkalkulation im Abschnitt 5.1.1 verwendete Wert und vor allem dem im Experiment „Manuelle Temperaturkompensation des Faser-Bragg-Gitters“ im Abschnitt 4.2.5 ermittelten Kompensationswert. Dieser Abstand zwischen den beiden Punkten wird erreicht, wenn die Baugruppe aus folgenden Werkstoffen und in folgenden Längen besteht (siehe Tabelle 5.4).

5. Mathematische Auslegung, Konstruktion und Simulation

Tabelle 5.4.: Ausgewählte End-Material und Komponente Länge Kombination, die zu den Ergebnissen führte (0,001 mm pro 1° C)

Bauteil	Länge [mm]	Werkstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]
Spannvorrichtung		Invar	1,2
Sicherungskappe	33,15 (Tiefe 7)	Aluminium (AlSiMgMn)	23,8
Winkelversteller	89,147	Aluminium (AlSiMgMn)	23,8
Präzisionsdistanzscheibe	5,02	Aluminium (AlSiMgMn)	23,8
Faserhalter	33,15	Aluminium (AlSiMgMn)	23,8
Glasfaser (Abstand zwischen Klebepunkte bei $\Delta T = 0$)	118,373	Glas SiO ₂	44,18
Klebstoff (x2)	3,5	Glas SiO ₂	44,18

Wichtig: Zwischen dem gemessenen Kompensationswert aus dem Experiment „Manuelle Temperaturkompensation des FBGs“ im Abschnitt 4.2.5 [0,00104086 mm/K] und dem Kompensationswert aus der FEM-Analyse [0,0010 mm/K] liegt eine Übereinstimmung von 96% und eine Abweichung von 4%. Dieser Abweichung wurde zunächst vernachlässigt, da die Länge des Bauteils in der Realität von Fertigungs- und Messtoleranzen abhängt, die im Mikrometerbereich liegen, sowie von vielen anderen Faktoren, die die thermische Kompensation beeinflussen. Zum Beispiel die Homogenität der Klebschicht oder die Konzentrität der Glasfaser in der Klebebohrung nach dem Aushärten des Kleberstoffes und der Einstellung der Vorspannung. Aus diesem Grund wurden anpassbare Bauteile (Präzisionsdistanzscheibe 5.2.1) entwickelt, um der Unter- oder Überkompensation in der Realität entgegenzuwirken.

Automatisierte FEM-Analyse für zukünftige Herausforderungen

Übersicht von Schema A8: Parameter				
	A	B	C	D
1	ID	Parametername	Wert	Maßeinheit
2	[-] Eingangsparameter			
3	[-] [m] Static Structural (A1)			
4	[p] P1	Winkelversteller Länge	89,147	mm [v]
5	[p] P2	Spannvorrichtung Länge	35	mm [v]
6	[p] P3	Präzisionsdistanzscheiben Dicke	5,02	mm [v]
7	[p] P4	Sicherung Kappe länge untere Teil	5	mm [v]
8	[p] P10	Wärmeausdehnungskoeffizienten N1	2,34E-05	K ⁻¹ [v]
*	[p] Neuer Eingabeparameter	Neuer Name	Neuer Ausdruck	
10	[-] Ausgangsparameter			
11	[-] [m] Static Structural (A1)			
12	[p] P6	Fläche an der Klebestelle Faserhalter	-6,1062	
13	[p] P7	Fläche an der Winkelversteller	112,31	
14	[p] P8	Abstand zwischen den beiden Klebepunkten	118,41	
*	[p] Neuer Ausgabeparameter		Neuer Ausdruck	
16	Diagramme			

Abbildung 5.23.: Automatisierte FEM-Analyse, um verschiedene Parameter miteinander kombinieren zu können

Die automatisierte FEM-Analyse ist eine effektive Methode, um den Temperaturkompensator an die zukünftigen Herausforderungen anzupassen. Hinter dieser Tabelle (siehe Abbildung 5.23) steht ein funktionierendes FEM-Modell, das nicht direkt modifiziert werden muss, um die Wechselwirkung der verschiedenen Parameter zu untersuchen. Die Funktion „parametrischen Design“ von Ansys 2024 R2 wird es in Zukunft ermöglichen, neue Materialkombinationen zu wählen, die möglicherweise die Gesamtkosten des Temperaturkompensators im Falle einer Massenproduktion reduzieren, oder auch neue Längen der Bauteile zu definieren, wenn sich die Forschung von FBG unterschiedlich entwickelt und die Randbedingungen sich ändern. Ein weiterer Vorteil dieser Art von FEM-Analyse ist, dass sie benutzerfreundlicher ist als eine konventionelle FEM-Analyse, da die Ergebnisse direkt abgelesen werden können, ohne dass der Bediener FEM-Kenntnisse haben muss und ohne das Risiko, einen Fehler in das System einzubauen.

Kapitel 6

Herstellung & Funktionsprüfung

In diesen Kapiteln werden die Besonderheiten bei der Herstellung jedes einzelnen Bauteils sowie die tatsächlichen Abmessungen der Bauteile und die dabei verwendeten Messverfahren und -geräte beschrieben. Abschließend werden die Funktionsprüfung, die Temperaturkompensation und die Ergebnisse dargestellt.




6.1. Prototyp Herstellung



Abbildung 6.1.: Zusammenbau des Temperaturkompensatores

Alle Bauteile des Temperaturkompensatores (siehe Abbildung 6.1) sind aus Aluminium (AlSiMgMn) gefertigt, mit Ausnahme der Spannvorrichtung, die aus Invar gefertigt ist. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Werkstoffen sind in die Tabelle 5.4. Die Komponenten wurden nach Zeichnungen gefertigt (siehe Zeichnungen im Anhang C.1 auf Seite XXXI). Die Fertigung erfolgte in der Werkstatt des AIPs. Dies ist eine auf 20° C temperierte Werkstatt, die Werkstatt des AIPs ist spezialisiert auf Feinmechanik mit dem Schwerpunkt Optomechanik, dort können Bauteile im Hundertstel-Millimeter-Bereich gefertigt und vermessen werden. Nach der Fertigung wurden die Bauteile in Längsrichtung vermessen, die Messung fand in einem temperierten Raum statt. Die Ergebnisse der Messung sowie das verwendete Messgerät sind in der folgenden Tabelle 6.1 aufgelistet.

Tabelle 6.1.: Gefertigte Bauteile des Temperaturkompensators mit Endabmessungen und Messgerät.

Bauteil Name	Abbildung	Tatsächliche Länge	Messgerät
Spannvorrichtung		[A]163,50 mm [B]186,51 mm siehe Zeichnung	[A]Digitaler Messschieber Mahr Modell 16Ewv [B]Digitalmessschraube Mitutoyo
Faserhalter		33,50 mm	Digitalmessschraube Mitutoyo
Präzisionsdistanzscheiben		Wurde nicht gemessen	N/A

Bauteil Name	Abbildung	Tatsächliche Größe	Messgerät
Sicherungskappe		28,00 mm	Digitalmessschraube Mitutoyo
Winkelversteller		89,162 mm	Digitalmessschraube Mitutoyo
Distanzscheiben in nominaler Dicke		89,162 mm	Digitalmessschraube Mitutoyo

6.2. Prüfung der Funktionsweise des Prototyps

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die Funktionsprüfung des Temperaturkompensators gegeben. Eine genaue Beschreibung dieser Funktionsprüfung und der damit verbundenen Experimente ist im wissenschaftlichen Artikel „Athermal package for OH suppression filters in astronomy“ genau beschrieben [**paper2**].

6. Herstellung & Funktionsprüfung

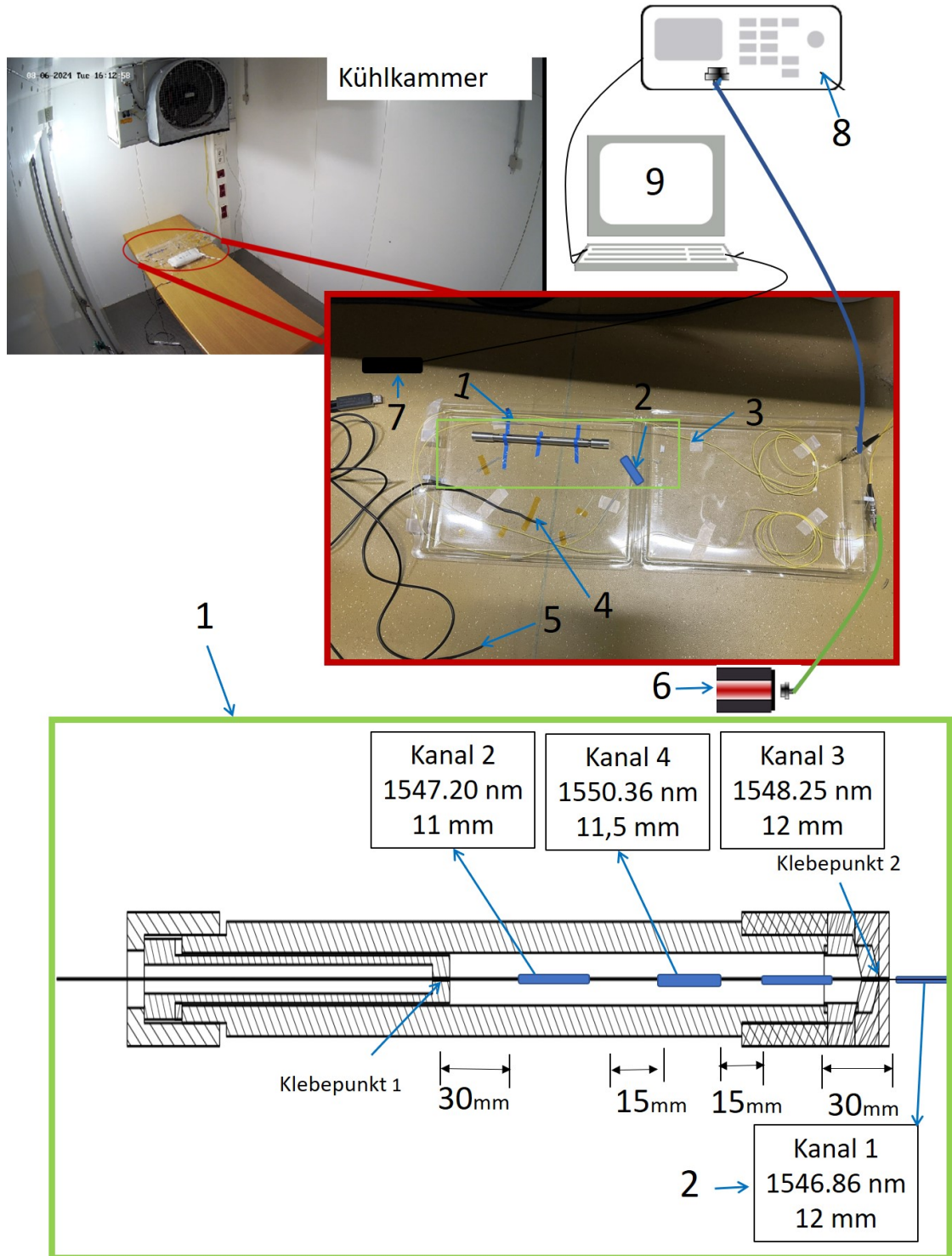


Abbildung 6.2.: Versuchsaufbau zur Überprüfung der Funktion des Temperaturkompensators.

(1) Temperaturkompensator, (2) nicht temperaturkompensierter Kanal, (3) Glasfaser, (4 & 5) Temperatursensor, (6) Lichtquelle, (7) Feuchtigkeitssensor, (8) Spektrumanalysators, (9) Computer.

Versuchsaufbau zur Überprüfung der Funktion des Temperaturkompensators

Zur Überprüfung der Funktion und Kompensation Genauigkeit des Temperaturkompensators wird eine Glasfaser mit einer beschrifteten FBG mit vier so genannte „Segmente“ die in der grafischen Darstellung in Abbildung 6.2 als Kanäle bezeichnet werden verwendet. Die Glasfaser wird unter der erforderlichen Vorspannung in den Temperaturkompensator montiert. Drei der vier „Segmente“ befinden sich innerhalb des Kompensators, während das vierte sich außerhalb des Kompensators befindet und deswegen als Temperaturkontrolle dient (siehe Abbildung 6.2).

Das Messprinzip besteht darin, eine Lichtquelle (6) an der Glasfaser (3) anzuschließen und mit Hilfe des Spektrumanalysators (8) das Transmissionsspektrum zu messen. Der Transmissionsspektrum der drei „Segmente“ im Kompensator (1) sollte während des gesamten Experiments trotz der Temperaturänderungen konstant bleiben. Während der Transmissionsspektrum aus dem Kanal außerhalb des Kompensators (2), der nicht kompensiert ist, sollte sich nach rot (erwärmung) oder blau (Abkühlung) Spektrum verschieben, je nachdem, welche Temperatur im Experiment eingestellt ist.

Das Experiment wird in einer Kühlkammer am AIP durchgeführt, alle Komponenten im roten Rahmen befinden sich in der Kühlkammer (siehe Abbildung 6.2), während sich die anderen Komponenten außerhalb der Kühlkammer befinden. Die Temperatur wird in mehreren Schritten zwischen 20° C und -20° C verändert, bei jeder Temperaturänderung werden die Umgebungstemperatur, die Feuchte und das Transmissionsspektrum der vier Kanäle erfasst.

Ergebnisse des Experiments

Die gemessenen Bragg-Wellenlängen für die Kanäle 1, 2, 3 und 4 bei -16,87 °C im Meßzyklus 1 sind jeweils 1 546,57 nm, 1 547,26 nm, 1 548,24 nm und 1 550,35 nm. Abbildung 6.3 zeigt die Übertragungsspektren der vier FBG-Kanäle bei 15,16 °C und bei -16,87 °C im Meßzyklus 1.

6. Herstellung & Funktionsprüfung

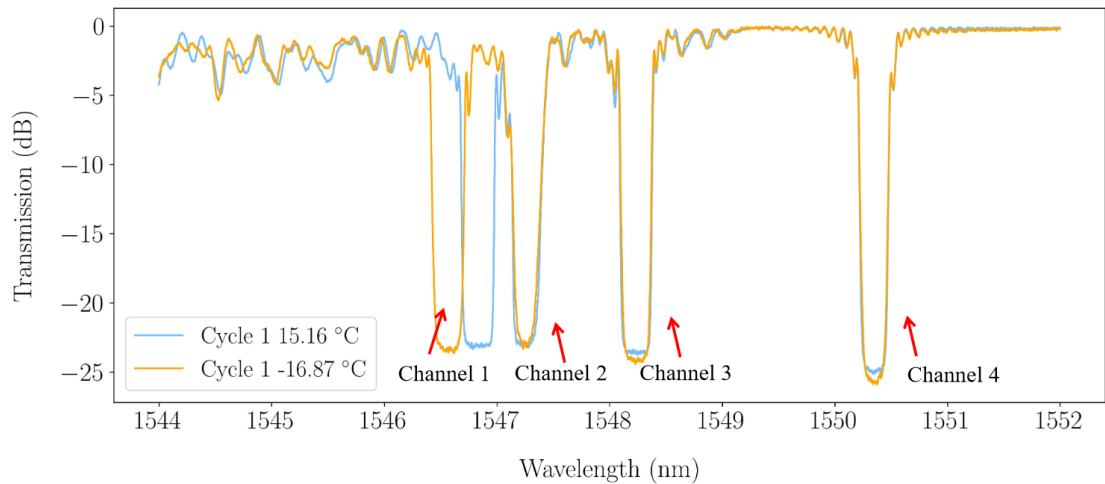


Abbildung 6.3.: Transmissionsspektrum eines temperaturkompensierten FBG im Temperaturbereich von 15.16 °C bis -16.87 °C.

[Abbildung von Xijie Luo]

In dem Temperaturbereich (15.16 °C bis -16.87) zeigte der Temperaturkompensator eine gute Leistung mit minimalen Bragg-Wellenlängenverschiebungen in den Kanälen, die innerhalb der Kompensatoren montiert waren. Das Temperaturkompensationsverhalten ist in Abbildung 6.3 dargestellt, in der auch ein unerwartetes Ergebnis zu sehen ist, nämlich geringe Schwankungen oder Leistungsverluste in den Übertragungsspektren. Es wird vermutet, dass die Feuchtigkeit die physikalischen Eigenschaften des Klebstoffs beeinflusst und zu einem Leistungsverlust geführt hat.

In der folgenden Grafik werden die vier verschiedenen Übertragungsspektren der vier Kanäle der FGB verglichen. Der Vergleich erfolgt mit den Daten aus dem gleichen Messzyklus und es ist deutlich zu erkennen, dass die Steigung der gelbe Linie von Kanal eins sehr steil ist, während die anderen drei Kanäle flach verlaufen, was bedeutet, dass der Temperaturkompensator seine Aufgabe erfüllt.

6.2. Prüfung der Funktionsweise des Prototyps

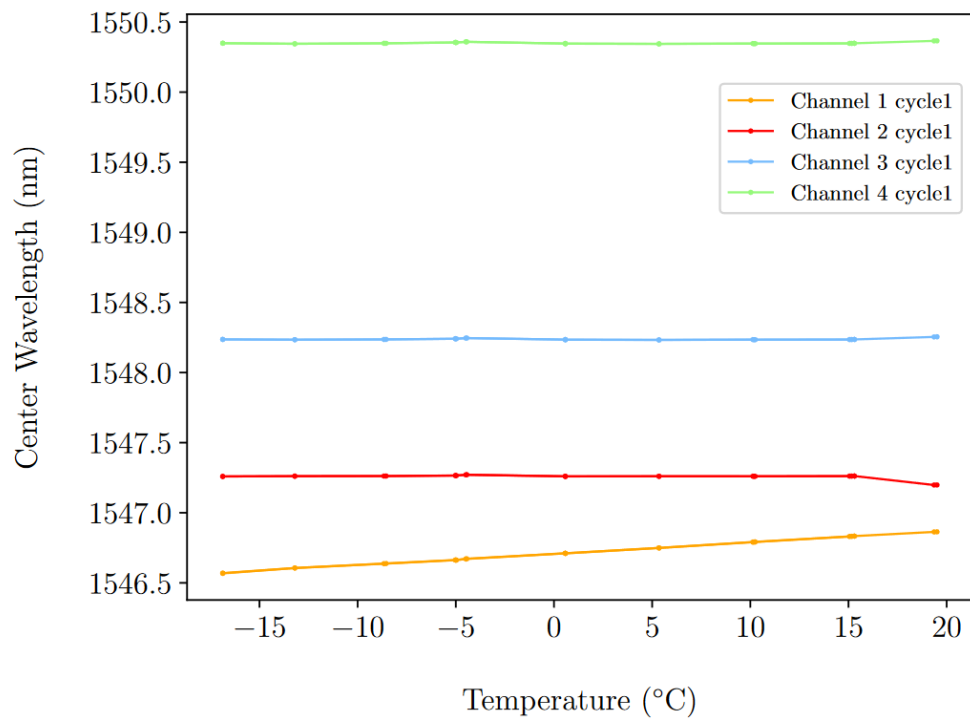


Abbildung 6.4.: Die Abbildung zeigt den Vergleich der Transmissionsspektrum aller vier Kanäle in einem Temperaturbereich von 15.16 °C bis -16.87 °C.
[Abbildung von Xijie Luo]

Veröffentlichungen, Diskussion, Zukünftige Arbeit und Fazit

Diese Masterarbeit hat bereits wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht. In diesen Kapiteln wird genau beschrieben, um welche Art von Publikationen es sich handelt und wo diese zu finden sind.

7.1. Veröffentlichungen

7.1.1. Wissenschaftliche Artikel

Athermal package for OH suppression filters in astronomy part 1: design

[32]

Carlos Enrique Rordriguez Alvarez, Aashia Rahman, Hakan Önel, Frank Dionies, Jens Paschke, Svend-Marian Bauer.

***Abstract:** We present the design of an athermal package for fiber Bragg grating (FBG) filters fabricated at our Institute for use in ground-based near-infrared (NIR) telescopes. Aperiodic multichannel FBG filters combined with photonic lanterns can effectively filter out extremely bright atmospheric hydroxyl (OH) emission lines that severely hinder ground-based NIR observations. While FBGs have the capability of filtering specific wavelengths with high precision, due to their sensitivity to temperature variations, the success in their performance as OH suppression filters depends on a suitable athermal package that can maintain the deviations of the FBG wavelengths from that of the OH emission lines within sub-picometer accuracy over a temperature range of about 40 K. (i.e. 263 K to 303 K). We aim to develop an athermal package over the aforementioned temperature range for an optical fiber consisting of multichannel FBGs for a maximum filter length of 110 mm. In this work, we demonstrate the complete design methodology of such a package. First, we developed a custom-built test rig to study a wide range of critical physical properties of the fiber, such as strain and temperature sensitivities, elastic modulus, optimum fiber pre-tension, and adhesion. This [http URL](#), we used these data to confirm the athermal response of an FBG bonded on the test rig from room temperature to 313 K. Based*

7. Veröffentlichungen, Diskussion, Zukünftige Arbeit und Fazit

on this study, we developed a computer-aided design (CAD) model of the package and analyzed its athermal characteristics with a suitable selection of materials and their nominal dimensions using finite element analysis (FEA). We finally discuss the novel aspects of the design to achieve high-precision thermal stabilization of these filters in the temperature range of interest [32].

7.1.2. Vorträge

Athermal package for OH suppression filters in astronomy part 1: design [33]

Konferenz:

SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Yokohama Japan, Juni 2024.

7.1.3. Patentanmeldung

Optisches Filtersystem zur Wellenlängenfilterung

Rodriguez, C., Rahman, A., Önel, H., Dionies, F. & Paschke, J. 2024, [34]

Nummer der Patentanmeldung

10 2024 117 500.1

7.2. Diskussion

Die Temperaturkompensation erfüllt alle Anforderungen: Die FBGs werden in einem Temperaturbereich von 20 °C bis -20 °C thermisch kompensiert, die Abweichung der Temperaturkompensation liegt im Subpikometerbereich. Trotzdem gibt es da noch Potential für eine genauere Kompensation und für eine genauere, wiederholbare und homogene Gitterbeschriftung. Um dies zu erreichen, müssen verschiedene Maßnahmen ergriffen werden:

1. Die physikalischen Eigenschaften der Glasfaser sollen mit der modernisierten Prüfanlage (siehe Abschnitt 4.3) neu bestimmt werden. Die Ergebnisse können in die Berechnungsmodelle und die FEM-Simulation eingegeben werden, um die genauen Längenabstände der Komponenten neu zu bestimmen oder eine Tendenz zu erkennen, um die Maßtoleranzen nur in einer Richtung zu definieren.
2. Eine genaue und wiederholbare Zentrierung der Glasfaser zur Klebebohrung würde zu einer genaueren und homogeneren FBG-Beschriftung führen. Hier muss ein Verfahren entwickelt werden, um die Glasfaser in der Klebestelle zu zentrieren.
3. Mit einem Spektrumanalysator mit höherer Auflösung (d.h. 10 pm) würde es möglich sein, die Wellenlängenverschiebung bei kleinerer Temperaturänderung zu beobachten und genauere Aussagen über die Kompensation zu treffen.

4. Ein Test in einem Teleskop über einen längeren Zeitraum mit Licht von einem astronomischen Objekt würde eine bessere Abschätzung der Kompensation, des Verhaltens der verschiedenen mechanischen Verbindungen und der daraus resultierenden Filterung der OH-Strahlungslinien ermöglichen.
5. Aufgrund der Robustheit des Temperaturkompensators und seiner Materialien sowie der hohen Empfindlichkeit der FBG ist es möglich, den Kompensator als Kraftaufnehmer zu verwenden, damit eine Temperaturänderung keinen Einfluss auf die gemessene Kraft haben kann.

7.3. Zukünftige Arbeiten

Luo et.al. (Manuskript in Vorbereitung zur Einreichung bei einer Fachzeitschrift) haben eine detaillierte Charakterisierung des Kompensators in einer Temperaturkammer durchgeführt. Diese Beobachtung und die Ergebnisse lassen vermuten, dass Feuchtigkeit eine entscheidende Rolle bei der Kompensation spielt, da der Klebstoff, mit dem die FBG in der Temperaturkompensator verklebt ist, seine Physikalische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit verändert. Um die Qualität der Kompensatoren in Zukunft bei einem möglichen Einsatz am Teleskop zu gewährleisten, sollte ein hermetisch dichtes Gehäuse entwickelt werden, in welches trockenes Gas, z.B. Stickstoff, einleiten kann, um vorhandene Feuchtigkeit zu entfernen; außerdem sollte das Gehäuse Platz für Silica-Beutel bieten und sicherstellen, dass bei auftretender Feuchtigkeit diese durch das Silica absorbiert wird. Das Gehäuse kann für einen oder mehrere Temperaturkompensatoren ausgelegt sein.

Das aktuelle Gewinde zwischen dem Faserhalter und der Spannvorrichtung ist M10 \times 0,75. In Zukunft sollte die Gewindesteigung auf unter 0,5 mm/Umdrehung reduziert werden, dies würde eine genauere und feinfühlere Einstellung der Vorspannung ermöglichen. Nach dem Nachjustieren der Vorspannung im Kompensator wurde festgestellt, dass die Verbindung über die M10-Gewinde nicht stabil genug ist. Die Vorspannung kann zwar eingestellt werden, aber bei kleineren Bewegungen verliert der Kompensator die Einstellung. Eine Kontermutter könnte dieses Problem lösen.

In Zukunft sollte untersucht werden, wie sich die Beschriftung von FBGs auf die physikalischen Eigenschaften der Faser auswirkt, denn es sollte eine Veränderung des E-Moduls durch die FBG-Beschriftung stattfinden, da die physikalischen Eigenschaften und die Homogenität des Glases aufgrund dieser hohen Temperatureinwirkung (UV-Laser) einen Einfluss haben sollten. Mit einem genaueren E-Modul kann man Rechenfehler minimieren und somit eine bessere Temperaturkompensation erreichen. Nach den positiven Ergebnissen des Funktionstests des Kompensators und angesichts der Tatsache, dass astronomische Instrumente heute mit mehreren hundert Glasfasern arbeiten [16], könnte die Möglichkeit untersucht werden, das gleiche Funktionsprinzip zu verwenden, um einen Kompensator zu entwickeln, bei dem mehrere Glasfasern mit

7. Veröffentlichungen, Diskussion, Zukünftige Arbeit und Fazit

FGB integriert werden können, um die Ressourcen und den Herstellungsaufwand zu reduzieren (siehe Beispiel in Abbildung 7.1).

Wie in Abbildung 7.1 dargestellt ist, kann durch eine mechanische Fixierung der Glasfaser die Zentrierung der Glasfaser besser erfüllt werden und die Gesamtposition der Glasfaser im Kompensator durch konventionelle Messmethoden besser erfasst werden.

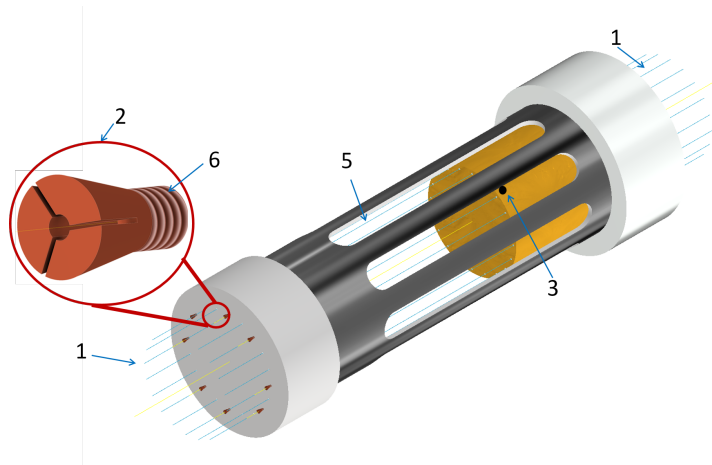


Abbildung 7.1.: Die Abbildung zeigt das mechanische Konzept eines Mehrfaser-Temperaturkompensators: (1) mehrere Glasfasern, (2) mechanische Halterung der einzelnen Glasfaser, (3) Bohrung zum Einbringen des Klebstoffs, (5) Öffnung zum Erfassen der Position der Glasfaser und zum Durchlassen des Laserstrahls für die FBG-Beschriftung, (6) Mechanismus zum Einstellen der Vorspannung der einzelnen Glasfaser.

Nach mehrmaliger Verwendung und Handhabung des Kompensators wurde festgestellt, dass eine Vorrichtung die Handhabung erleichtern könnte. Diese Vorrichtung sollte folgende Anforderungen erfüllen:

Den Kompensator sowohl horizontal als auch vertikal halten.

Die Längsachsen (Z) aller Komponenten liegen auch bei demontiertem Temperaturkompensator auf gleicher Höhe halten, um die ungeschützten Glasfasern besser und sicherer kleben zu können.

Diese Vorrichtung sollte auch die Möglichkeit bieten, die Glasfasern während des Klebevorgangs vorzuspannen oder mehrere Glasfasern vorzuspannen, falls in Zukunft mehrere Glasfasern in einem Temperaturkompensator montiert werden können. Die Vorrichtung sollte auch die Möglichkeit bieten, die Glasfasern während des Klebevorgangs in X- und Y-Richtung zu verstellen, so dass die Glasfaser mit der Klebebohrung zentriert ist, um eine genauere Beschriftung zu erreichen.

7.4. Zusammenfassung

Luo et. al. (Manuskript in Vorbereitung) zeigen, dass der Kompensator in einem Temperaturbereich von -15°C bis 16°C ein vielversprechendes Ergebnis zeigt. Die Ergebnisse dieses Versuchs werden in naher Zukunft veröffentlicht und liegen derzeit außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturkompensation, mit einem maximale Fehler von 0,6 pm erfolgt und somit die Temperaturkompensation genauer als notwendig durchgeführt wird.

Mit dem Temperaturkompensator wurde das Problem gelöst, dass die im Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) gefertigten FBG aufgrund ihrer hohen Temperaturempfindlichkeit bei Temperaturänderungen statt der gewünschten OH-Linie das „Licht der astronomischen Beobachtung“ herausfiltert.

Die Entwicklungsmethodik bzw. die Herangehensweise an das technische Problem hat zu einem Prototyp geführt, der alle Anforderungen an die Temperaturkompensation von Faser-Bragg-Gittern besser als gefordert erfüllt (siehe Abschnitt 6.2). Daraus lässt sich ableiten, dass bei der FEM-Simulation die richtigen Randbedingungen verwendet wurden, was zu den richtigen Abmessungen und Werkstoffen der einzelnen Komponenten führte. Die Entscheidung, alle Bauteile in der gleichen Werkstatt bzw. auf den gleichen Maschinen und aus exakt dem gleichen Halbzeug herzustellen, hat sich bewährt, so dass sich alle Fertigungsfehler miteinander ausgeglichen haben. Die Ergebnisse der Experimente zur Nachbildung der zukünftigen Einsatzbedingungen des Temperaturkompensators im Teleskop haben gezeigt, dass auch Feuchtigkeit einen Einfluss auf die Temperaturkompensation hat. Aus diesem Grund muss der Kompensator für den zukünftigen Einsatz vor Feuchtigkeit geschützt werden.

Der Kompensator ermöglicht eine bessere, genauere und wiederholbare Beschriftung von Faser-Bragg-Gittern. Mit einer wiederholbaren Positioniergenauigkeit von 0,2 mm und einer sehr hohe Wiederholbarkeit der Vorspannung vor und nach der FBG Beschriftung. Für das gesamte neue optische Filtersystem wurde das Patent [34] mit der Nummer 10 2024 117 500.1 beantragt.

Literatur

- [1] K. O. Hill. „Aperiodic Distributed-Parameter Waveguides for Integrated Optics“. In: *Appl. Opt.* 13.8 (Aug. 1974), S. 1853–1856. doi: 10.1364/AO.13.001853. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-13-8-1853>.
- [2] V.I. Krassovsky und M.V. Shagaev. „On the nature of hydroxyl airglow“. In: *Planetary and Space Science* 25.5 (1977), S. 509–510. ISSN: 0032-0633. doi: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(77\)90083-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90083-6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032063377900836>.
- [3] Axel Bertholds und René Dändliker. „Determination of Individual Strain-Optic Coefficients in Single-Mode Optical Fibers“. In: *Lightwave Technology, Journal of* 6 (Feb. 1988), S. 17–20. doi: 10.1109/50.3956.
- [4] GW Yoffe u. a. „Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings“. In: *Applied optics* 34.30 (1995), S. 6859–6861. doi: 10.1364/AO.34.006859. URL: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-34-30-6859>.
- [5] T Iwashima u. a. „Temperature compensation technique for fibre Bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes“. In: *Electronics letters* 33.5 (1997), S. 417–419. doi: 10.1049/el:19970289. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/abs/10.1049/el3A19970289>.
- [6] Sylvain Magne u. a. „State-of-strain evaluation with fiber Bragg grating rosettes: application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors“. In: *Applied Optics* 36 (Dez. 1997), S. 9437–9447. doi: 10.1364/AO.36.009437.
- [7] Philippe Rousselot u. a. „Night-sky spectral atlas of OH emission lines in the near-infrared“. In: *Astronomy and Astrophysics* 354 (Jan. 2000), S. 1134–1150.
- [8] Yonglin Huang u. a. „Temperature compensation package for fiber Bragg gratings“. In: *Microwave and Optical Technology Letters* 39.1 (2003), S. 70–72. doi: <https://doi.org/10.1002/mop.11130>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.11130>.
- [9] M. F. Skrutskie u. a. „The Two Micron All Sky Survey (2MASS)“. In: *AJ* 131.2 (Feb. 2006), S. 1163–1183. doi: 10.1086/498708.

Literatur

- [10] Weiping Yan u. a. „Passive temperature compensation package for fiber Bragg grating“. In: *2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*. Bd. 6150. SPIE. 2006, S. 844–849. DOI: 10.1117/12.676531. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6150/1/Passive-temperature-compensation-package-for-fiber-Bragg-grating/10.1117/12.676531.full>.
- [11] Aashia Rahman und Asokan Sundarrajan. „Simultaneous measurement of strain and temperature using type I and pre-strained fiber Bragg gratings“. In: *SENSORS/2009 IEEE*. 2009, S. 1229–1231. DOI: 10.1109/ICSENS.2009.5398371.
- [12] A. Rahman u. a. „Nanoindentation study on germania-doped silica glass pre-forms: evidence for the compaction-densification model of photosensitivity“. In: *Optics Letters* 34.16 (Aug. 2009), S. 2414. DOI: 10.1364/OL.34.002414.
- [13] S. Ellis u. a. „GNOSIS: An OH suppression unit for near-infrared spectrographs“. In: *Proc SPIE* 7735 (Juli 2010). DOI: 10.1117/12.856348.
- [14] Paulo Antunes u. a. „Mechanical Properties of Optical Fibers“. In: Feb. 2012. ISBN: 978-953-51-0091-1. DOI: 10.5772/26515.
- [15] M. D. Marinković, M. Z. Zehn und M. Milić. „On the design of thermally loaded fiber optics feedthroughs“. In: *Thermal Science* 20.16 (Dez. 2016), S. 1320. DOI: 10.2298/TSCI16S5313M.
- [16] R. S. de Jong u. a. „4MOST: Project overview and information for the First Call for Proposals“. In: *The Messenger* 175 (März 2019), S. 3–11. DOI: 10.18727/0722-6691/5117.
- [17] AOS GmbH. *Athermalisation for FBGs*. <https://www.aos-fiber.com>. accessed: 2024-12-08. 2020.
- [18] Inc. 1999-2024 Thorlabs. *Balldrivers Hex Keys*. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1407. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [19] Glasfaserkabel.de 2024. *Abbildung Grundsätzlicher Aufbau der Lichtwellenleiter*. https://www.glasfaserkabel.de/Der-Unterschied-zwischen-Singlemode-und-Multimode-LWL-Kabeln:_:13.html. accessed: 2024-10-05. 2024.
- [20] LUMITOS AG. *Querkontraktionszahl*. <https://www.chemie.de/lexikon/Poissonzahl.html>. accessed: 2024-12-05. 2024.
- [21] Inc. ANSYS. *Mesh Sweeping, Release 2024 R2*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=../../../../Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/ds_Mesh_Sweeping.html. accessed: 2024-11-20. 2024.
- [22] 2024 Henkel AG & Co. *Sekundenkleber*. <https://www.pattex.de/products/static-landingpages/product-ranges/sekundenkleber.html>. accessed: 2024-11-29. 2024.

- [23] Newport Corporation. *Vertical Linear Stage, Dovetail, 3 mm Travel, 25 x 25 mm Platform, M2 and M4 Model: M-DS25-Z*. <https://www.newport.com/p/M-DS25-Z>. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [24] Yokogawa Test& Measurement Corporation. *AQ6375B Optischer Spektrumanalysator*. https://t.ly/P9_GS. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [25] Burde & CO GmbH. *Datenblatt Ausdehnungskoeffizient von Messinglegierung: CuZn37*. <https://shorturl.at/zfIfw>. accessed: 2024-11-14. 2024.
- [26] ME-Meßsysteme GmbH. *Kraftsensor KD34s-5N*. https://www.me-systeme.de/de/pdf/1730/KD34s_5N. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [27] Kloeckner Metals Germany GmbH. *Datenblatt Ausdehnungskoeffizient von Aluminiumlegierung: AW-6082 (3.2315) AlSi1MgMn*. <https://facts.kloeckner.de/werkstoffe/aluminium/3-2315/>. accessed: 2024-11-14. 2024.
- [28] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. *konfokal sensor IFS2405*. <https://www.micro-epsilon.de/abstandssensoren/konfokale-sensoren/sensoren/universalsensoren>. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [29] InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik. *Infrarotstrahlung*. <https://www.infratec.de/sensorik/>. accessed: 2024-04-12. 2024.
- [30] opelink. *48CH Compact Package Athermal AWG Module, Guassian AAWG DWDM module*. <https://www.opelink.com/48ch-compact-package-athermal-awg-module-guassian-aawg-dwdm-module-high-channel-isolation-flat-top-aawg-use-to-dwdm-network-p00530p1.html>. accessed: 2024-12-08. 2024.
- [31] IDIL Fibres Optiques. *Fiber Bragg Gratings*. <https://www.idil-fibres-optiques.com/>. accessed: 2024-12-08. 2024.
- [32] Carlos E. Rodriguez Alvarez u. a. „Athermal package for OH suppression filters in astronomy part 1: design“. In: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation VI*. Hrsg. von Ramón Navarro und Ralf Jedamzik. SPIE, Aug. 2024, S. 90. doi: 10.1117/12.3017699. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.3017699>.
- [33] Carlos Rodriguez Alvarez u. a. „Athermal package for OH suppression filters in astronomy: Part 1. Design“. In: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation VI*. Hrsg. von Ramón Navarro und Ralf Jedamzik. Bd. 13100. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Aug. 2024, 131002H. doi: 10.1117/12.3017699.
- [34] Carlos Rodriguez u. a. *Optisches Filtersystem zur Wellenlängenfilterung*. Deutsches Patent- und Markenamt, Patent application no. 10 2024 117 500.1. Juni 2024.
- [35] RUBIX. *543-551D Messuhr digital*. <https://www.micro-epsilon.de/abstandssensoren/konfokale-sensoren/sensoren/universalsensoren>. accessed: 2024-11-29. 2024.

Literatur


- [36] By Sakurambo. *Abbildung Funktions Prinzip Faser-Bragg-Gitter*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=18248811>. accessed: 2024-10-05. 2024.
- [37] At Grating Technologies. *Athermal Packaged FBG*. <https://www.atgrating.com/products/athermal-packaged-fbg.html>. accessed: 2024-12-08. 2024.
- [38] Inc. Thorlabs. *ASE730 - 30 mW, 1530-1610 nm ASE Test Source*. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=ASE730>. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [39] Inc. Thorlabs. *Flexure Stage Accessories Simplified Fiber Clamp HFF003*. <https://www.thorlabs.com>. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [40] Inc. Thorlabs. *Single Mode Fiber Optic Circulators*. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=373. accessed: 2024-11-29. 2024.
- [41] Inc. Thorlabs. *Temperature-Controlled Mini-Series Breadboard*. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=12149&pn=PTC1/M. accessed: 2024-11-29. 2024.

Anhang **A**


Datenblätter

Nachfolgend sind die Datenblätter der verwendeten Geräte angehängt.

A.1. Datenblatt Glasfaser GF



**Photosensitive Single Mode
Fiber: 1500 - 1600 nm**



Description


Thorlabs' high-performance fibers were designed to reduce grating-writing times associated with industry-standard telecommunication fiber and can be easily spliced.

GF1

Specifications

Geometrical and Mechanical Specifications	
Clad Diameter	125 ± 1.5 μm
Coating Diameter	250 ± 20 μm
Core Diameter	9.0 μm
Core-Clad Concentricity	<0.5 μm
Coating/Clad Offset	≤5 μm
Coating Material	UV Cured, Dual Acrylate
Operating Temperature	-55 to 85 °C
Short-Term Bend Radius	≥12 mm
Long-Term Bend Radius	≥25 mm
Proof Test Level	≥100 kpsi (0.7 GN/m ²)

Optical Specifications	
Numerical Aperture (Nominal)	0.13
Operating Wavelength (Nominal)	1500 - 1600 nm
Mode Field Diameter	9.3 ± 0.5 μm @ 1310 nm 10.5 ± 1.0 μm @ 1550 nm
Second Mode Cutoff	1260 ± 75 nm



Specifications Subject
to Change without Notice

April 11, 2024
 TTN051526-S01, Rev F
www.thorlabs.com/contact

A.2. Datenblatt UV Laser



INNOVA Sabre MOTOFREd				
Output Power Specifications	SHG ¹		Fundamental ²	
	Wavelength (nm)	Power (W)	Wavelength (nm)	Power (W)
			Multiline Visible	20.0
	264.3	0.10	528.7	1.0
	257.2	1.00	514.5	8.0
	248.2	0.30	496.5	2.4
	244.0	0.50	488.0	6.5
	238.2	0.10	476.5	2.0
	229.0	0.04	457.9	1.2
			Multiline UV ³	3.0
			363.8 ⁴	1.0
			351.1 ⁵	1.0
Beam Parameters ⁴	SHG		Fundamental (514.5 nm)	
	Beam Diameter (mm)	0.6-0.9 ⁵	1.8 ⁶	
	Beam Divergence ⁷ (mrad)	0.5-0.85	0.35	
	Output Polarization	100:1 horizontal	100:1 vertical	
	Power Stability ⁸	±1.0%	±0.5%	

¹ At time of purchase, customer must indicate which frequency-doubled wavelength is to be factory-tested and guaranteed. Guaranteed performance at additional wavelengths is available at a supplementary charge to cover optics (where required) and testing.
² Fundamental output power is guaranteed for Multiline Visible, 514.5 and 488.0 nm wavelengths. Guaranteed performance at additional wavelengths is available at a supplementary charge to cover optics (where required) and testing.
³ Additional optics and supplementary charge required for guaranteed performance at Multiline UV, 351.1 and 363.8 nm.
⁴ Beam parameter values are typical.
⁵ Beam diameter measured at 1/e² points 1 m from output bezel.
⁶ Beam diameter measured at 1/e² points at the output coupler.
⁷ Full-angle measurement.
⁸ Performance in light regulation with PowerTrack™ over a 30-minute period following a one-hour warm-up.

		Specifications
Utility and Environmental Requirements	Input Power	3-phase with ground
	Voltage	480 ±10% vac, 50 or 60 Hz
	Maximum Current Draw	70 amp/phase @ 480 vac
	Recommended Plant Water Temperature	≤25°C
	Recommended Plant Water Pressure	150 kPa (22 psi)
	Purge	0.5-1.0 SCFH (Standard Cubic Feet per Hour) Scientific Grade N ₂ -99.999%
	System Weights	
Laser Head	Crated 213 kg (470 lb), Uncrated 122 kg (270 lb)	
Power Supply ³	Crated 134 kg (295 lb), Uncrated 107 kg (235 lb)	
Heat Exchanger	Crated 102 kg (225 lb), Uncrated 75 kg (165 lb)	

COHERENT.

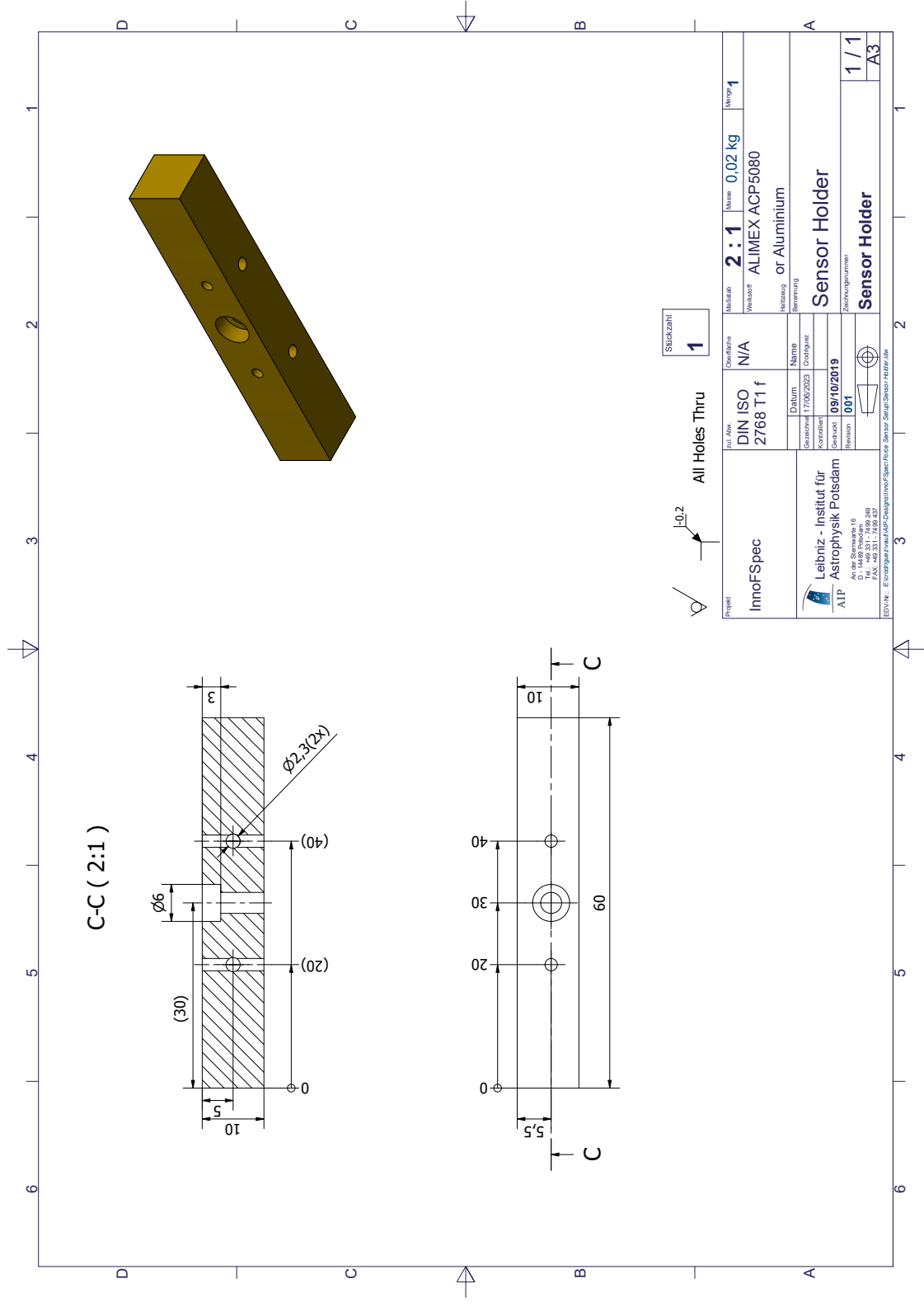
Anhang **B**

Prüfstand Zeichnungen

Nachfolgend sind alle technischen Zeichnungen , die für die Herstellung der verschiedenen Komponenten des Prüfstands erforderlich sind.

B. Prüfstand Zeichnungen

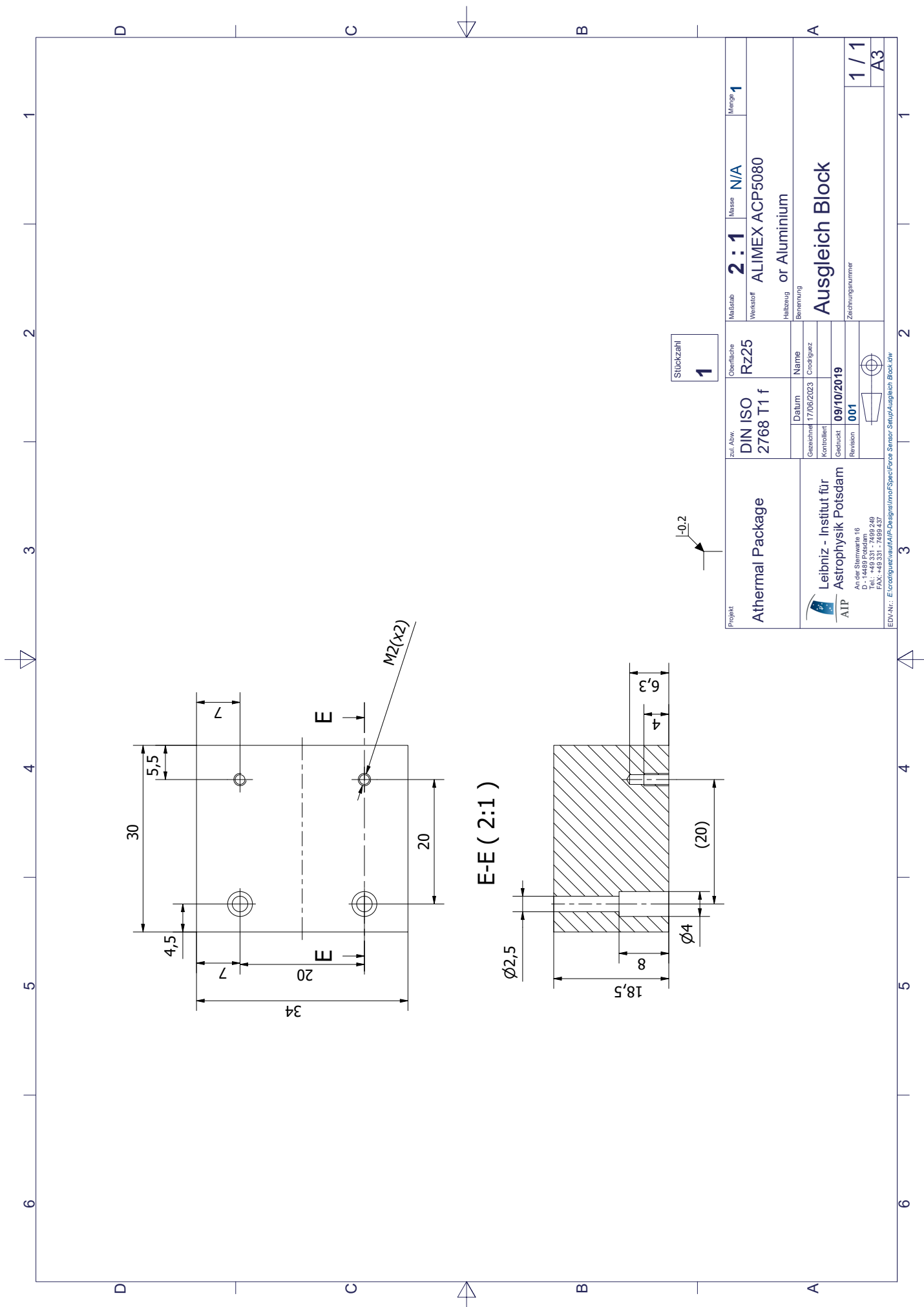
B.1. Entwickelte Komponenten für den Experimentaufbau



Stückzahl
1

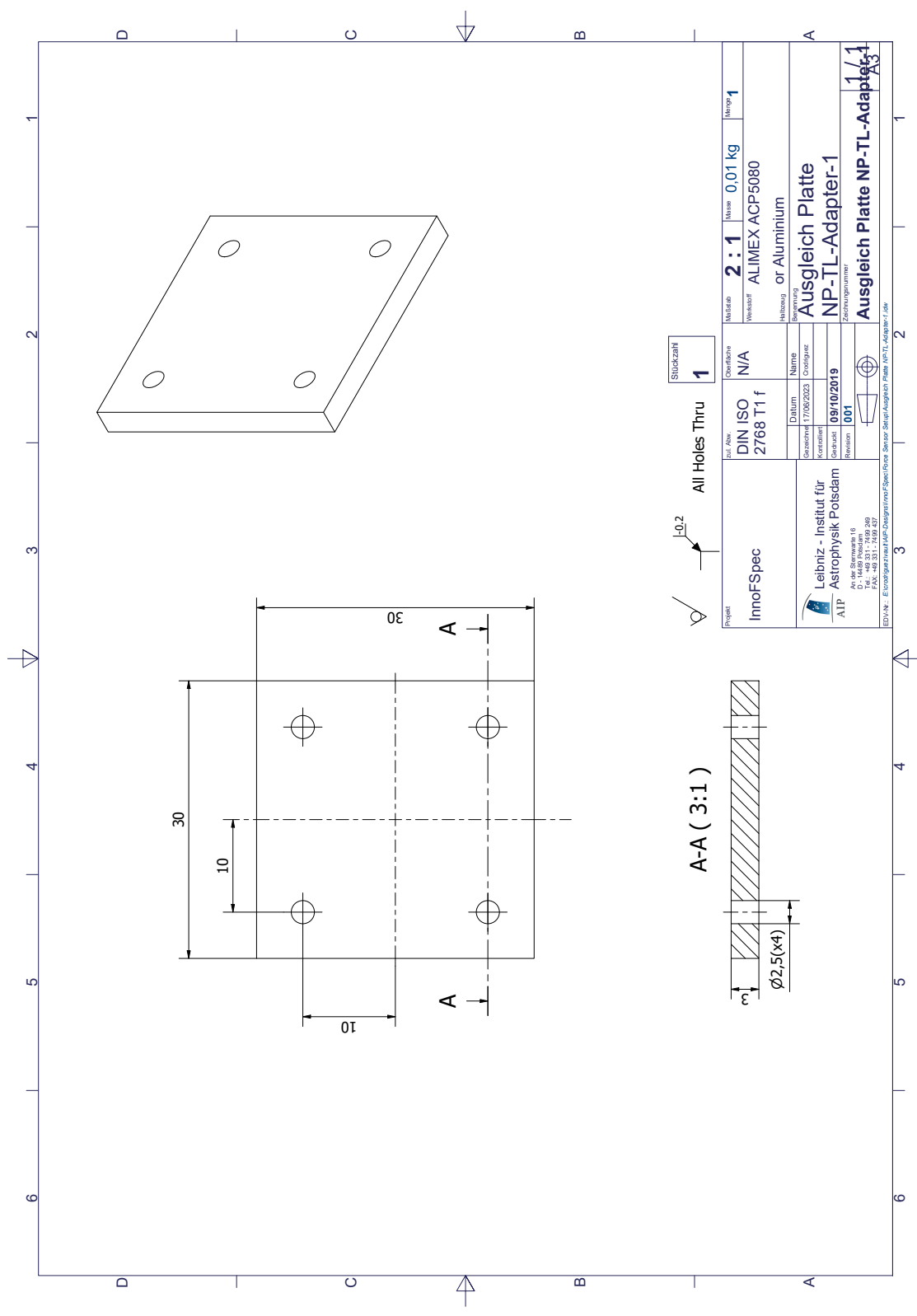
h0.2
All Holes Thru

Projekt InnoFSpec	Teil-Nr. DIN ISO 2768 T1 f	Überfläche N/A	Material 2 : 1	Masse 0,02 kg	Menge 1
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam An der Sternwarte 16 10782 Potsdam Tel.: +49 331 7209 240 Fax: +49 331 7209 237 <small>© INVAK - Fotogrammetrie/Geographie/InnoFSpec/Forschung/Sensor/Holder.dwg</small>		Datum 09/10/2019	Werkstoff ALIMEX ACP5080	Benennung Sensor Holder	
		Gezeichnet 001	Herzeugung or Aluminium		Zichungsnummer 1 / 1
		Kontrolliert 001			Sensor Holder
		Geprüft 001			A3



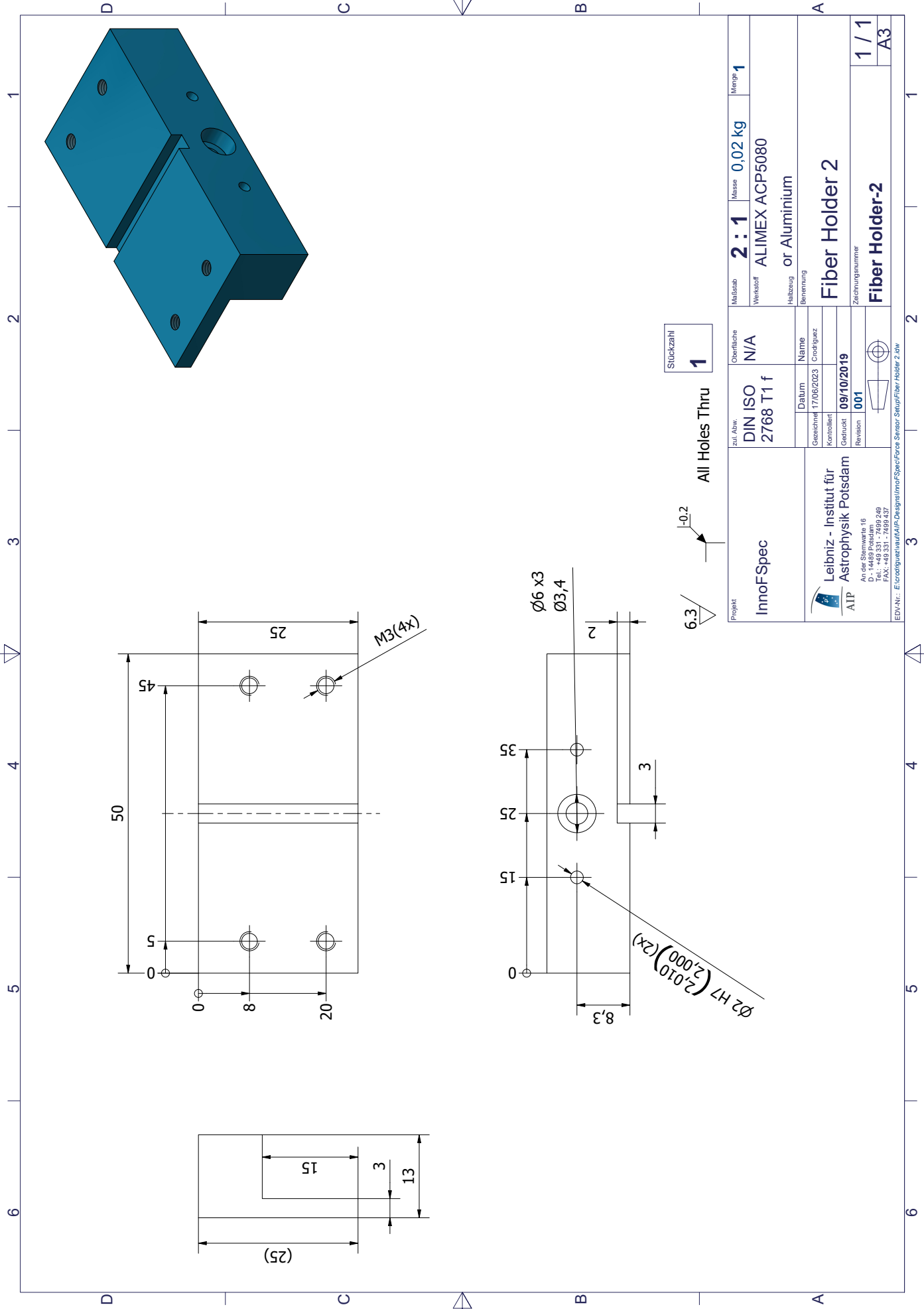
Stückzahl
1

Projekt Athermal Package		Zul. Anw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberfläch. Rz25	Masstab 2:1	Masse N/A	Menp 1
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam Am Neuen Steinweg 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437		Gezeichnet 09/10/2019	Name 001	Werkstoff ALIMEX ACP5080		Benennung Ausgleich Block
		Datum 17/06/2023	Creditzug	Halbzug or Aluminium		
		Gezeichnet 09/10/2019	Gezeichnet 001	Zerlegung		Zerlegungsnummer 1 / 1
		Gezeichnet 09/10/2019	Gezeichnet 001	Zerlegung		Zerlegungsnummer A3
EDV-Nr.: E:\crodriguez\traut\AIP-Design\InnerFSpec\Force Sensor\Stairp\Ausgleich Block.dwg						



R0.2
 All Holes Thru
 Stückzahl **1**

Projekt	InnoFSpec	Titel / Name	DIN ISO 2768 T1 f	Charakteristik	N/A	Material	2 : 1	Masse	0,01 kg	Menge	1
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam An der Sternwarte 18 10782 Potsdam Tel.: +49 331 7209 240 Fax: +49 331 7209 237 E-Mail: Erstange@astro.ipu.edu	Standort	7/02/2023	Geographie	Version	09/10/2019	Werkstoff	ALIMEX ACP5080	Herstellung	or Aluminium	Zeichnungsnummer	
	Ausgleich Platte										
	NP-TL-Adapter-1										
	Ausgleich Platte NP-TL-Adapter-1										



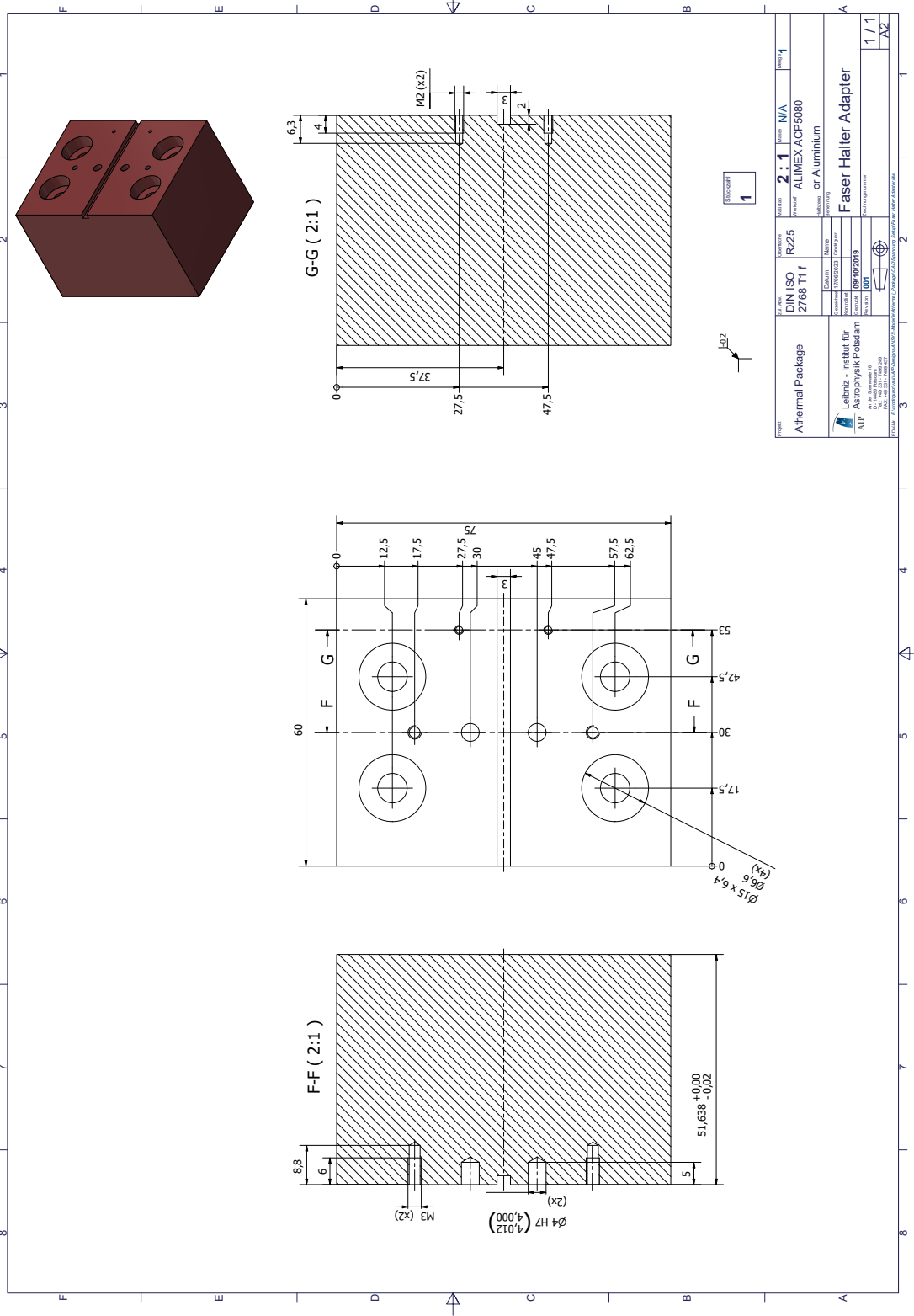
Stückzahl **1**

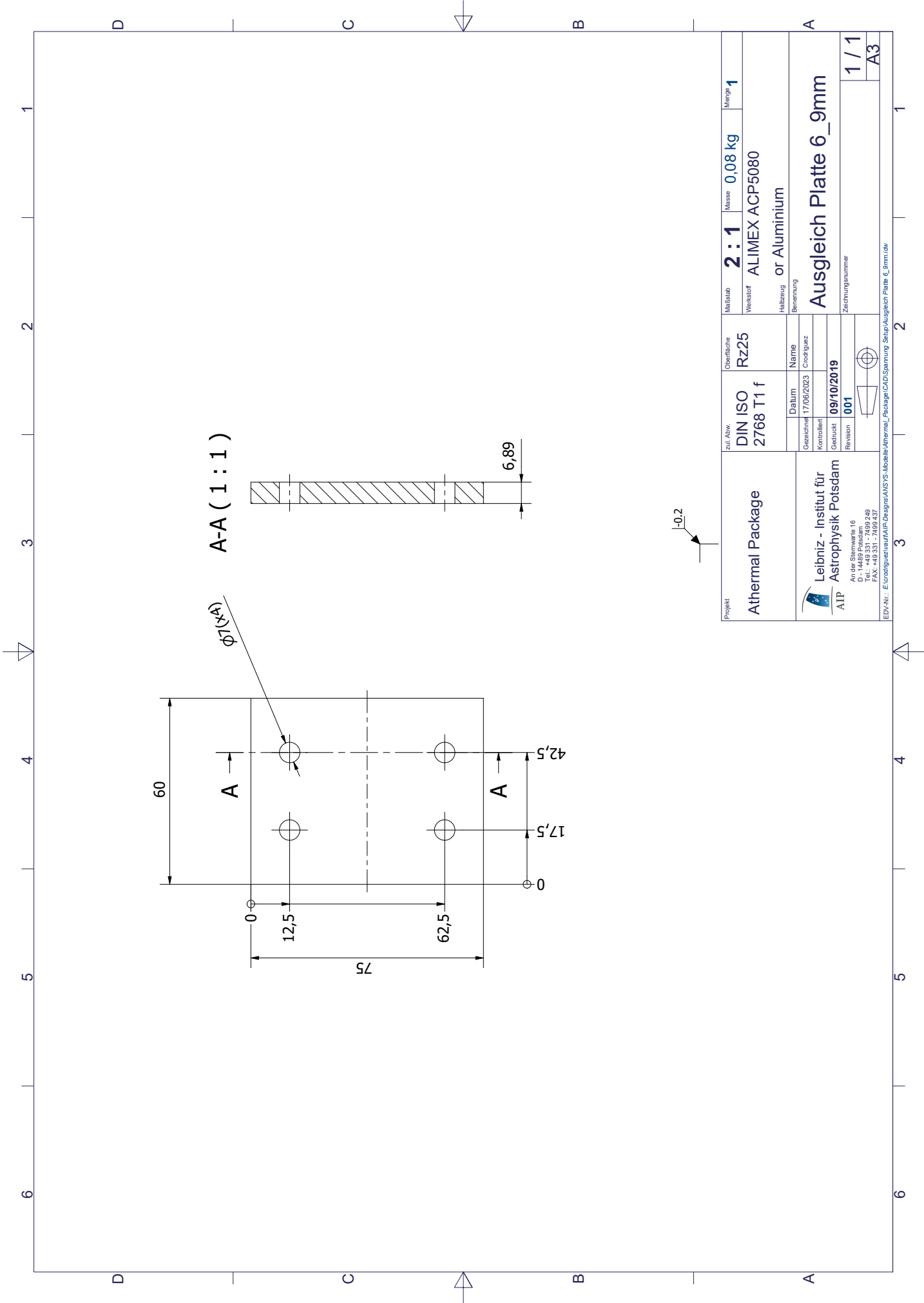
All Holes Thru

6.3
|-0,2

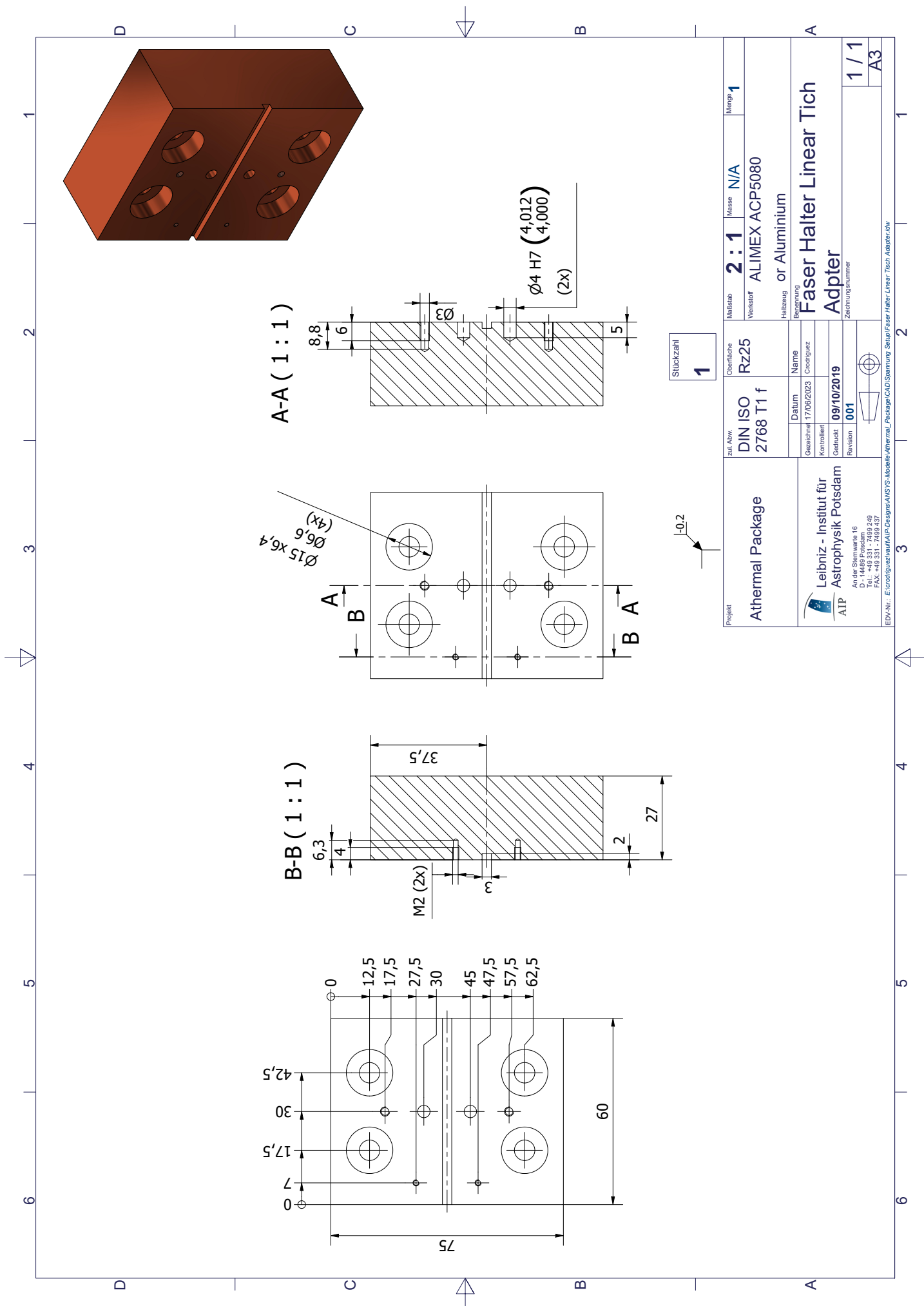
Projekt InnoFSpec	Zul. Abw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberflächliche N/A	Material 2 : 1	Masse 0,02 kg	Menge 1
	Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam Am Neuen Steinweg 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437		Werkstoff ALIMEX ACP5080	Halbzeug or Aluminium	
Datum 17/06/2023		Name Fiber Holder 2			
Gezeichnet 09/10/2019		Gezeichnet 001			
Geprüft 001		Geprüft 001			
Revisur		Revisur			
Zuzeichnung Fiber Holder 2		Zuzeichnung 1 / 1			
EDV-Nr.: E:\crodriguez\AIP-Design\InnoFSpec\Force Sensor\Setup\Fiber Holder 2.dwg		Zuzeichnung Fiber Holder-2			

B.2. Modernisierter Prüfstand zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von Glasfasern des Typs GF1 mit FBG-Beschichtung





Projekt Athermal Package	Zul. Abw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberflächliche Rz25	Maßstab 2 : 1	Masse 0,08 kg	Menü 1
	Verstärker ALIMEX ACP5080				
Projekt Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam Am Neuen Steinweg 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437 EDV-Nr.: E:\crodriguez\vauf\AIP_Design\ANSYS-Mobile\Athermal_Package\CAD\Spannung_Seriep\Ausgleich_Platte_6_9mm.dwg	Datum 09/10/2019	Name Crodriguez	Halbzug or Aluminium		
	Gezeichnet 001	Kontrolliert	Benennung Ausgleich Platte 6_9mm		
	Geprüft	Gezeichnet	Zählung 1 / 1		
	Revisoren	Revisoren	A3		



Stückzahl
1

Projekt Athermal Package	Zul. Abw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberfläche Rz25	Maßstab 2:1	Masse N/A	Menp. 1
	Datum 17/06/2023		Verstärkter Werkstoff ALIMEX ACP5080		
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam Am Neuen Stern 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437	Gezeichnet 09/10/2019	Name Adpfter	Herstellung or Aluminium		Zählung Faser Halter Linear Tich
	Kontrolliert	Creditzug	Benennung		
	Geprüft	Revisions	Zählung		1 / 1
	Revisions	Revisions	Zählung		A3
EDV-Nr.: E:\crodgruer\au\AIP-Design\ANSYS-Mobile\Athermal_Package\CAD\Spannung_Schup\Faser_Halter_Linear_Tich_Adapter.dwg					

B. Prüfstand Zeichnungen

Anhang C

Fertigungszeichnungen

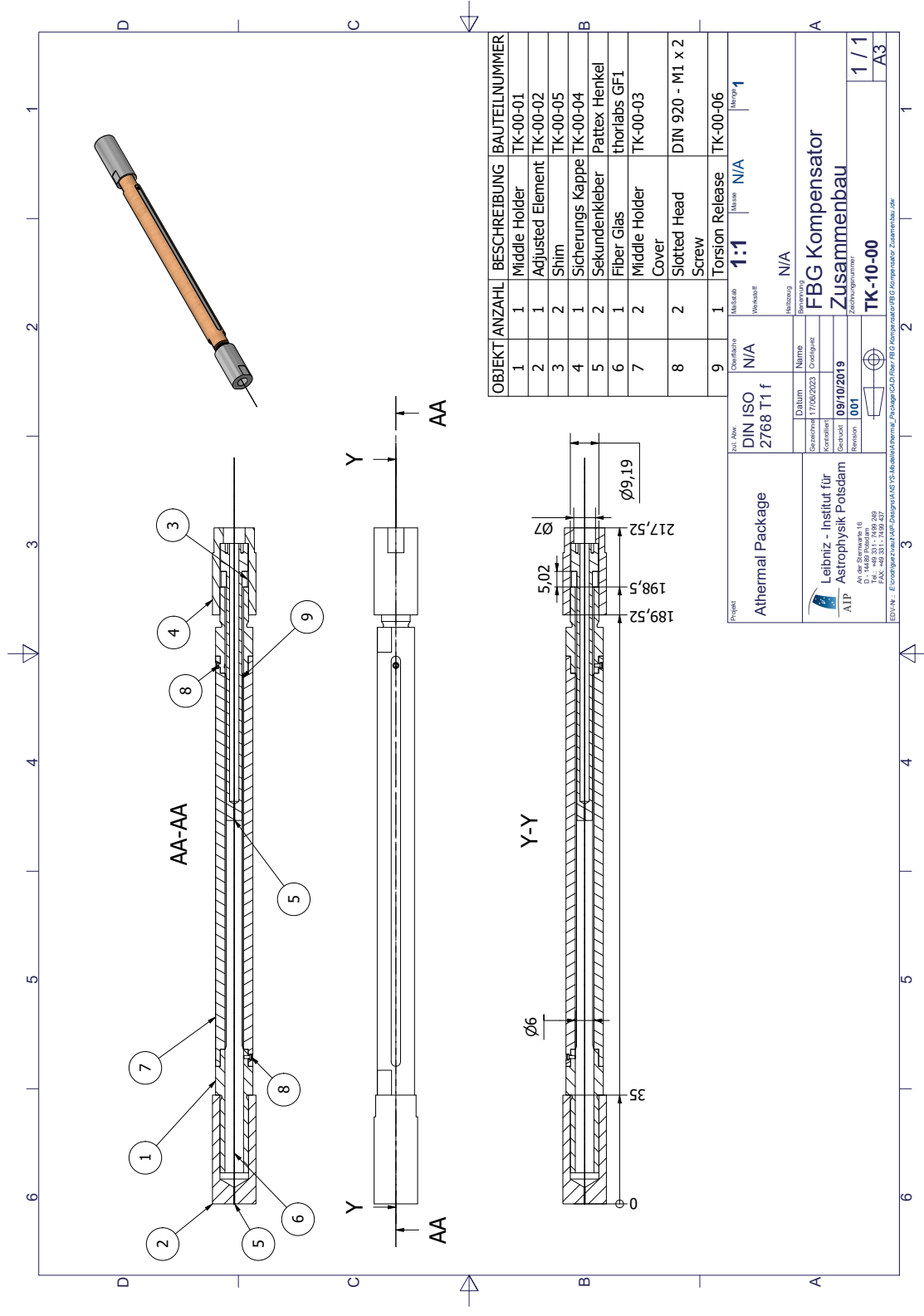
Nachfolgend sind alle technischen Zeichnungen, die für die Herstellung des Temperaturkompensators erforderlich sind.

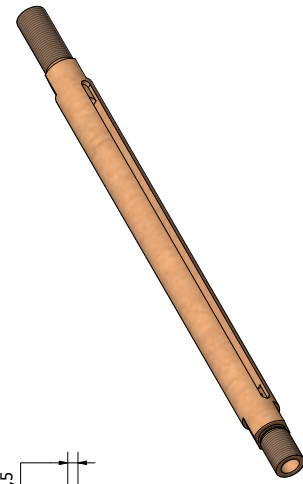
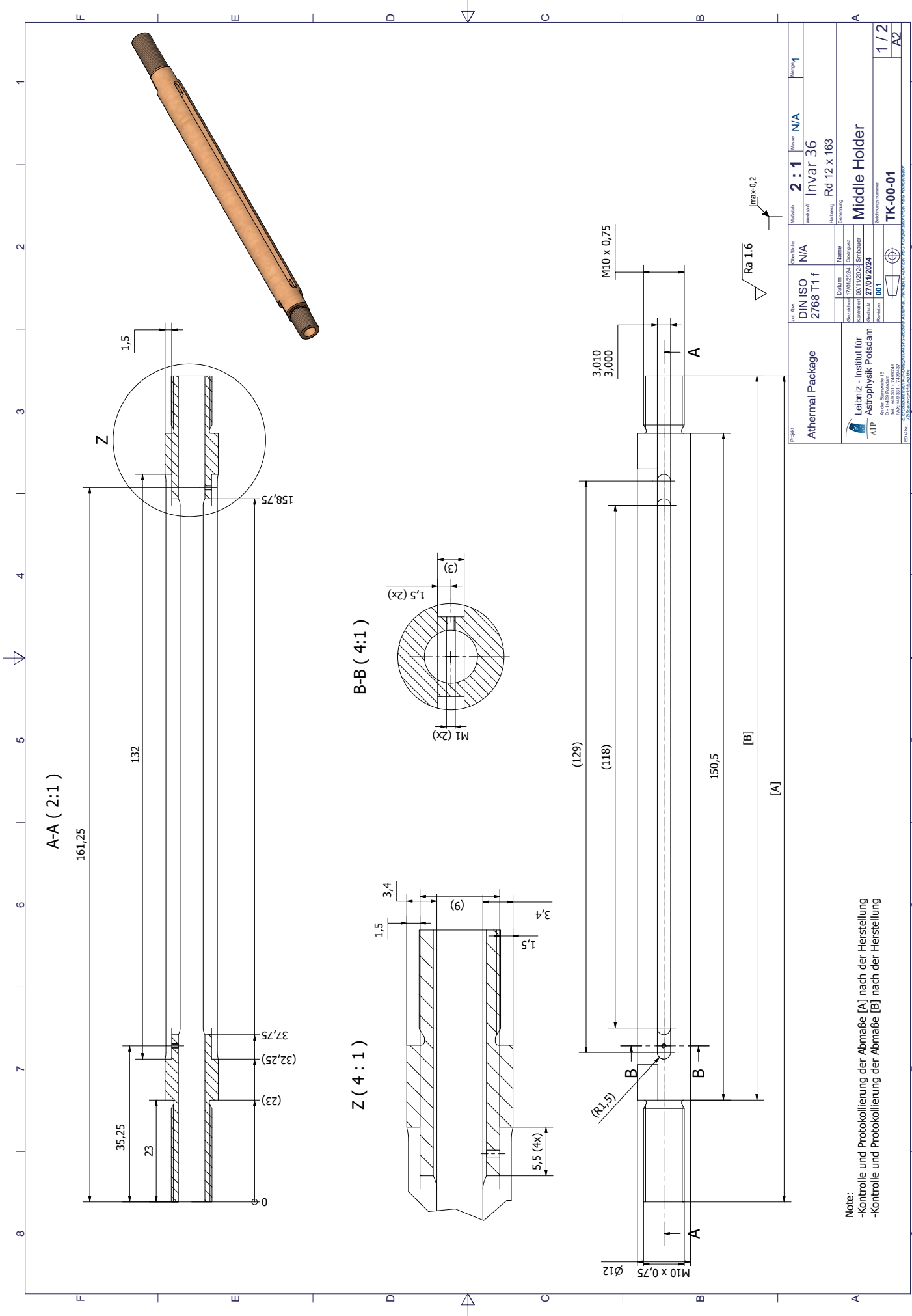
C. Fertigungszeichnungen

XXX

XXX

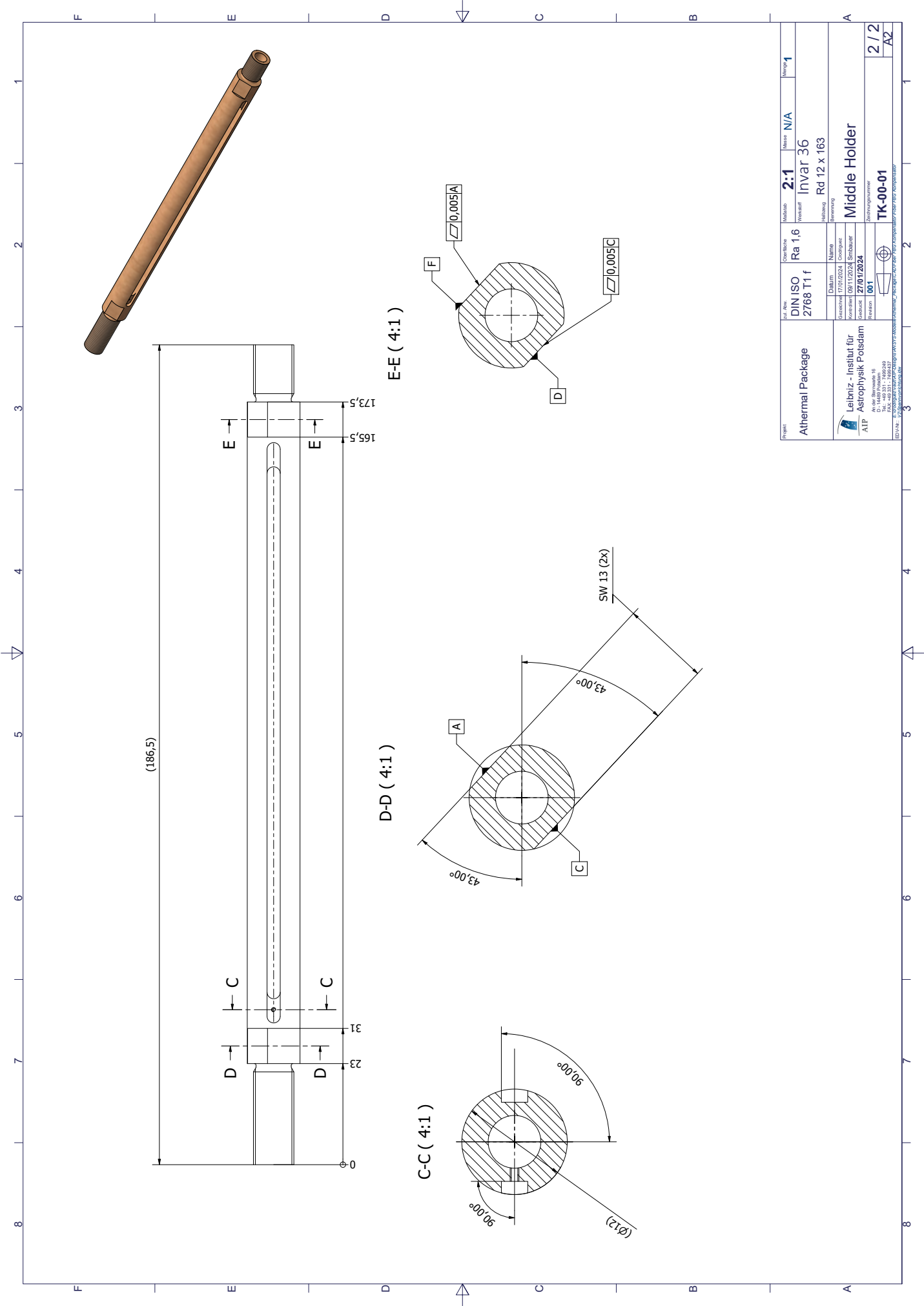
C.1. Fertigung Zeichnung des Temperaturkompensators



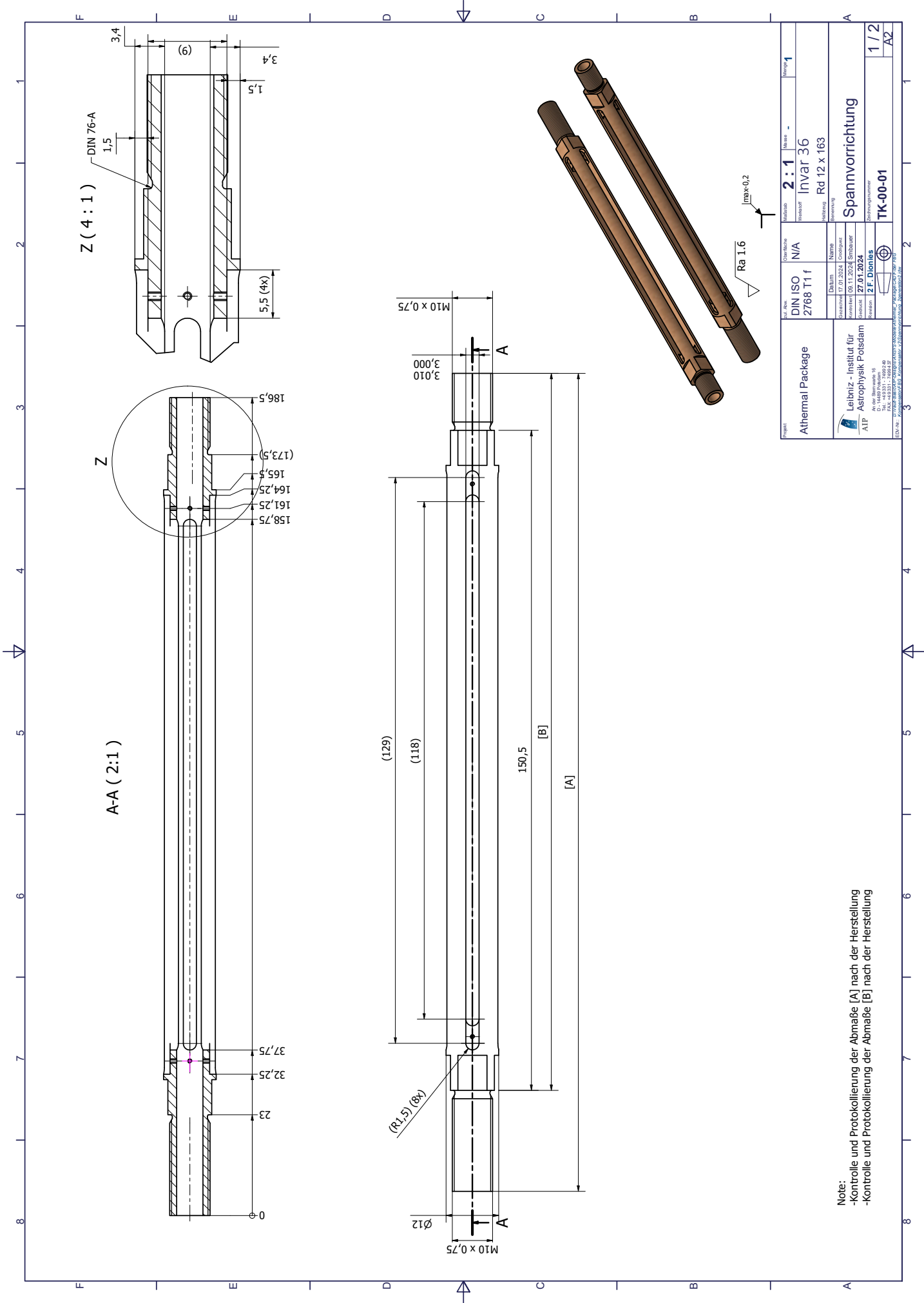


Projekt Athermal Package		Zust. / Rev. DIN ISO 2768 T1 f		Maßstab 2 : 1		Messgröße N/A		Menge 1	
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam D 14475 Potsdam 10 FAK 481311-788419 leibniz-aip.de		Gezeichnet 08/11/2024		Vorgezeichnet 08/11/2024		Kontrolliert 27/01/2024		Gezeichnet 08/11/2024	
TK-00-01		Zeichnungsnummer		Mittelwert		Invar 36		Rd 12 x 163	
1/2		Blattnummer		TK-00-01		Middle Holder		Revision	
A2		Blattgröße		TK-00-01		Middle Holder		Revision	

Note:
-Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [A] nach der Herstellung
-Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [B] nach der Herstellung



Projekt Athermal Package	Zul. Norm DIN ISO 2768 T1 f	Überfläche Ra 1,6	Maßstab 2:1	Maße N/A	Maßstab 1
	Gezeichnet 09/11/2024	Gezeichnet 09/11/2024	Konstrukt Schäfer	Material Invar 36	Material Rd 12 x 163
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam D. 14476 Potsdam FAK. 44-331 - 740419 E-Mail: ip@iap-potsdam.de Web: www.iap-potsdam.de	Gezeichnet 27/01/2024	Gezeichnet 27/01/2024	Gezeichnet Schäfer	Middle Holder	
	Revision 001	Revision 001	Revision 001	Zeichnungsnummer TK-00-01	Blatt 2 / 2
<small>IPD/FAK: ip@iap-potsdam.de www.iap-potsdam.de © 2024 Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam</small>					A2



A-A (2:1)

Z (4:1)

DIN 76-A

- 186,5
- (173,5)
- 165,5
- 164,25
- 161,25
- 158,75

- (129)
- (118)
- 150,5
- [B]
- [A]

M10 x 0,75

M10 x 0,75

(R1,5) (8 γ)

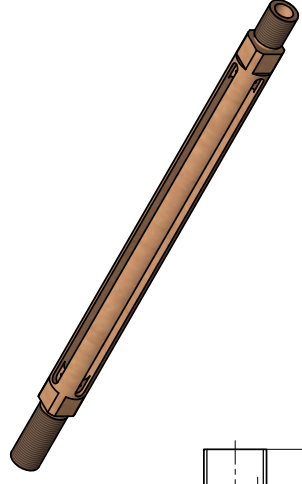
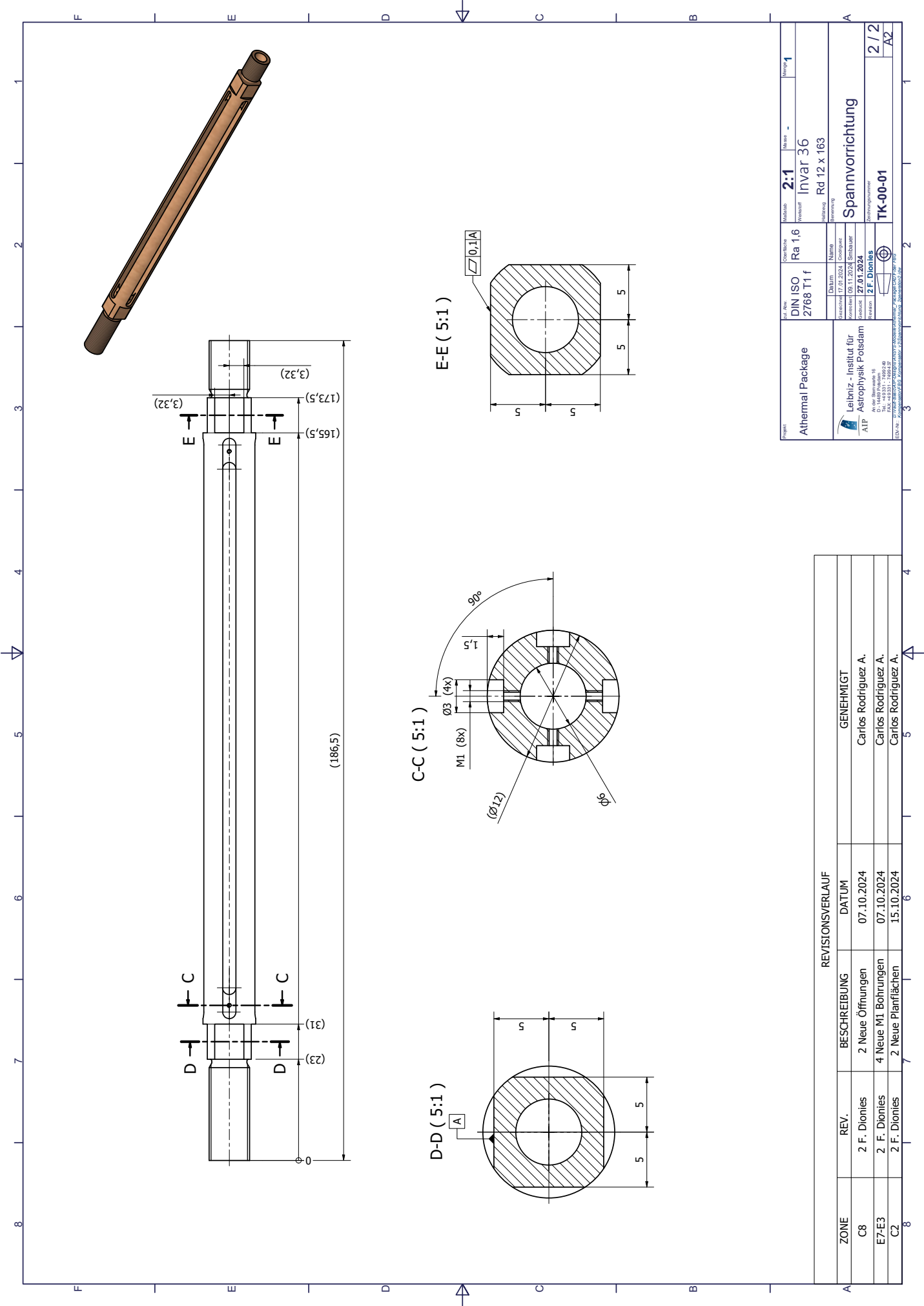
3,010

Ra 1.6

Imax=0.2

Note:
-Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [A] nach der Herstellung
-Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [B] nach der Herstellung

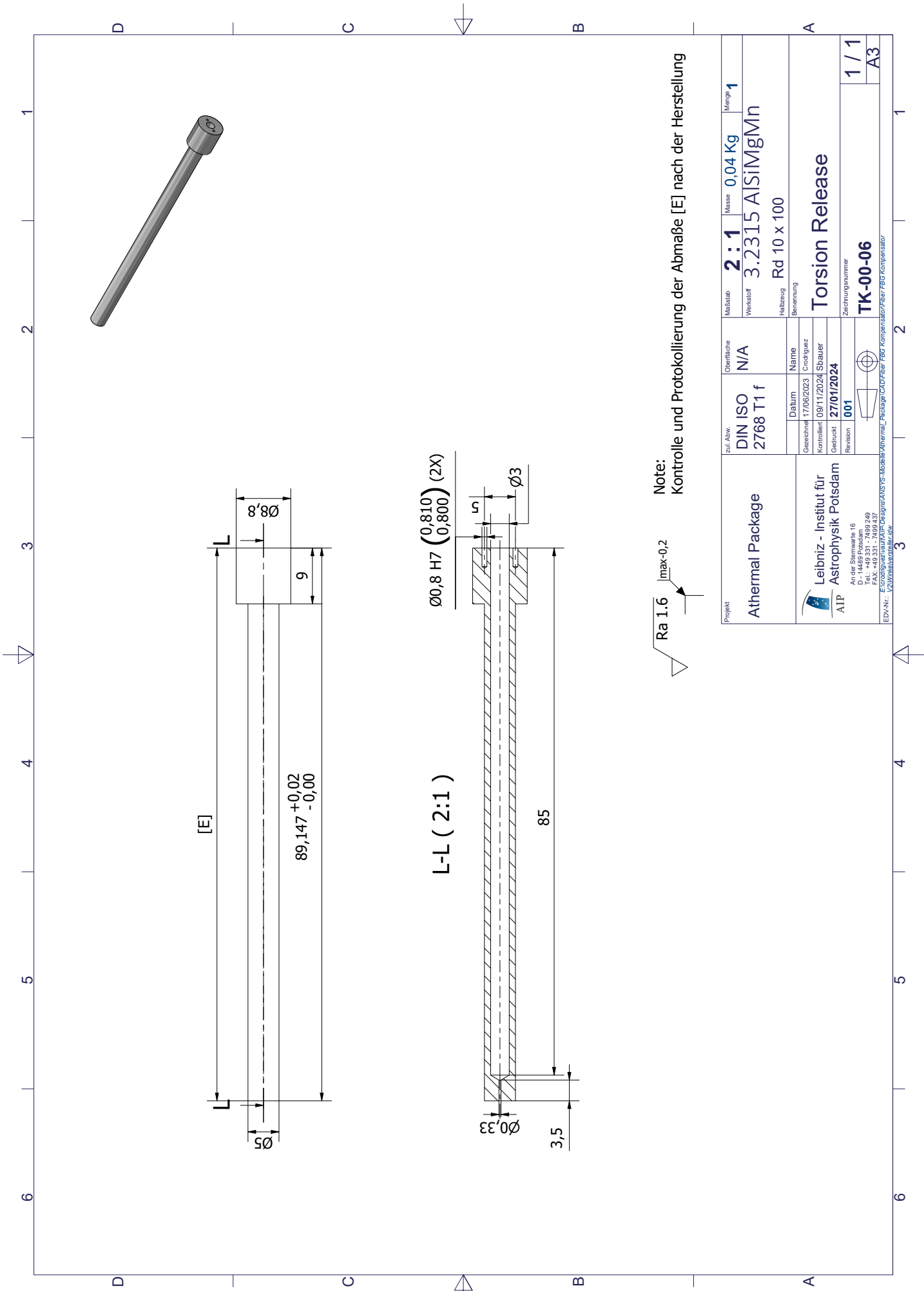
Projekt		Material		Maßstab		Menge	
Athermal Package		DIN ISO 2768 T1 f		2:1		1	
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam		N/A		Invar 36		Rd 12 x 163	
D. Müller-Pedersen P.O. Box 107 D-14481 Potsdam Tel. +49 30 9309 3100 Fax. +49 30 9309 3101		DIN Norm		Benennung		Spannvorrichtung	
DIN 76-A		DIN 76-A		TK-00-01		1/2	
A2		A2		A2		A2	



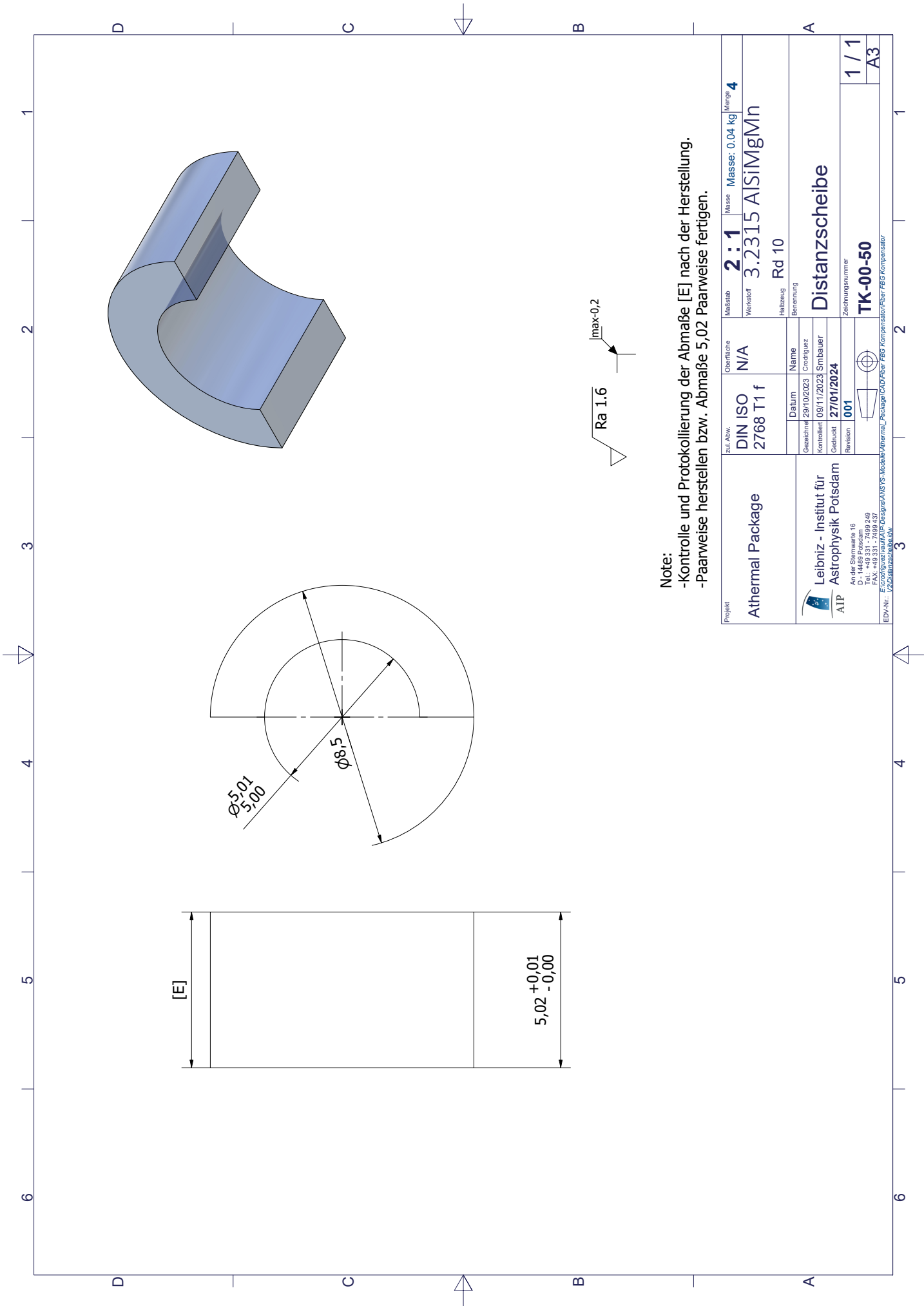
Projekt		Auftrag		Material		Maßstab		Menge	
Athermal Package		DIN ISO 2768 T1 f		Ra 1.6		2:1		1	
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam		DIN Norm		Norm		Invar 36		Rd 12 x 163	
D. Heide (Projektor)		Standort		Standort		TK-00-01		2/2	
P.O. Box 106081		Standort		Standort		TK-00-01		A2	
P.O. Box 106081		Standort		Standort		TK-00-01		A2	

REVISIONSVERLAUF				
ZONE	REV.	BESCHREIBUNG	DATUM	GENEHMIGT
C8	2 F. Dionies	2 Neue Öffnungen	07.10.2024	Carlos Rodriguez A.
E7-E3	2 F. Dionies	4 Neue M1 Bohrungen	07.10.2024	Carlos Rodriguez A.
C2	2 F. Dionies	2 Neue Planflächen	15.10.2024	Carlos Rodriguez A.

XXXXV



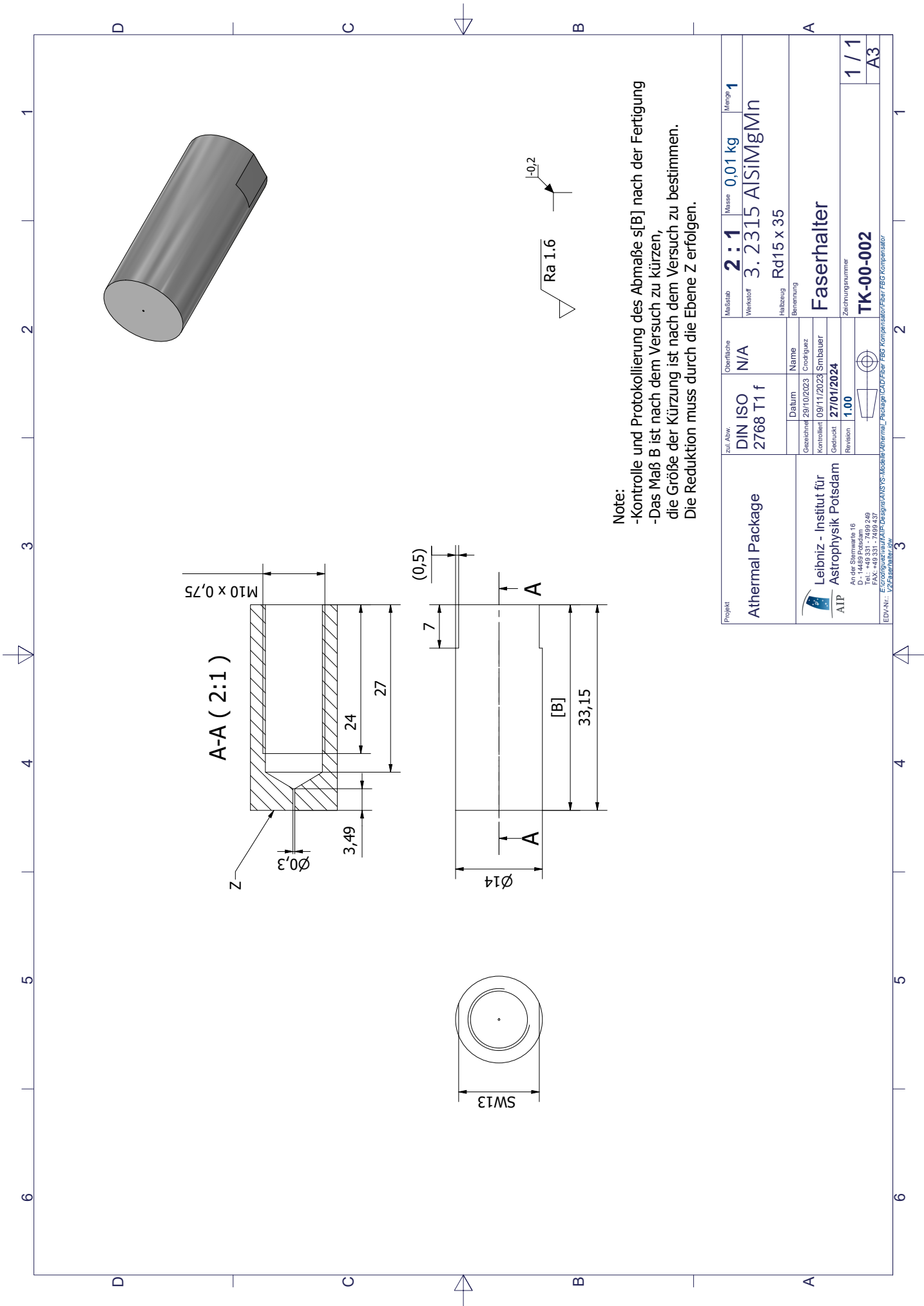
Projekt		Zul. Abw.		Oberflächliche		Masse		Menge	
Athermal Package		DIN ISO 2768 T1 f		N/A		2 : 1		0,04 Kg	
Leibniz - Institut für Astrophysik Potsdam		Datum		Name		Verstärk.		3.2315 AlSiMgMn	
An der Sternwarte 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437 E-Mail: leibniz@astro.uni-potsdam.de		Gezeichnet		Credit/Quoz		Halbzug		Rd 10 x 100	
EDV-Nr.: LZ\Werkzeugstuecke.dwg		Kontrolliert		Stbauer		Benennung		Torsion Release	
		27/01/2024		27/01/2024		Ziehungsnummer		1 / 1	
		001		Revision		TK-00-06		A3	



Ra 1.6 $\sqrt{\text{max-0,2}}$

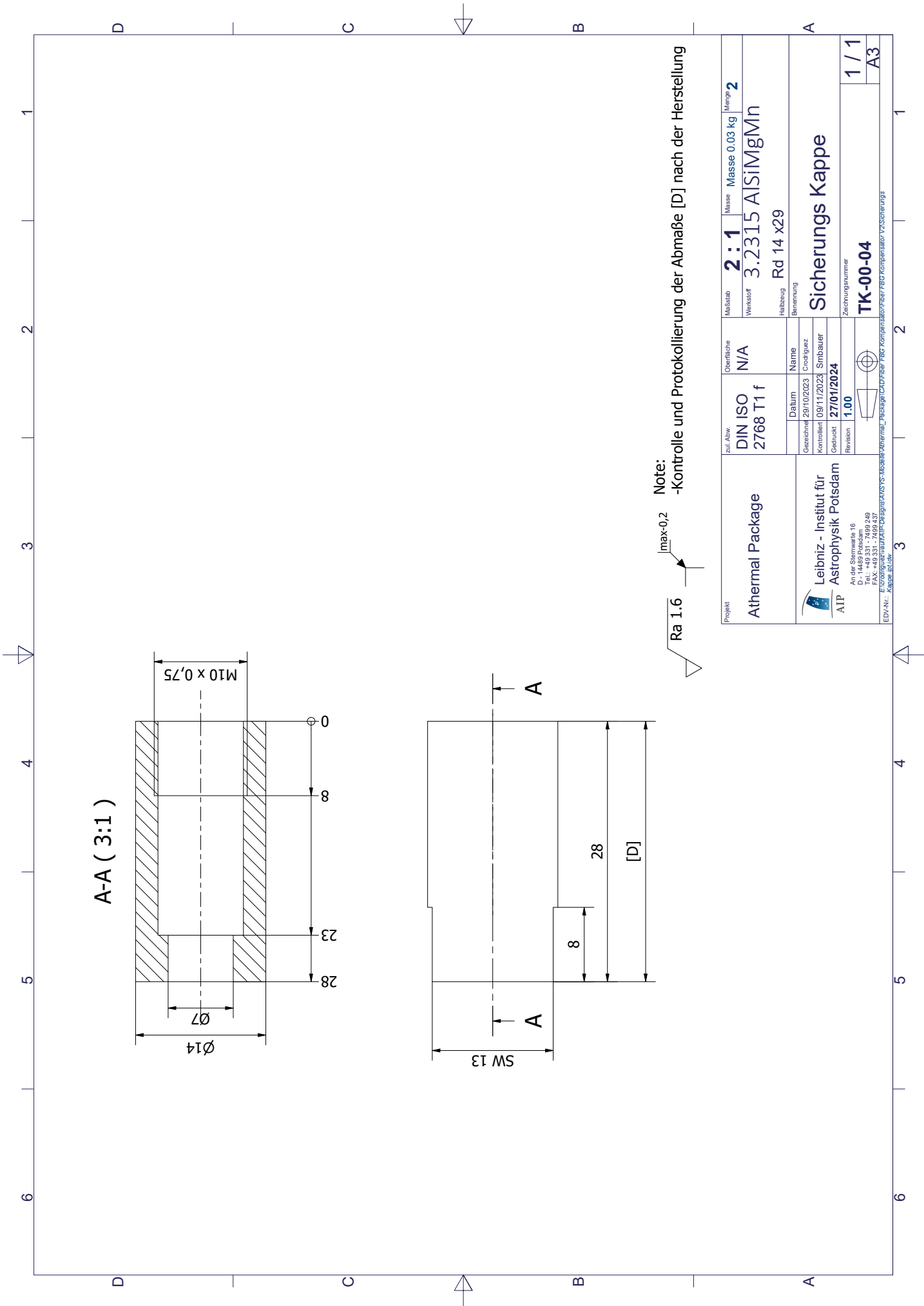
Note:
 -Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [E] nach der Herstellung.
 -Paarweise herstellen bzw. Abmaße 5,02 Paarweise fertigen.

Projekt Athermal Package	Zul. Anw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberfläche N/A	Maßstab 2:1	Masse 0.04 kg	Menge 4
	Datum 29/10/2023	Name Cratiguz	Verstärk. 3.2315 AlSiMgMn	Halbzeug Rd 10	
Leibniz - Institut für Astrophysik Potsdam AIP An der Sternwarte 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 237 E-Mail: leibniz@iap.pwg.ac.cn	Gezeichnet 09/11/2023 Smbauer	Gezeichnet 27/01/2024	Distanzscheibe		
	Geprüft 001	Geprüft 001	Ziehungsnummer TK-00-50	1 / 1	
	EDV-Nr.: VZ03Distanzscheibe.dwg			A3	



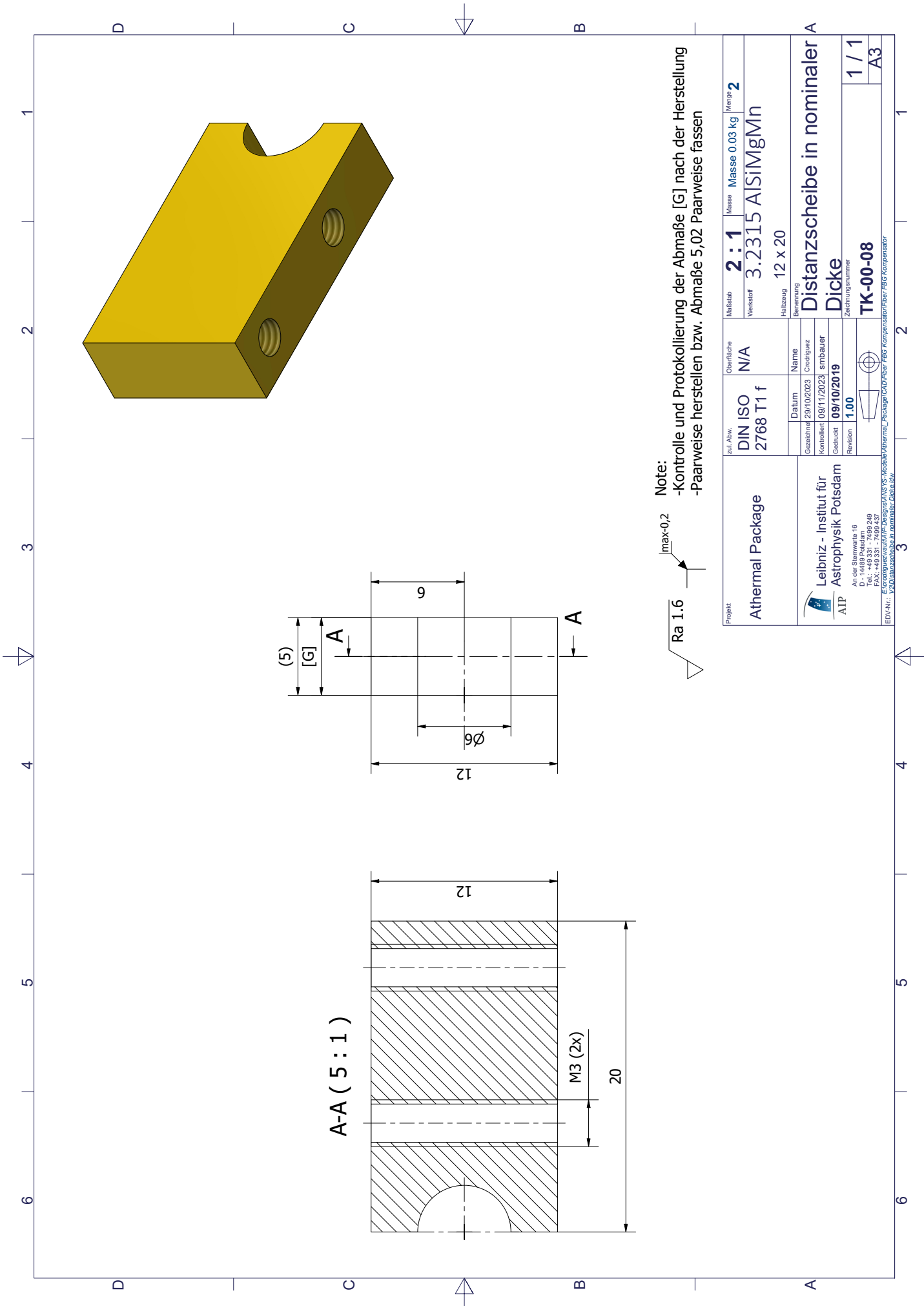
Note:
 -Kontrolle und Protokollierung des Abmaße s[B] nach der Fertigung
 -Das Maß B ist nach dem Versuch zu kürzen,
 die Größe der Kürzung ist nach dem Versuch zu bestimmen.
 Die Reduktion muss durch die Ebene Z erfolgen.

Projekt Athermal Package	Zul. Abw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberfläche N/A	Meldestab 2 : 1	Masse 0,01 kg	Menp. 1
	Verstärk. 3.2315 AlSiMgMn				
Datum 29/10/2023		Name Faserhalter		Halbzug Rd15 x 35	
Gezeichnet 09/11/2023 Smbauer		Creditletze		Benennung	
Kontrolliert 27/01/2024		Gezeichnet 1.00		Zeichnungsnummer 1 / 1	
Geprüft 1.00		Revisoren		A3	
EDV-Nr.: VZ/Faserhalter.dwg		Leibniz - Institut für Astrophysik Potsdam		TK-00-002	
AIP		An-der-Straße 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437		Faserhalter/Faser/FBG/Kompensator	



Note:
-Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [D] nach der Herstellung

Projekt Athermal Package		Zul. Abw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberflächliche N/A	Material 2:1	Masse 0.03 kg	Menge 2
Leibniz - Institut für AIP Astrophysik Potsdam Am Neuen Steinweg 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437 E-Mail: leibniz@iap.potsdam.de EDV-Nr.: Kappe_01_LAW		Datum 29/10/2023	Name Simbauer	Halbzug Rd 14 x29	Benennung Sicherungs Kappe	
		Gezeichnet 09/11/2023	Geprüft 27/01/2024	Zeilenummer TK-00-04		Blattnummer 1 / 1
		Gezeichnet 1.00	Geprüft 1.00	Zeilenummer TK-00-04		Blattnummer A3



Note:
 -Kontrolle und Protokollierung der Abmaße [G] nach der Herstellung
 -Paarweise herstellen bzw. Abmaße 5,02 Paarweise fassen

Projekt Athermal Package	Zul. Abw. DIN ISO 2768 T1 f	Oberfläche N/A	Maßstab 2:1	Masse 0.03 kg	Menge 2
	Datum 29/10/2023	Name N/A	Verstärk. 3.2315 AlSiMgMn	halbzug 12 x 20	
Gezeichnet 09/11/2023		Creditquoz sbm	Benennung Distanzscheibe in nominaler A		
Kontrolliert 09/10/2019		Gezeichnet 09/10/2019	Dicke 1 / 1		
Revisiert 1.00		Revisiert TK-00-08	Zeichnungsnummer A3		
An der Strahlwerks 16 D - 14489 Potsdam Tel.: +49 331 - 7499 249 Fax: +49 331 - 7499 437 E-Mail: info@strahlwerks.de		EDV-Nr.: www.strahlwerks.de			

Anhang D

Messreihe Experiment

Nachfolgend sind die Ergebnisse des Versuchs „FBG manuelle Temperaturkompensation“ in tabellarischer Form dargestellt.

Date: **D.1. Messreihe Experiment „FBG manuelle Temperaturkompensation“ [Quelle: Rahman Aashia]**

	Position (mm)	Temp (°C)	λ (nm)	Contraction (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
Increase Temp	16.58156	27	1550.34320	0.00659	0.04800
Release Strain	16.58815	27	1550.29520	0.00664	0.04800
Increase Temp	16.58836	32	1550.34320	0.00600	-0.04800
Release Strain	16.59500	32	1550.29520	0.00600	0.05120
Increase Temp	16.59515	37	1550.34640	0.00985	-0.05120
Release Strain	16.60115	37	1550.29520	0.00985	0.05760
Increase Temp	16.60000	42	1550.35280		
Release Strain	16.60985	42	1550.29520		

Cooling Cycle	Position (mm)	Temp (°C)	λ (nm)	Elongation (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
Decrease Temp	16.61094	42	1550.29520	-0.00493	-0.05120
Apply Strain	16.61014	37	1550.24400	-0.00522	-0.06400
Decrease Temp	16.60521	37	1550.29520	-0.00596	-0.05760
Apply Strain	16.60543	32	1550.23120	-0.00591	-0.05760
Decrease Temp	16.60021	32	1550.29520		
Apply Strain	16.60021	27	1550.23760		
Decrease Temp	16.59425	27	1550.29520		
Apply Strain	16.59473	22	1550.23760		
Decrease Temp	16.58882	22	1550.29520		
Apply Strain	16.58882	22	1550.23760		

Conclusions The OSA has an accuracy of ± 50 pm, for a small temperature step this is adding errors to the wavelength measurement and hence to the position accuracies, as the strain is released or applied based on the wavelength observed in the OSA

Temp (°C)	Contraction (μm)	Δλ (pm)	Δλ (pm)/Contraction (μm)	Avg (pm/μm)	Compensation (μm/°C)	Avg. Compensation (μm/°C)
27	6,590	480	72,8376328		1,318	
32	6,640	480	72,2891566	72,23432002	1,328	1,454
37	6,000	512	85,3333333		1,2	
42	9,850	576	58,4771574		1,97	

Temp (°C)	Contraction (μm)	Δλ (pm)	Δλ (pm)/Contraction (μm)	Avg (pm/μm)	Compensation (μm/°C)	Avg. Compensation (μm/°C)
27	5,910	576	97,4619289		1,182	
32	5,960	576	96,6442953		1,192	1,101
37	5,220	640	122,605364		1,044	
42	4,930	512	103,853955	0,211744966	0,986	
					% error	

Data 1

Heating Cycle	Position (mm)	Temp (°C)	λ (nm)	Contraction (mm)	$\Delta\lambda$ (nm)
	16,58138	22	1550,29520		
Increase Temp	16,58156	27	1550,34320	0,00659	0,04800
Release Strain	16,58815	27	1550,29520		
Increase Temp	16,58836	32	1550,34320	0,00664	0,04800
Release Strain	16,59500	32	1550,29520		-0,04800
Increase Temp	16,59515	37	1550,34640	0,00600	0,05120
Release Strain	16,60115	37	1550,29520		-0,05120
Increase Temp	16,60000	42	1550,35280	0,00985	0,05760
Release Strain	16,60985	42	1550,29520		

Cooling Cycle	Position (mm)	Temp (°C)	λ (nm)	Elongation (mm)	$\Delta\lambda$ (nm)
	16,61094	42	1550,29520		
Decrease Temp	16,61014	37	1550,24400	-0,00493	-0,05120
Apply Strain	16,60521	37	1550,29520		
Decrease Temp	16,60543	32	1550,23120	-0,00522	-0,06400
Apply Strain	16,60021	32	1550,29520		
Decrease Temp	16,60021	27	1550,23760	-0,00596	-0,05760
Apply Strain	16,59425	27	1550,29520		
Decrease Temp	16,59473	22	1550,23760	-0,00591	-0,05760
Apply Strain	16,58882	22	1550,29520		

Conclusions The OSA has an accuracy of ± 50 pm, for a small temperature step this is adding errors to the wavelength measurement and hence to the position accuracies, as the strain is released or applied based on the wavelength observed in the OSA

Temp (°C)	Contraction (μm)	Δλ (pm)	Δλ (pm)/Contraction (μm)	Avg (pm/μm)	Compensation (μm/°C)	Avg. Compensation (μm/°C)
27	6,590	480	72,8376328		1,318	
32	6,640	480	72,2891566	72,23432002	1,328	1,454
37	6,000	512	85,3333333		1,2	
42	9,850	576	58,4771574		1,97	

Temp (°C)	Contraction (μm)	Δλ (pm)	Δλ (pm)/Contraction (μm)	Avg (pm/μm)	Compensation (μm/°C)	Avg. Compensation (μm/°C)
27	5,910	576	97,4619289		1,182	
32	5,960	576	96,6442953		1,192	1,101
37	5,220	640	122,605364		1,044	
42	4,930	512	103,853955	0,211744966	0,986	
					% error	

Anhang **E**

Inhalt der Dateien auf der CD

Die CD enthält den gesamten Umfang der eingereichten Masterarbeit.

E.1. CD Inhalt

1. Vollständige Masterarbeit als \LaTeX -Code
2. Vollständige Masterarbeit als PDF
3. FEM Modell aus dem Program Ansys 2024 R2
4. 3D-Modell aus dem CAD-Programm Inventor 2024
5. Tabellenkalkulation mit Excel 2019 Version 1808
6. E-Mail Verker als pdf bezüglich Funktionsprüfung des Temperaturkompensators
7. Powerpoint-Datei mit Literaturrecherche und Zwischenergebnissen (ohne Formattierung)
8. Kopie aus dem Laborbuch der ermittelten Werte verschiedene Faser-Bragg-Gitter Experimente

E. Inhalt der Dateien auf der CD