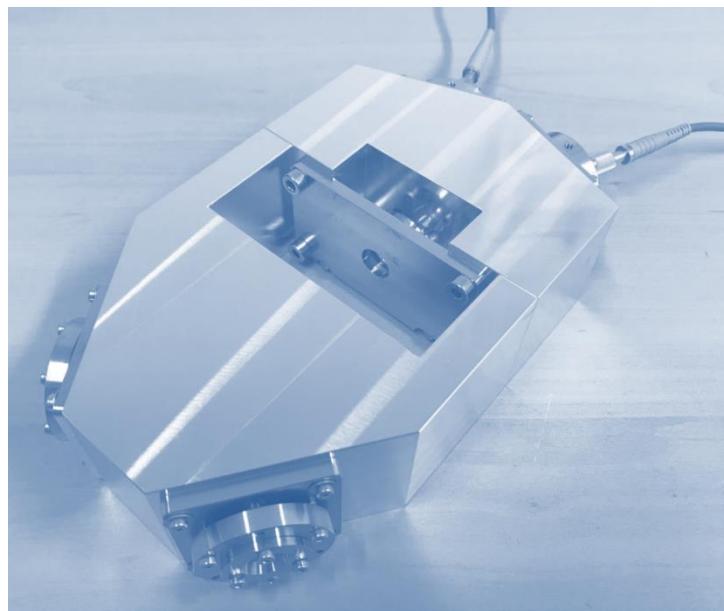




MORe-G II

Micro Optical Resonator Gyroscope II

FKZ 50 RK 1950



Abschlussbericht

Berichtszeitraum: 01.08.2019 – 28.02.2023

Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig,
Physikalisch-Technische-Bundesanstalt Braunschweig
und
SIOS Messtechnik GmbH

Zuwendungsempfänger:

SIOS Meßtechnik GmbH
Am Vogelherd 46
98693 Ilmenau

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung – Gesamtziele des Vorhabens	4
1.1	Einleitung	4
1.2	Beschreibung der Vorhabenziele	4
1.2.1	Zielsetzung.....	5
1.2.2	Bezug zu anderen Vorhaben.....	5
1.2.3	Lösungsansätze zum Erreichen der Ziele.....	6
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde	9
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
6	Erzielte Ergebnisse	11
6.1	Arbeitspaket 1000 Mikrotechnik	11
6.1.1	Arbeitspaket 1100 Optimierung der Spiegelflächen.....	11
6.1.2	Arbeitspaket 1300 Umbau der Ätzanlage zur Blasenvermeidung	11
6.1.3	Arbeitspaket 1400 Glätten der Spiegelflächen.....	11
6.2	Arbeitspaket 2000 Optische Justage	11
6.2.1	Arbeitspaket 2100 Weiterentwicklung des Justageverfahrens	11
6.2.2	Arbeitspaket 2200 Optische Kopplung der Peripherie	11
6.2.3	Arbeitspaket 2300 Weiterentwicklung der Justageeinheit.....	16
6.2.4	Arbeitspaket 2400 Miniaturisierung der Kollimatoren.....	20
6.2.5	Arbeitspaket 2500 Aufbau eines justagearmen Resonators	22
6.3	Arbeitspaket 3000 Elektronik.....	26
6.3.1	Arbeitspaket 3100 Modulationsgenerierung	26
6.3.2	Arbeitspaket 3200 HF-Signalerfassung	26
6.3.3	Arbeitspaket 3300 Analoge Resonator-Stabilisierung.....	26
6.3.4	Arbeitspaket 3400 Digitale Resonator-Stabilisierung	26
6.3.5	Arbeitspaket 3500 Signalauswertung für kleine Resonatoren.....	26
6.4	Arbeitspaket 4000 Inbetriebnahme und Verifikation	26
6.4.1	Arbeitspaket 4100 Design und Integration.....	26
6.4.2	Arbeitspaket 4200 Signaloptimierung	27
6.4.3	Arbeitspaket 4300 Evaluierungsmessung.....	28
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	29
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	29
9	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit.....	30
10	Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen	30

11	Erfolgte Veröffentlichungen	31
12	Zusammenfassung.....	31
13	Quellen	31
14	Abbildungsverzeichnis.....	34

1 Aufgabenstellung – Gesamtziele des Vorhabens

1.1 Einleitung

Drehratensensoren finden in vielen Bereichen ihre Anwendung. Weit verbreitet werden sie im Automotive-Bereich, in der Avionik und als wesentlicher Bestandteil in den Inertial-Navigationsystemen von Flugzeugen, Fahrzeugen und Schiffen aber auch von Satelliten, Raumsonden und autonomen Robotern, sowie von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) eingesetzt. Die Entwicklung eines mikrooptischen Gyroskops soll insbesondere die Nachfrage nach einem Drehratensensor für navigatorische Zwecke bedienen, die hohen Ansprüche an Genauigkeit, Stabilität und Integrität stellen und dabei eine Miniaturisierung und Gewichtsreduzierung gegenüber den bisherigen Drehratensensoren für gerade letztgenannte Einsatzzwecke in Raumfahrt und UAVs fordern.

Im Rahmen der vom BMWI geförderten Konzeptstudie MEMS-RLG, des Folgeprojekts MEMS-RLG Konzepterprobung und des zweiten Folgeprojektes MOrE-G konnte ein neues Sensorkonzept für ein mikrooptisches Gyroskop entwickelt werden. Die gemachten Erfahrungen und Ergebnisse bieten innerhalb eines Anschlussvorhabens gute Voraussetzungen für eine konsequente Weiterentwicklung bis hin zum Prototyp.

Mit SIOS Meßtechnik GmbH wurde ein neuer Partner gefunden, der weitreichende Kenntnisse im Bereich der optischen Messtechnik und der Justage von optischen Komponenten besitzt. Ferner konnte SIOS schon zahlreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Überführung von Forschungsergebnissen zu Prototypen sammeln. Die SIOS Meßtechnik GmbH beteiligt sich in diesem Vorhaben an der Weiterentwicklung der Resonatorjustagevorrichtung sowie bei der Integration aller Komponenten zu einem Gesamtaufbau, sodass die Entwicklung bis hin zum Prototyp zielführend vorangetrieben werden kann.

1.2 Beschreibung der Vorhabenziele

Das in MOrE-G verfolgte Konzept eines passiven Ringlaser-Gyroskops erwies sich als äußerst leistungsfähig im Vergleich zu marktüblichen Konzepten wie aktiven Ringlaser- oder Faserbasierten Gyroskopen. Ein Lock-In Effekt, wie bei aktiven Ringlasergyroskopen, ist aufgrund des passiven Resonators im MOrE-G Konzept nicht zu erwarten. Ebenso sind bestimmte thermische und mechanische Einflüsse, die in Faseroptischen Gyroskopen im kreisförmigen sensitiven Teil des Gyroskops auf die Faser wirken, als limitierenden Faktor in diesem Konzept ausgeschlossen. Ferner kann ein passiver Resonator bei gleicher Sensitivität kürzer ausfallen als der sensitive Teil eines Interferometrischen Gyroskops (IFOGs). Dies ist ein entscheidender Vorteil für den Aufbau eines miniaturisierten Gyroskops.

Im kommerziellen Bereich sind Gyroskope mit passiven Resonatoren, trotz ihrer Vorteile, nicht verbreitet. Grund waren die bisher zu hohen Bauteilkosten der optischen Komponenten sowie der komplexe optische Aufbau. Im MOrE-G Konzept wurden hingegen ausschließlich Komponenten aus dem Telekommunikationsbereich verwendet. Diese Komponenten arbeiten im Infrarot-Wellenlängenbereich und besitzen eine hohe Qualität bei vergleichsweise geringen Kosten. Zudem sind viele der in dem Konzept vorgesehenen optischen Komponenten faserintegrierte Bauteile wie zum Beispiel Zirkulatoren, elektrooptische Modulatoren oder Strahlteiler, welche den optischen Aufbau stark vereinfachen. Ferner lässt sich durch die Verwendung von monolithisch gefertigten Silizium-Spiegeln der Justageaufwand für den passiven Resonator von zuvor 3 auf 2 Bauteile reduzieren. Damit sollen durch entsprechende Beschichtung der Spiegelflächen Resonatoren hoher Güte und Stabilität hergestellt werden.

Bei einer kleinen Baugröße des Gyroskops können die auszuwertenden Signale für das MOrE-G Konzept auch im GHz Bereich liegen. Dies stellt sehr hohe Anforderungen an die elektronische Signalverarbeitung, welche vor wenigen Jahren praktisch nicht handhabbar waren.

Aufgrund der rapiden Entwicklung im Telekommunikationsbereich sind jetzt aber auch hierfür zahlreiche Komponenten verfügbar, welche die Entwicklung einer HF-Signalauswertung ermöglichen.

1.2.1 Zielsetzung

Ziel dieses Vorhabens war die Überführung des MOrE-G Konzepts hin zu einem vollfunktionsfähigen Prototyp, welcher sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit und geringe Baugröße unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Umsetzbarkeit in eine folgende Serienproduktion auszeichnet. Zur Erreichung dieses Hauptziels wurden folgende Einzelziele verfolgt:

- **Aufbau einer kompakten Elektronik zur Ansteuerung, Stabilisierung und Auswertung der Gyroskop-Signale**
- **Optimierung der Resonatorgüte durch Verbesserung der Spiegelbeschichtung**
- **Optimierung der Resonatorstabilität und Justage**
- **Abschließend sollte eine Evaluierungsmessung des Prototyps stattfinden, welche die Leistungsfähigkeit des Gyroskops belegt und Grundlage für einen Vergleich mit anderen kommerziellen Systemen ist.**

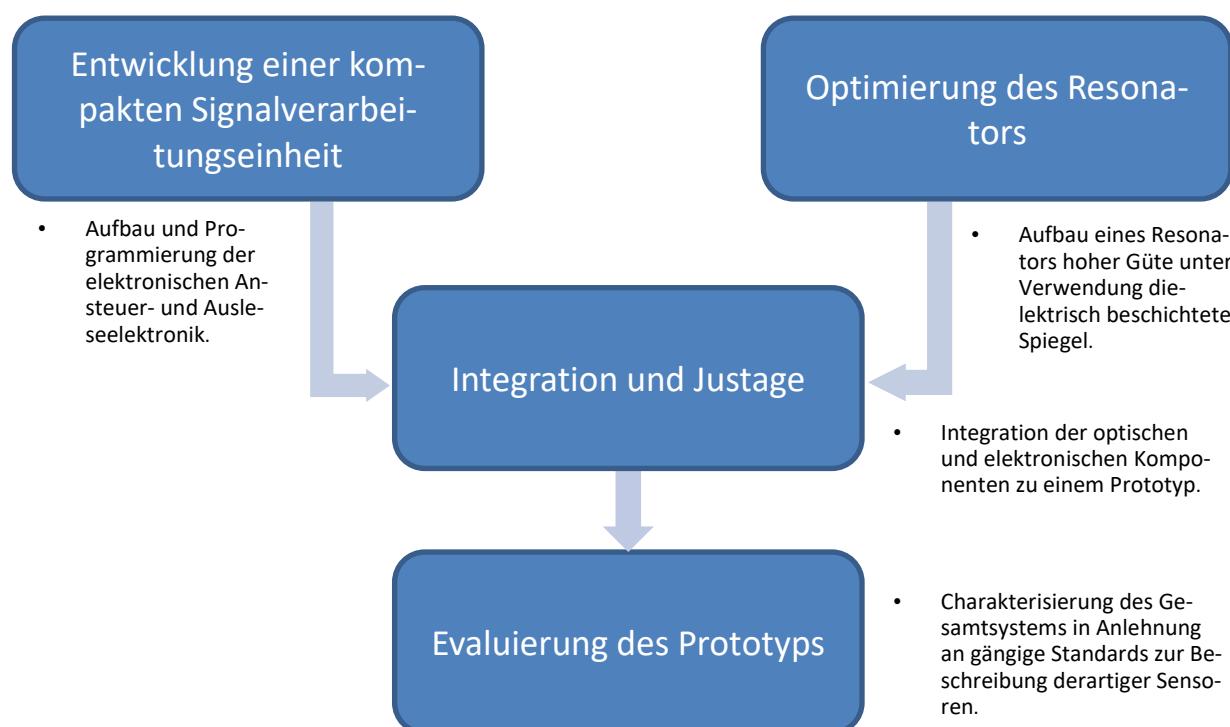


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Einzelziele.

1.2.2 Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben war als direkte Fortführung der Arbeiten des Instituts für Mikrotechnik (IMT) und der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) im Projekt MOrE-G geplant. Aufbauend auf den dort gewonnenen Erkenntnissen sollte das Konzept zur Prototypenreife weiterentwickelt werden.

Die in dem Projekt entwickelte Stabilisierung der Laserdiode auf einen optischen Resonator ist für den Fachbereich 5.2 der PTB (Dimensionelle Nanometrologie) aus verschiedenen Gründen von besonderem Interesse. Mit den in MORE-G erworbenen Kenntnissen können kompakte Laserlichtquellen mit hoher optischer Ausgangsleistung und Stabilität aufgebaut werden, die für den Einsatz in homodyn oder heterodyn arbeitenden Interferometern geeignet sind. Im Vergleich zu herkömmlichen HeNe-Lasern kann mit dieser Technologie problemlos ein Vielfaches an optischer Ausgangsleistung erreicht werden.

Außerdem wurde der Einsatz des entwickelten Gyroskops in den DLR Explorer-Initiativen beabsichtigt.

1.2.3 Lösungsansätze zum Erreichen der Ziele

Ein Schwerpunkt des Vorhabens lag in der Optimierung der in MORE-G entwickelten Elektronik. Die in MORE-G verwendete Elektronik zeichnet sich durch eine hohe Bandbreite und Flexibilität aus. Nachteilig ist hingegen die Baugröße, welche für einen portablen Einsatz ungünstig ist. Ziel war eine Elektronik mit stark reduzierter Baugröße und Leistungsbedarf. Dies sollte durch eine Analogschaltung realisiert werden, welche speziell auf den Resonator abgestimmt ist und somit die FPGA basierte Datenverarbeitungseinheit ersetzt. Es war die Integration aller Baugruppen aus MORE-G in eine für den Resonator zugeschnittene Elektronik geplant. Diese kann in drei Funktionsgruppen unterteilt werden. Die erste Funktionsgruppe enthält die Laseransteuerung zusammen mit der Ansteuerelektronik für die Modulatoren zur Erzeugung der optischen Signale. Die zweite Funktionsgruppe wandelt die optischen Signale aus dem Resonator zurück in elektrische Signale um und bereitet diese zu günstigen Signalpegeln auf. Ebenfalls wurde angestrebt in dieser Baugruppe eine Analogregelung zur Stabilisierung auf den Resonator umzusetzen. Zum einen sollte somit eine geringere Signallaufzeit erreicht werden, was die Bandbreite der Regelung erhöht und somit zu einer Verbesserung der Stabilisierung des Lasers auf den Resonator führt. Zum anderen könnte damit auf die Verwendung einer hochauflösenden Analog-Digital-Wandlung verzichtet werden, was die Kosten und die Komplexität der dritten Funktionsgruppe, die digitale Signalverarbeitung, weiter reduzieren würde. Ein Vergleich der analogen Regelung mit der bisher verwendeten digitalen Regelung sollte darüber entscheiden, ob die AD-Wandlung in der digitalen Signalverarbeitungseinheit notwendig war oder nicht.

Neben der Elektronik war die Optimierung des Resonators ein wesentlicher Bestandteil des Vorhabens. Eine Optimierung war hinsichtlich der Resonator-Güte und Stabilität vorzunehmen. Zum Erreichen einer höheren Resonator-Güte war die Oberflächenqualität der Ätzflächen weiter zu erhöhen und die Goldbeschichtung der Spiegelflächen durch eine dielektrische Beschichtung zu ersetzen. Dies sollte die Absorptionsverluste der Spiegelflächen auf vernachlässigbar kleine Werte reduzieren. Gleichzeitig sollte die Reflektivität von bisher ca. 98% auf idealerweise 99.98% erhöht werden. Mit einem in MORE-G aufgebauten optischen Resonator, unter Verwendung zugekaufter dielektrisch beschichteter Spiegel, ist eine Finess von über 2000 erreicht worden, was zu guten Ergebnissen der Laserstabilisierung auf den Resonator führte. Eine vergleichbare Beschichtung sollte nun auch für die vom IMT entwickelten Spiegel eingesetzt werden. Entsprechend von Abschätzungen, basierend auf dem in MORE-G entwickelten Simulationsmodell, würde dies die Linienbreite des Resonators um mehr als eine Größenordnung reduzieren und gleichzeitig die Modulationstiefe von bisher 15% auf ca. 80% erhöhen. Außerdem wurden im Zuge der Messwertauswertung am Versuchsaufbau aus MORE-G die Simulationsmodelle für den Resonator verifiziert und in ihren Parametern den realen Gegebenheiten angepasst. Mit dem verbesserten Modell war es nun möglich den Strahlengang im Resonator präziser nachzubilden. In diesem Projekt sollte auf Basis dieses Modells der Resonator hinsichtlich der mechanischen Stabilität, des optischen Strahlenangs und der Baugröße optimiert werden. So war angestrebt die Kollimation und Einkopplung der Laserstrahlen durch zwei Kollimationslinsen zu realisieren anstelle der wesentlich größeren Standard-Kollimatoren, welche bisher verwendet wurden.

Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens war die Justage und Fixierung der optischen Komponenten. Die in MORe-G entwickelten Justageverfahren sollten dementsprechend weiterentwickelt werden. Hierfür sollte auf die mehr als 25 Jahre Erfahrung der SIOS Meßtechnik GmbH zurückgegriffen werden. Der Umgang mit optischen Baugruppen sowie die Umsetzung präziser Justageprozesse ist für die SIOS Alltagsgeschäft. Ebenfalls hat SIOS zahlreiche Erfahrungen in der Überführung von Forschungsarbeiten über einen Prototypen bis hin zur Serienfertigung.

Die oben beschriebenen elektronischen Funktionsgruppen sollten zunächst einzeln aufgebaut und am bestehenden Versuchsaufbau von MORe-G getestet werden. Zeitgleich erfolgte die Optimierung und Justage des Resonators. Anschließend wurden beide Baugruppen zu einem Prototypen integriert und eine Optimierung der Signale durchgeführt. Daran anschließend erfolgte die Evaluierung des Gesamtsystems. Hierfür wurden die charakteristischen Werte des Gyroskops aufgezeichnet und ausgewertet.

Die PTB betreibt einen Winkelkomparator als Primärstandard des ebenen Winkels mit einer Messunsicherheit von etwa 1/1000 Winkelsekunde. Dieser Komparator basiert auf einer Kreisteilung mit interferometrischen Encodern, einem Luftlager und einem Linearmotor, der Drehraten bis zu 4 U/min erzeugen kann. Mit diesem Komparator sollten die realisierten Varianten des Mikrooptischen Gyroskops bezüglich Bias-Stabilität mit hoher Präzision charakterisiert werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

An der TU Braunschweig war das Institut für Mikrotechnik (IMT) und an der PTB Braunschweig der Fachbereich „Dimensionelle Nanometrologie“ an der Bearbeitung des Vorhabens beteiligt. Als Industriepartner nahm die SIOS Meßtechnik GmbH an dem Projekt teil.

Von Seiten der SIOS konnte die Bearbeitung ohne Lücken durchgeführt werden

Die Corona-Pandemie hat bei dem Vorhaben nur in geringfügigem Maße zu Einschränkungen geführt. Allerdings mussten die meisten Projektmeetings online durchgeführt werden und eine persönliche Teilnahme an Fachkonferenzen war nicht möglich.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

An dem Projekt war von der Technischen Universität Braunschweig das Institut für Mikrotechnik (IMT) beteiligt. Das Institut hat bereits an der Konzeptstudie MEMS-RLG, im MEMS-RLG II und dem vorangegangen Vorhaben MORe-G gearbeitet, so dass für das Vorhaben direkt an diese Arbeiten und an die bereits erzielten Erkenntnisse angeknüpft werden konnte.

Wie auch im Vorhaben MORe-G war für die Weiterentwicklung der elektro-optischen Komponenten und der Elektronik des Gyroskops der Fachbereich für "dimensionelle Nanometrologie" der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) am Projekt beteiligt. Auch auf diesem Gebiet konnte somit an die Vorarbeiten und Erkenntnisse angeknüpft werden.

Neu am Projekt beteiligt war der Industriepartner SIOS Meßtechnik GmbH. Die SIOS bringt weitreichende Kenntnisse auf dem Gebiet der Justage von optischen Komponenten mit und besitzt zahlreiche Erfahrung in der Überführung von Forschungsergebnissen zu Prototypen. Die SIOS beteiligte sich in diesem Vorhaben an der Weiterentwicklung der Resonatorjustagevorrichtung sowie beim Konstruktion und Aufbau des Prototyps.

Das Projekt war für eine Dauer von 3 Jahren konzipiert und gliederte sich in vier große Hauptsäulen: AP 1000 Mikrotechnik, AP 2000 Optische Justage, AP 3000 Elektronik sowie AP 4000 Inbetriebnahme und Verifikation, die jeweils in Unterarbeitspakete unterteilt waren. In

Abbildung 3.1 ist die ursprünglich geplante Projektstruktur bis zur 100er-Arbeitspaketebene dargestellt. In dem Hauptarbeitspaket 1000 Mikrotechnik wurden unter Bearbeitung vom IMT Optimierungen der bereits im Vorgängerprojekt konzipierten Fertigungsverfahren für die geätzten monolithischen Siliziumspiegel vorgenommen. Hauptarbeitspaket 2000 Optische Justage wurde hauptsächlich vom IMT und der SIOS bearbeitet und war anfangs in drei Arbeitspakete unterteilt. Es beinhaltet die Weiterentwicklung der Spacer, Verbindungstechnik sowie der Justageelemente, um die Ein- und Auskopplung der Laserstrahlen in den Resonator sicherzustellen und die Komponenten zu einem gemeinsamen Aufbau zu vereinen. Das Hauptarbeitspaket 3000 Elektronik wurde von der PTB bearbeitet mit dem Ziel, die Auswertung des Resonators von der Modulationserzeugung bis hin zur Ausgabe der Drehrate zu ermöglichen. Hauptarbeitspaket 4000 war in drei Arbeitspakete unterteilt, die von allen drei Projektteilnehmern bearbeitet wurden, um die Ergebnisse der vorgelagerten Arbeitspakete zu einem funktionsfähigen Gyroskop-Prototypen zu vereinen, diesen in Betrieb zu nehmen und zu verifizieren.

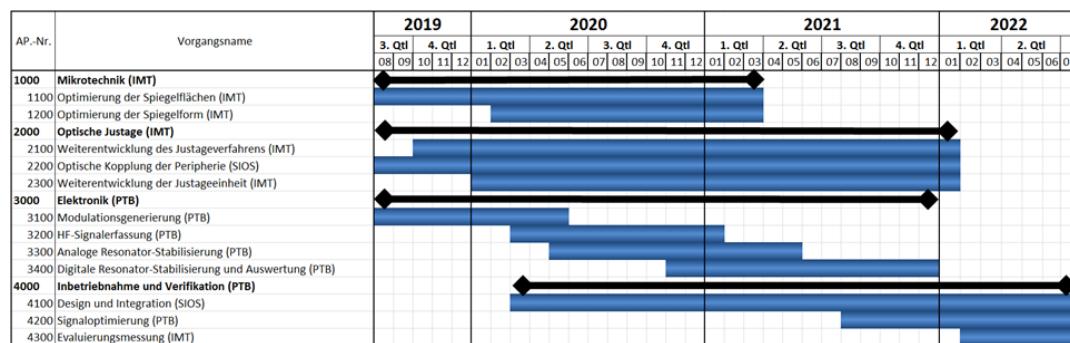


Abbildung 3.1: Planung der Arbeitspakete zu Projektbeginn

Während der Bearbeitung wurde die Projektlaufzeit bis zum 31.12.2022 um 5 Monate verlängert und das Vorhaben um die neuen Arbeitspakete 1300, 1400, 2400, 2500 und 3500 erweitert, wie dem angepassten Zeitplan aus Abbildung 3.2 zu entnehmen ist. Aufgrund von Verzögerungen in der Spiegelfertigung wurde das Projekt zuletzt um 2 Monate kostenneutral verlängert und es ergeben sich die Eckdaten:

Beginn: 01.08.2019

Ende: 28.02.2023

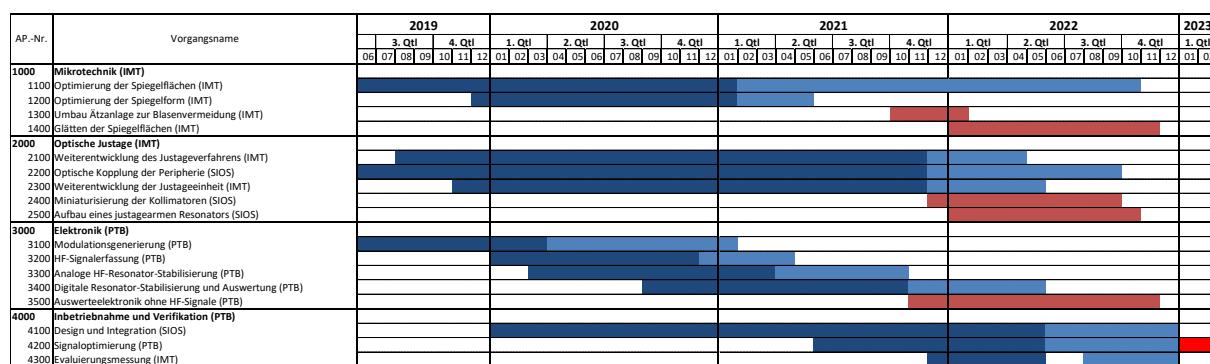


Abbildung 3.2: Angepasste Planung der Arbeitspakete

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Das durchgeführte Vorhaben baute auf den MEMS-RLG-Vorhaben und auf dem MORe-G-Vorhaben auf. Darin wurden die Fragestellungen untersucht, wie sich die gefertigten mikrooptischen Komponenten verhalten und wie die Fertigung eines mikrooptischen Gyroskops mit Doppelspiegeln erfolgen kann. Dabei ergab sich in der Konzeptstudie MEMS-RLG ein Gyroskop-Konzept auf Basis eines passiven Ringresonators. Die Vorteile durch die Verwendung eines passiven Resonators gegenüber herkömmlichen RLGs sind in der externen Laserquelle begründet. Diese erlaubt, dass die Laserquelle sowohl gut austauschbar ist, als auch verschiedene optische Kreiselachsen versorgen könnte. Ferner kann das Laserlicht aufbereitet werden, bevor es in den passiven Ringresonator eintritt. Außerdem werden nachteilige optische Effekte einer im Strahlengang liegenden Quelle vermieden. Der primäre sensitive Teil des Konzeptes ist der passive Resonator. Im Vergleich zu Interferometrischen-Faseroptischen-Gyroskopen (IFOGs) kann dieser sensitive Teil jedoch bei gleicher Sensitivität wesentlich kleiner aufgebaut werden [5].

Im darauffolgenden MEMS-RLG-II-Projekt wurden die zum Konzept gehörenden Mikrokomponenten und Fertigungsmethoden weiterentwickelt und die Komponenten funktional charakterisiert. Hierbei lag der Schwerpunkt auf dem Einfahren der Materialien, der Entwicklung von Einzelprozessen und den Prozessketten zur Herstellung der Mikrokomponenten sowie der Ermittlung der Eigenschaften der Mikrokomponenten. Im MORe-G-Vorhaben wurde das Konzept schwerpunktmäßig hinsichtlich der Justage des optischen Ringresonators weiterentwickelt. So soll durch die Verwendung von monolithisch gefertigten SI-Spiegeln der komplexe Justage- und Montage-Prozess von Ringresonatoren vereinfacht werden. Ferner fällt diesem Vorhaben der Entwurf des Regelkreises zu, der nötig ist um eine Resonatorverstimmung jederzeit zu detektieren und auszugleichen und so ein navigatorisch verwendbares Sensorsignal zu erhalten. Die Regelung von Lichtquellen auf optische Resonatoren ist ein weitverbreitetes Problem, das neben dem Einsatz in passiven Ringresonatoren auch für die Stabilisierung von Lasern auf Absorptionslinien und Fabry-Perot Interferometern genutzt wird. In den letzten Jahrzehnten sind in diesem Bereich daher eine große Zahl von Veröffentlichungen und Patenten entstanden. Auch das im MORe-G-Vorhaben verfolgte Konzept ist eine vielversprechende Technologie. So ist auf Grund der sensitiven Eigenschaften von passiven optischen Resonatoren im Vergleich zu IFOGs ein kleinerer sensitiver Strahlengang zu erwarten.

Der Prototyp wird nach anfänglichen Abschätzungen mit seinen Komponenten (Laserquelle, Elektronik und Resonator) eine Baugröße von 100 mm x 160 mm x 50 mm und ein Gewicht von 1 kg nicht überschreiten. Für diese Maximal-Abschätzungen wurde ausschließlich von Standardkomponenten ausgegangen, die zu einer kompakten Einheit zusammengebaut werden. Für eine Serienproduktion könnten diese Komponenten zu einem Modul integriert werden, wo durch die Baugröße wesentlich kleiner wäre. Doch schon jetzt wäre der Prototyp mit diesen Maximal-Abschätzungen lediglich doppelt so groß wie kommerzielle optische Gyroskope für die Navigation, wie beispielsweise von Fizoptika [6]. Auch mit einer angestrebten maximal messbaren Drehrate von ungefähr 500 deg/s liegt es im Bereich gängiger Gyroskope. Wenn gefordert könnte diese jedoch auch leicht durch die Verwendung schnellerer Elektronik erhöht werden.

Die kleineren optischen Gyroskope von Fizoptika haben zurzeit lediglich ein Bauvolumen von ca. 30 cm³. Diese sind jedoch nicht für die Navigation geeignet, da sie nicht die dafür geforderte Bias-Stabilität von 0.1-0.01 °/h aufweisen [5]. Diese kleinen Abmaße wird der Prototyp voraussichtlich noch nicht erreichen. Jedoch besitzt der Resonator zurzeit auch nur wenige 10 cm³ Bauvolumen. So lange auf Grund konstruktiver Bedingungen nur ein kleiner sensitiver Teil des Gyroskops gefordert ist, kann das Konzept durch eine Aufteilung und Verteilung der Komponenten auf den Bauraum auch gegenüber den kleineren Gyroskopen konkurrenzfähig sein bei gleichzeitig höherer Performanz. So kann der Resonator auf der sensitiven Achse installiert werden und die Elektronik an einer anderen Stelle im System. Außerdem ist durch die externe

Laserquelle eine vergleichsweise einfache Umstellung auf 3 Achsen zu erwarten, die auf Grund des kleinen Resonators voraussichtlich ohne große Volumenzunahme von statten gehen kann.

Viele kommerziell erhältliche Neuentwicklungen der letzten Jahre auf dem Gebiet der optischen Gyroskope basieren auf dem Konzept von FOGs. Nach derzeitigem Erkenntnisstand wäre das MORe-G Gyroskop das erste auf Spiegeln basierende kommerziell erhältliche passive Resonator Gyroskop.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorhaben *MORe-G-II* waren keine weiteren Partner beteiligt.

6 Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse vorgestellt, deren Gliederung sich an der Arbeitspaketstruktur orientiert.

6.1 Arbeitspaket 1000 Mikrotechnik

6.1.1 Arbeitspaket 1100 Optimierung der Spiegelflächen

Dieses Arbeitspaket wurde vom IMT bearbeitet.

6.1.2 Arbeitspaket 1300 Umbau der Ätzanlage zur Blasenvermeidung

Dieses Arbeitspaket wurde vom IMT bearbeitet.

6.1.3 Arbeitspaket 1400 Glätten der Spiegelflächen

Dieses Arbeitspaket wurde vom IMT bearbeitet.

6.2 Arbeitspaket 2000 Optische Justage

6.2.1 Arbeitspaket 2100 Weiterentwicklung des Justageverfahrens

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB und vom IMT bearbeitet.

6.2.2 Arbeitspaket 2200 Optische Kopplung der Peripherie

Neben dem Resonator selbst ist die Ein- und Auskopplung der Laserstrahlen von entscheidender Bedeutung für die Stabilität und das Auflösungsvermögen des Gyroskops. In diesem AP sollten die notwendigen Parameter für die Ein- und Auskopplung bestimmt und Justageelemente entwickelt werden.

Vorbemerkungen Vorab-Demonstrator

Zu Beginn des Vorhabens erfolgten intensive Abstimmungen zwischen SIOS, IMT und PTB. Auf Basis der Erfahrungswerte und Vorarbeiten der Projektpartner sowie gemeinsamer Versuche während des ersten Arbeitstreffens wurden die Anforderungen an die Justageelemente und die (Opto-)Mechanik diskutiert.

Da ein funktionstüchtiger, kurz- und langzeitstabiler sowie transportabler Aufbau des Resonators für die weiteren Arbeiten der PTB an den Arbeitspunkten 3000 entscheidend ist, sollte eine Vorab-Optomechanik (bestehend aus Resonator sowie Ein- und Auskopplung) entwickelt und aufgebaut werden. Diese dient als Versuchsträger für praktische Versuche, die für die Arbeitspakte 2000 und 3000 nötig sind. Untersuchungen insbesondere der PTB an den Arbeitspaketen 3000 sind dann unabhängig vom Ergebnis der Arbeiten an den Siliziumspiegeln möglich. Es soll ein möglichst kompaktes, transportfähiges und hochstables Design gefunden werden. Daraus können hier, im Unterschied zu den Vorarbeiten, keine Baukasten-Standardelemente verwendet werden. Es sollen unter anderem die Justierstellen (Resonatorspiegel sowie Ein- und Auskopplung) nur auf die minimal nötigen Freiheitsgrade reduziert werden. Parallel dazu wurden die Entwicklungen des Resonators auf Basis des Siliziumspiegels und des Spacers vorangetrieben.

Auf Basis von umfangreichen Simulationen schlug die PTB für den Resonator die Verwendung von drei sphärischen Spiegeln mit dem Krümmungsradius von $r = 1000$ mm vor. Die entsprechenden kommerziellen Spiegel wurden von der PTB ausgewählt und bestellt.

Daten der Spiegel:

- $\varnothing 12,7 +0,0/-0,1$ mm

- Centering/ wedge: < 1.5 mrad. Dies entspricht dem Winkel zwischen optischer und mechanischer Achse der Spiegel (Herstellungstoleranz)

Auf Basis der PTB Simulation, muss jeder sphärische Spiegel mit einer Abweichung von kleiner 50 μ rad (Richtung der Spiegelachse) bzw. 50 μ m (Lateralversatz der Spiegelachse) bezüglich des idealen Strahlengangs im Resonator verbaut sein, um stabile Resonatorbedingungen zu erreichen.

Aus diesen Toleranzen ergeben sich Anforderungen an die Positionierung und Justage der Resonatorspiegel. Diese Anforderungen lassen sich direkt auf die Justage der ein- und ausgekoppelten Strahlen übertragen, da deren Lage und Richtung bzgl. des Resonators definiert, inwieweit das im Resonator umlaufende Licht sich überlagert und wieder ausgekoppelt werden kann. Aus diesem Grund wurde bei der Entwicklung der Justierstellen das gleiche Prinzip für die Ein- und Auskopplung sowie den Resonator angewendet.

Anforderungen an die Justierstellen

Vergleicht man die Herstellungstoleranzen der Spiegel mit den genannten Anforderungen so ergibt sich die Notwendigkeit einer Justage von zwei der drei Spiegel (M1, M2, M3) bezüglich des Strahlengangs, siehe Abbildung 6.1.

Da sphärische Spiegel verwendet werden, ist für M2 und M3 entweder eine transversale Justage in lateraler Richtung (in x- und y-Richtung) mit einer Auflösung und Wiederholbarkeit von $< 50 \mu$ m oder / und eine rotatorische Justage in sagittaler und tangentialer Richtung mit Auflösung und Wiederholbarkeit von $< 50 \mu$ rad nötig. Zusätzlich soll möglichst eine Justage in z-Richtung möglich sein.

Spiegel M1 soll nicht justierbar aber reproduzierbar montier- und demontierbar sein.

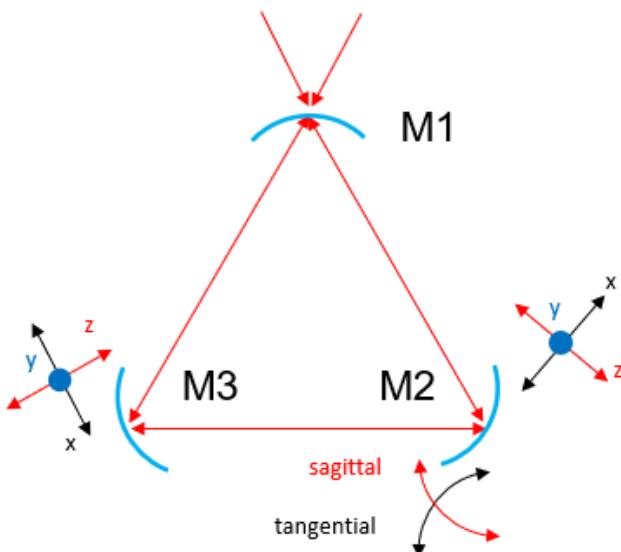


Abbildung 6.1: Strahlengang im Resonator. M1, M2, M3 sind hier die drei sphärischen Resonatorspiegel

Prinzip der Justierstellen

Auf Basis der Anforderungen wurden von der Firma SIOS zwei Konzepte für die Justierstellen erarbeitet und mit den Projektpartnern diskutiert, siehe Abbildung 6.2. Auf Basis der Erfahrungswerte der Firma SIOS sind die erforderliche Auflösung und Reproduzierbarkeit mit beiden Varianten prinzipiell erreichbar.

Das Justagekonzept „Festkörpergelenk“ hat den Vorteil, dass kein nicht-reproduzierbares Verstellen der lateralen Spiegelposition bei der Winkeljustage erfolgt. Der Nachteil ist, dass es keine

Möglichkeit der Spiegeljustage in z-Richtung gibt. Hier wäre ein zusätzliches Justageelement nötig.

Das Justagekonzept „Sphärisches Gelenk“ ermöglicht eine geringe Justage auch in z-Richtung. Eine Kippung und eine Verschiebung in z-Richtung erfolgt mittels Zug-/Druckschrauben. Der Nachteil ist, dass in Abhängigkeit des mechanischen Spiels zwischen dem sphärischen und dem zylindrischen Bauelement ein Übersprechen zwischen Winkel- und Lateraljustage möglich ist. Daher müssen die Fertigungstoleranzen entsprechend gering gehalten werden. Dies ist prinzipiell möglich. Aufgrund der Möglichkeit einer Justage auch in z-Richtung wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern dieses Konzept für die weiteren Arbeiten ausgewählt. Das gleiche Konzept soll auch für die Justage der Ein- und Auskopplung der Strahlen in den Resonator verwendet werden.

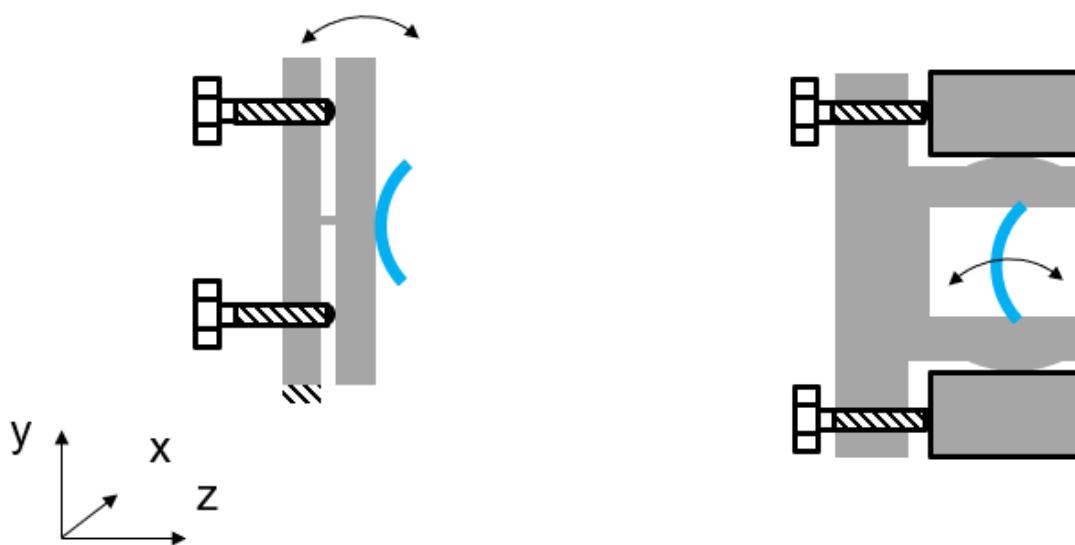


Abbildung 6.2: Justagekonzepte Resonatorspiegel: links Festkörpergelenk, rechts sphärisches Gelenk

Auswahl Kollimatoren

Die infraroten (IR) Strahlen werden mithilfe von Kollimatoren aus den Lichtwellenleitern (LWL) ein- bzw. ausgekoppelt. Für den Vorab-Demonstrator wurden von der PTB Standard-Kollimatoren der Firma Schäffer + Kirchhoff ausgewählt (60FC-4-M12-08). Diese sind für die verwendete Wellenlänge von 1550 nm und mit einer Brennweite von 12 mm ausgelegt. Damit ergibt sich bei der verwendeten Faser eine Strahldivergenz von ca. 0,05°. Die geringe Strahldivergenz ist erforderlich, aufgrund der großen Zahl an Umläufen im Resonator.

Konstruktive Umsetzung der Justierstellen

Justierstellen der Ein- und Auskopplung der infraroten Strahlen:

Die Ein- und Auskopplung, also die Richtung der Strahlen bzw. Kollimatoren muss in sagittaler und tangentialer Richtung rotierbar sein. Weiterhin muss die Möglichkeit bestehen, die Kollimatoren lateral in x- und y-Richtung zu verschieben. Daher wurde an dieser Stelle ebenfalls das erläuterte justierbare sphärische Gelenk verwendet. Die konstruktive Umsetzung ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

Der Kollimator wird in einer quasi Dreipunktaufnahme mittels einer Klemmschraube reproduzierbar und langzeitstabil befestigt. Die Justageelemente wurden in der Firma SIOS gefertigt.

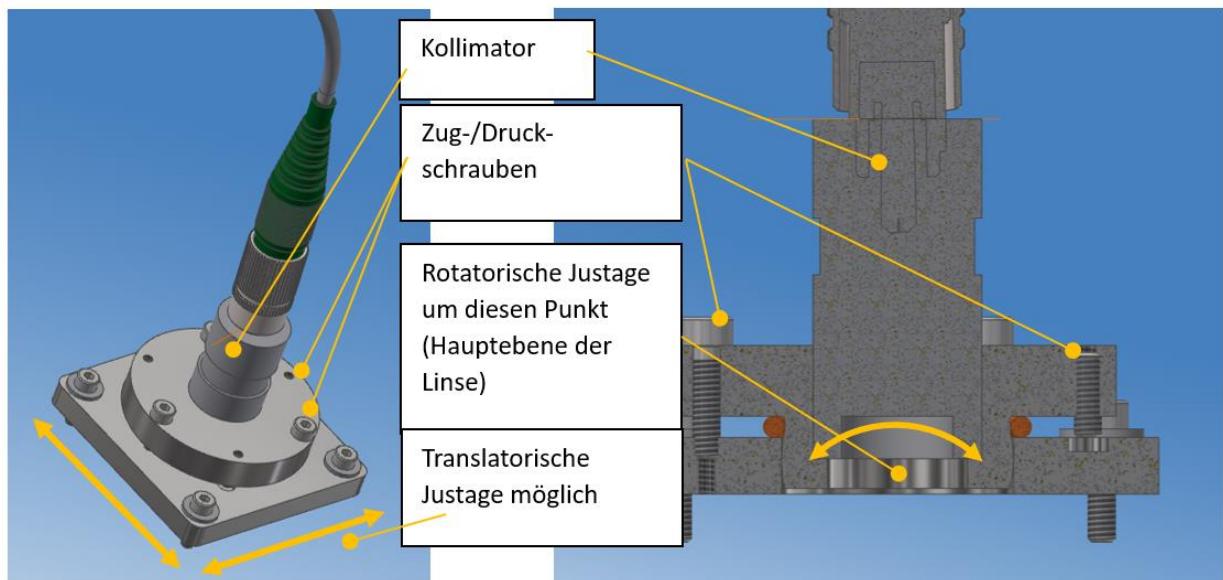


Abbildung 6.3: Konstruktive Umsetzung der Ein- und Auskopplung der IR-Stahlen mit rotatorischer und translatorischer Justage der Strahlrichtung

Versuchsaufbau zur Untersuchung der Stabilität

Ein Projektziel ist die grundlegende Untersuchung der Justierstellen „optische Einkopplung“ und „Resonatorspiegel“ hinsichtlich ihrer thermischen und zeitlichen Stabilität. Die praktischen Untersuchungen stellen einen Beitrag nicht nur zu diesem AP 2200 sondern auch zur generellen Weiterentwicklung des Gyroskops dar (insbesondere in den APs 2100, 4100 und 2500). Dazu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, gefertigt und aufgebaut. Als Bewertungskriterium der Stabilität der Justierstellen in diesem Aufbau wurde deren Winkel- bzw. Richtungsstabilität definiert. Diese Winkelstabilität wurde mittels einer Differenzmessung des Winkels der Justageelemente bezüglich des jeweils nächstgelegenen mechanischen Fixpunktes mit einem Autokollimation fernrohr (AKF) untersucht, siehe Abbildung 6.4.

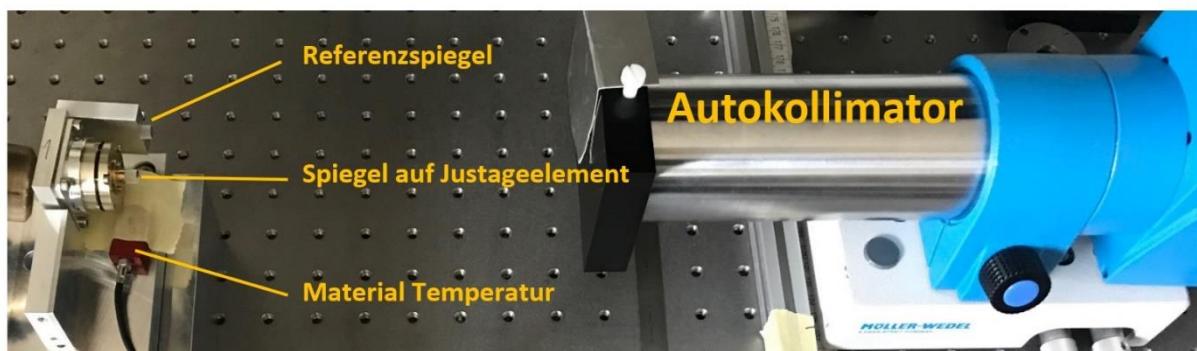


Abbildung 6.4: Messprinzip

Untersucht wurden vier verschiedene mechanische Konzepte der Justageelemente (vgl. Abbildung 6.5):

- I: zweiteilig als Kugel-Zylinder-Paarung mit Hartmetall-Einsätzen an Stellen mit hoher Belastung
- II: zweiteilig als Kugel-Zylinder-Paarung ohne Hartmetall-Einsätze,

III: einteilig-monolithisch,

IV: mehrteilig

Variante I stellt dabei die Variante dar, die für die Ein- und Auskopplung der Strahlen in den Resonator entwickelt wurde (vgl. Abbildung 6.3). In Variante II wurden die konstruktiv vorgesehenen Hartmetalleinsätze weggelassen, um diese Auswirkung zu untersuchen. Um die theoretisch getroffene Entscheidung zugunsten Variante I zu verifizieren wurden zwei weitere aufgebaut und gemessen. Variante III entspricht dem theoretisch diskutierten Prinzip aus Abbildung 6.2 links. Variante IV ist ein weiteres Konzept, das hinsichtlich der Freiheitsgrade der Variante III entspricht.

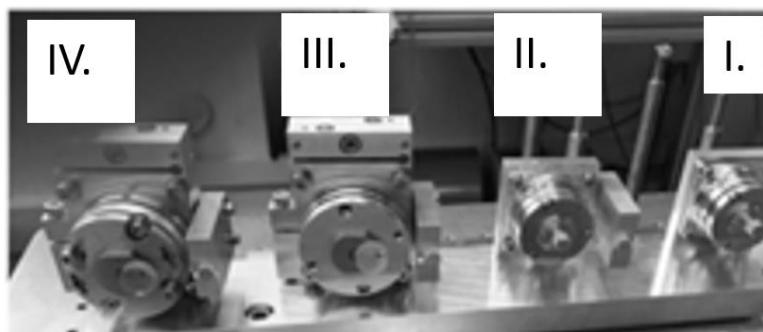


Abbildung 6.5: Vier verschiedene Konzepte von Justageelementen im Versuchsaufbau

Es kann zu einem Zeitpunkt immer nur ein Justageelement gemessen werden. Daher werden die Messungen sequenziell iterativ durchgeführt. Dazu muss der Autokollimator lateral an seine jeweilige Messposition verschoben werden. Die Ergebnisse werden im öffentlichen Bericht nur für die Justageelemente I und II dargestellt um firmeninternes Knowhow zu schützen.

Justageelement I zeigt unmittelbar nach abgeschlossenem Justagevorgang quasi keine Änderung des eingestellten Winkels. Bei Justageelement II wurde eine Änderung in Form einer erwartbaren e-Funktion von ca. 9 μ rad nach ca. 1,5 h festgestellt, siehe Abbildung 6.6.

In der Langzeitmessung stellt sich bei beiden Justageelementen eine lineare Drift ein (15 μ rad /150 h bei Justageelement I. und 65 μ rad /150 h bei Justageelement II. jeweils 150 h nach abgeschlossenem Justagevorgang), siehe Abbildung 6.7.

Die Stabilität infolge einer ca. 25-minütigen Erwärmung auf ca. 60°C und einer darauffolgenden Abkühlung auf Raumtemperatur ist für beide Elemente ähnlich. Die bleibende Änderung nach abgeschlossener Abkühlung lag bei 9 μ rad (I.) und -18 μ rad (II.), siehe Abbildung 6.8

Das Justageelement I. stellt damit hinsichtlich der Stabilität die beste Lösung für die nötigen Justagestellen dar (auch im Vergleich zu den hier nicht dargestellten Justageelementen III. und IV.).

Damit konnte die theoretisch getroffene Entscheidung für das Konzept der Justierstellen mit diesen praktischen Untersuchungen verifiziert werden.

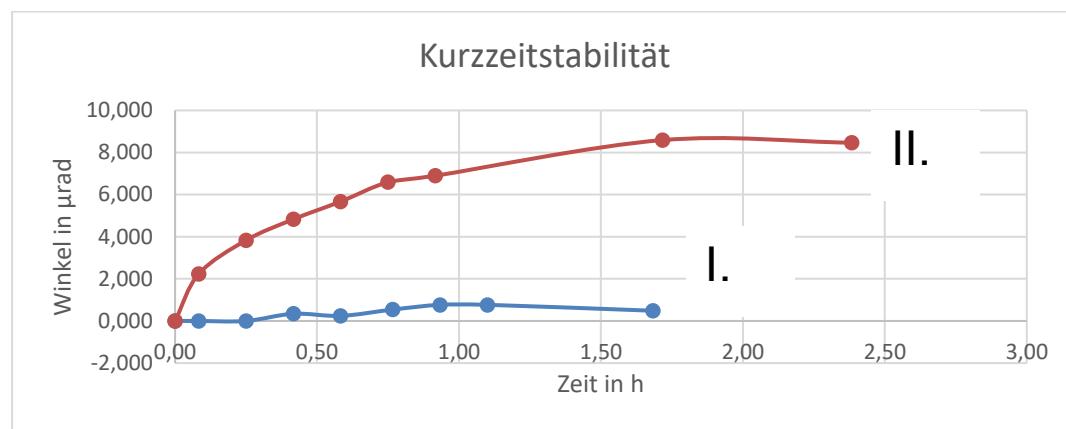


Abbildung 6.6: Kurzzeitstabilität von Justageelement I. und II. infolge eines abgeschlossenen Justagevorgangs zum Zeitpunkt 0

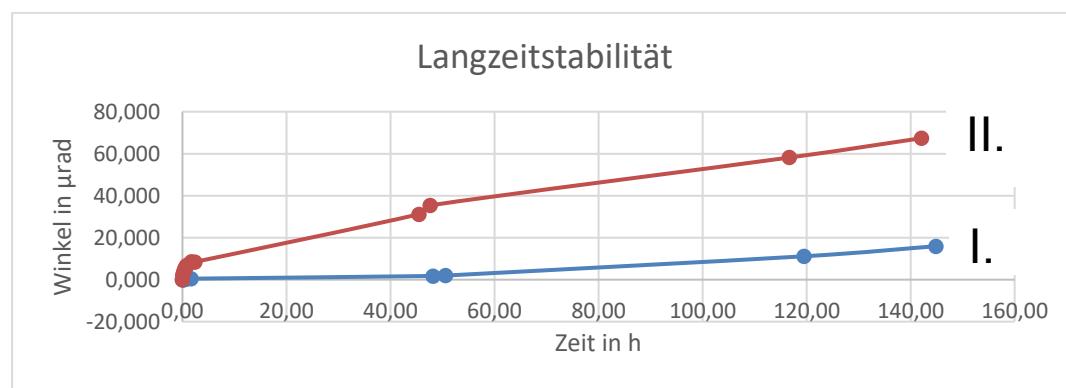


Abbildung 6.7: Langzeitstabilität von Justageelement I. und II. infolge eines abgeschlossenen Justagevorgangs zum Zeitpunkt 0

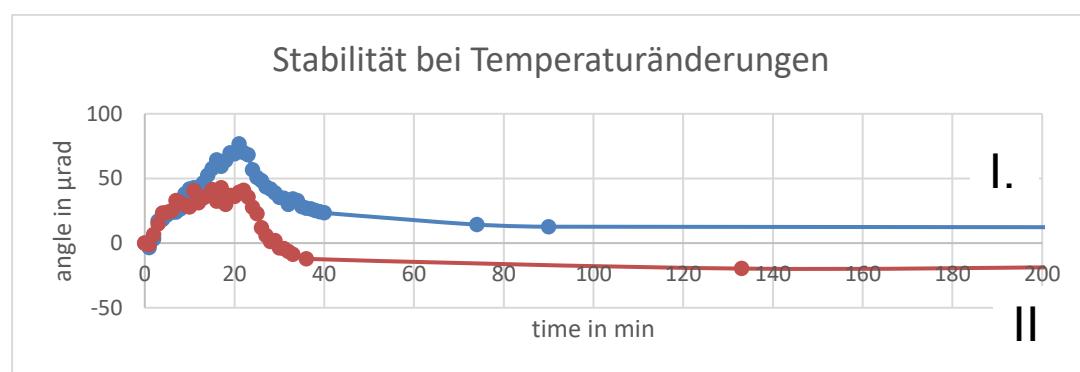


Abbildung 6.8: Stabilität von Justageelement I. und II. infolge einer Erwärmung (0..20 min auf ca. 50°C) und der darauf folgenden Abkühlung (ab 20 min, auf Raumtemperatur) der Justageelemente

6.2.3 Arbeitspaket 2300 Weiterentwicklung der Justageeinheit

Ziel dieses Arbeitspakets war es die in MORE-G entwickelte Justageeinheit weiterzuentwickeln, um die Elemente Resonator, Ein-/Auskopplungseinheit und Elektronik zu einem gesamten Aufbau zu vereinen.

Wie schon unter **2200** erläutert, wurde entschieden, neben der Weiterentwicklung des miniaturisierten SI-Spiegel Resonators einen Vorab-Demonstrator zu entwickeln, der auf kommerziellen sphärischen Spiegeln basiert. Dieser dient als Versuchsträger für praktische Versuche, die für die Arbeitspakete 2000 und 3000 nötig sind. Die Anforderungen an die Freiheitsgrade und Justierstellen sind ebenfalls schon in 2200 erläutert.

Entwicklung und Konstruktion von justierbaren Resonatoren durch SIOS

Justierstellen für Spiegel M2 und M3

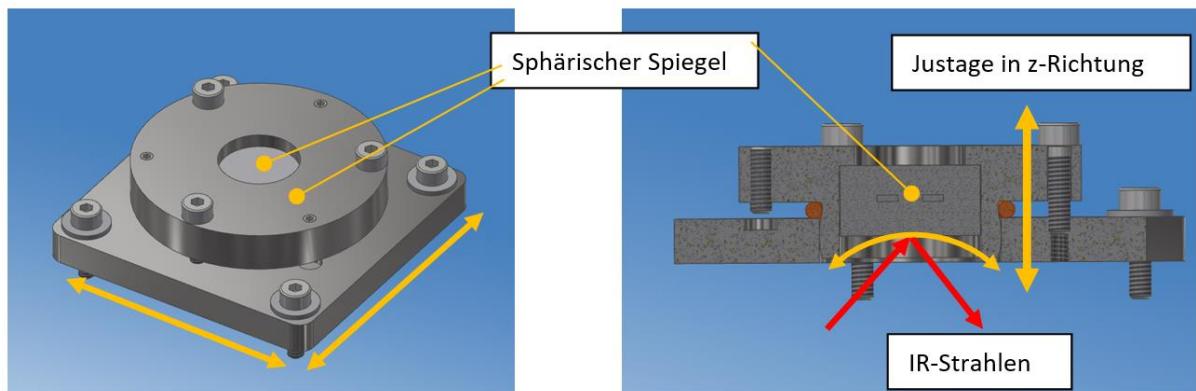


Abbildung 6.9: Konstruktive Umsetzung der Spiegeljustage mit rotatorischen und translatorischen Freiheitsgraden

Analog zur Justage der Ein- und Auskopplung wurde die Spiegeljustage für M2 und M3 konstruiert, siehe Abbildung 6.9. Über die Zug-/Druckschrauben ist nicht nur eine feinfühlige Justage der Rotation möglich, sondern auch eine Justage des Spiegels in z-Richtung (ca. 0,5 mm Verstellweg) möglich. Der eingefügte elastische Ring dient der Erleichterung der Justage. Wenn die Justage abgeschlossen ist (Zug- und Druckschrauben sind fest gekontert), ist der elastische Ring quasi nicht mehr mechanisch im Eingriff.

Vorab-Demonstrator (270 mm Resonator Umlauflänge):

Eine Erfahrung, die die PTB mit dem Laboraufbau aus dem Vorgängerprojekt gemacht hatte, ist, dass Vibrationen im Resonator in dem vergleichsweise großen und wenig steifen Aufbau auftraten, die ein verlässliches Einregeln der Wellenlänge nicht erlaubten. Somit wurde, um kritische Vibrationen zu unterdrücken, für den Vorab-Demonstrator ein möglichst geschlossenes und steifes Design gewählt. Der Grundkörper, der die Winkel zwischen den Strahlen und die Resonatorlänge definiert, besteht aus zwei steifen Teilen, siehe Abbildung 6.10. Der Spiegel M1 kann mit seiner Fassung reproduzierbar in den Grundauflauf montiert und demontiert werden (wichtig für die geplante Justagestrategie). Dies wird über eine Paarung aus Passstiften, V-Nut und Ebene realisiert. Der Resonator ist außerdem so realisiert, dass der Winkel zwischen den Stählen (bzw. den Spiegeln) dem des Si-Spiegels entspricht.

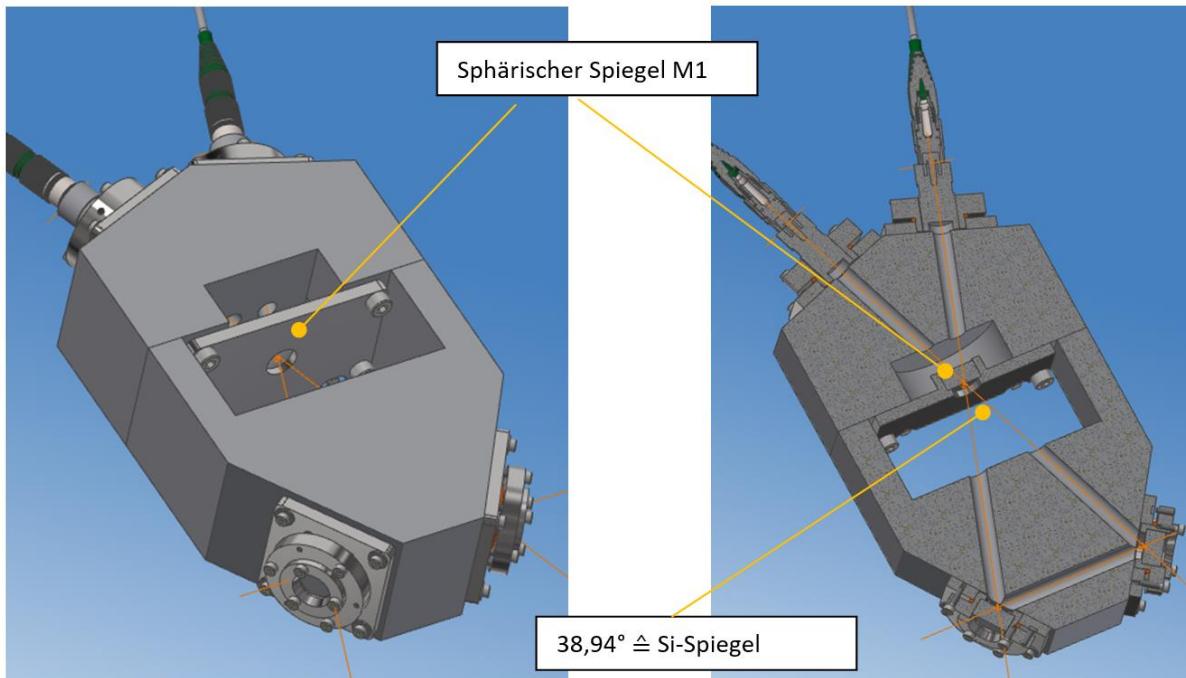


Abbildung 6.10: Vorab-Demonstrator mit 270 mm Umlauflänge

Vorab-Demonstrator Si-Spiegel (60 mm Umlauflänge):

In Abstimmung mit der PTB und dem IMT wurde entschieden, das Prinzip des sphärischen Justiergelenks auch für die Umsetzung einer alternativen konstruktiven Variante des Spacers zu verwenden. Bei der Konstruktion des Vorab-Demonstrators wurde eingeplant, dass anstelle der nicht justierbaren Spiegelfassung M1 der neue Spacer inkl. des Si-Doppelspiegels und eines justierbaren Spiegels M1 integriert werden kann. (Die untere Hälfte des steifen Grundkörpers wird dann nicht montiert), siehe Abbildung 6.11. Der Resonator kann als Ganzes montiert (Si-Spiegel und justierbarer Spiegel M1) und ebenfalls reproduzierbar am oberen Grundkörper montiert und demontiert werden. Dies entspricht dem Spacer. Die Justierstelle von M1 entspricht dem konstruktiven Prinzip der M2- und M3-Justage und dem der Ein- und Auskopplung des Vorab-Demonstrators. Es kann also an dieser Stelle die gleiche Justierempfindlichkeit und die gleiche Stabilität erreicht werden. Es werden die identischen Justierfreiheitsgrade wie bei dem Spacer aus dem Vorprojekt erreicht.

Die Justierung kann von außen beim komplett montierten System/Spacer erfolgen. Der Si-Spiegel wird elastisch gegen seine Fassung geklemmt. Damit ist die Lage des Si-Spiegels langzeitstabil definiert, überhöhte mechanische Spannungen werden aber vermieden.

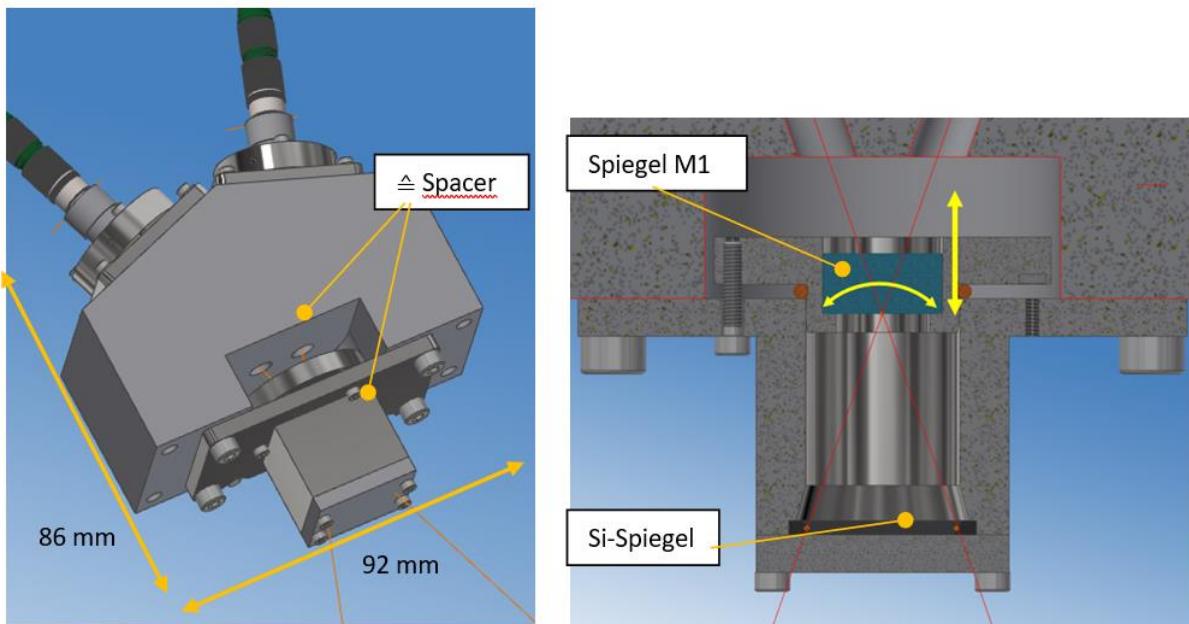


Abbildung 6.11: Si-Spiegel Resonator mit 60 mm Umlauflänge und justierbarer Ein- und Auskopplung

Fertigung und Aufbau der justierbaren Resonatoren

Der Vorab-Demonstrator (270 mm Resonator Umlauflänge) sowie der alternativ daran montierbare Si-Spiegel Resonator wurden durch die Firma SIOS gefertigt und aufgebaut, siehe Abbildung 6.12.

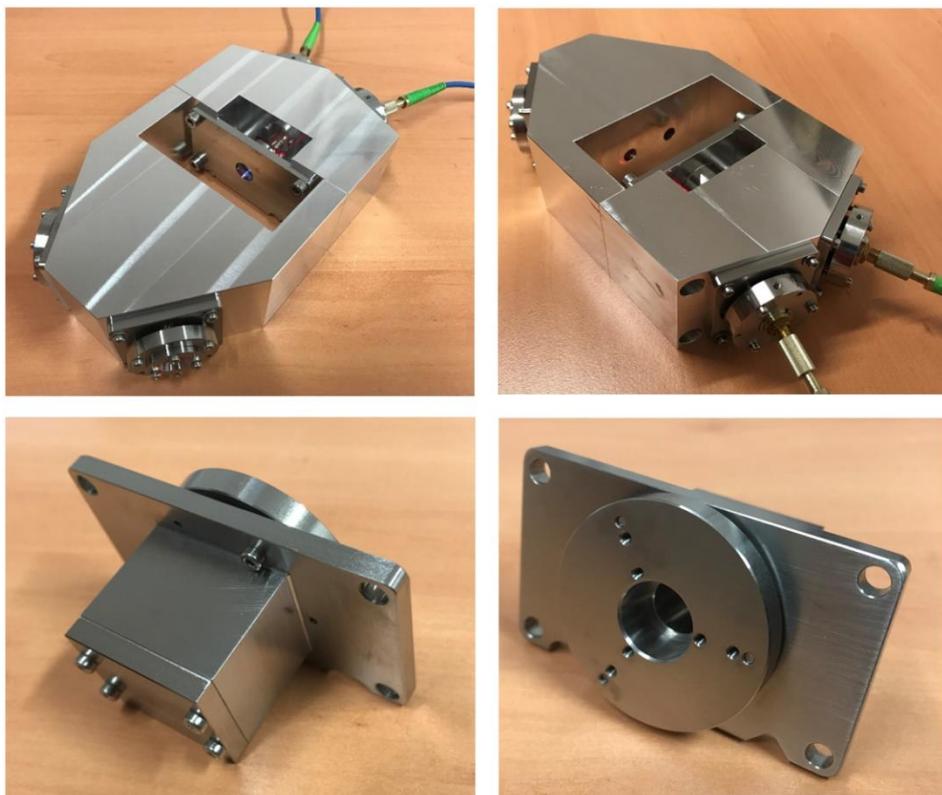


Abbildung 6.12: oben: gefertigter und aufgebauter Vorab-Demonstrator mit 270 mm Umlauflänge
unten: justierbarer Spacer mit Si-Doppelspiegel und 60 mm Umlauflänge

Untersuchung der Langzeitstabilität des Vorab-Demonstrators

Es wurden an Stelle der später von der PTB eingesetzten Kollimatoren SIOS Kollimatoren eingesetzt und der gesamte Aufbau so justiert, dass Licht (in diesem Fall 633 nm Wellenlänge) von einem Lichtwellenleiter durch den Resonator zurück in den jeweils anderen Lichtwellenleiter gekoppelt wurde. Dieser Aufbau wurde dann benutzt um die Stabilität des so justierten Aufbaus mit Ein- und Auskopplung sowie Resonatorspiegeln anhand der gemessenen ausgekoppelten Lichtleistung zu bewerten. Die zum Start des Experiments gemessene Lichtleistung betrug 111 μ W. Nach 5 Minuten wurde eine Wärmequelle unter dem Resonator angeschaltet. Es wurde die Lufttemperatur oberhalb des Resonators gemessen. Diese Temperaturmessung eignet sich daher nur für die Bewertung des groben Temperaturverlaufs und nicht zur Angabe der exakten Resonatortemperatur. Die tatsächliche maximale Resonatortemperatur während des Experiments wird statt 42 °C auf ca. 70 °C geschätzt. Nach diesen ca. 3,5 h Messungen während der Heiz- und Abkühlphase wurde die Lichtleistung bei unverändertem Aufbau für einen Monat weiter gemessen. Die Ergebnisse sind mit logarithmischer Darstellung der Zeit in Abbildung 6.13 dargestellt. Infolge der Erwärmung sank die ausgekoppelte Lichtleistung auf ca. 81% der Ausgangsleistung. Die Temperaturabhängigkeit der ausgekoppelten Lichtleistung ist generell auch trotz dieses sehr einfach gestalteten Experiments zu sehen. Nach Abschluss der Erwärmung stand die ausgekoppelte Lichtleistung innerhalb eines Monats stabil bei Werten zwischen 112 μ W und 115 μ W. Damit betragen die Schwankungen knapp unter $\pm 2\%$. Die qualitative Bewertung der Firma SIOS ist, dass dies eine vergleichsweise sehr gute Stabilität darstellt und dass sich der Aufbau damit sehr gut als langzeitstabil und transportabler Demonstrator für die weiteren Entwicklungsschritte eignen wird.

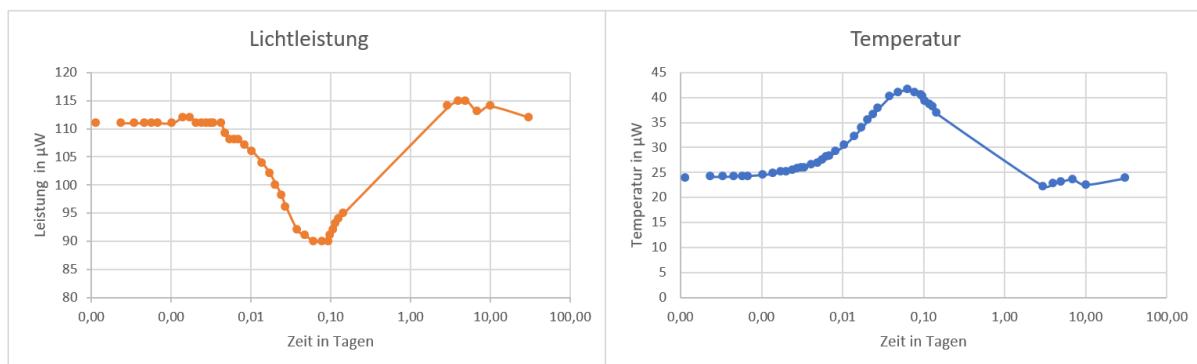


Abbildung 6.13: Langzeitstabilität der aus dem Vorab-Demonstrator ausgekoppelten Lichtleistung

Übergabe der Resonatoren an PTB und IMT

Die Aufbauten wurden während des Arbeitstreffens vom 07. und 08. Juli 2021 an die PTB und das IMT übergeben. Dabei erfolgten erste gemeinsame Experimente zur Justierung der Resonatoren.

6.2.4 Arbeitspaket 2400 Miniaturisierung der Kollimatoren

Ziel dieses Arbeitspakets war es, die Kollimatoren durch Verwendung von miniaturisierten Nicht-Standard-Optiken hinsichtlich ihrer Baugröße und ihrem Gewicht zu verkleinern.

Die Ein- und Auskopplung der Strahlen liefert einen signifikanten Beitrag zum Bauraum und Gewicht des Gyroskops, vergleiche Abbildung 6.11. Die Ein- und Auskopplung der Strahlen besteht aus den Kollimatoren und deren Justierstellen, wobei die Justierstellen den größten Bauraumbedarf aufweisen.

Ziel dieses Arbeitspakets war es, zunächst die Kollimatoren durch Verwendung von miniaturisierten Nicht-Standard-Optikkomponenten hinsichtlich ihrer Baugröße und ihrem Gewicht zu verkleinern.

Der Kollimator **kollimiert** das aus dem Lichtwellenleiter (LWL) austretende stark divergente Licht zu einem Parallelstrahl (und kann umgekehrt genutzt werden um einen Parallelstrahl auf den Fasereintritt zu fokussieren und damit als Einkopplung verwendet zu werden). Optisch stellt der Parallelstrahl einen Gaußstrahl dar, der immer eine Rest-Divergenz aufweist. Ziel ist es einen Strahl mit möglichst geringer Divergenz θ in das Gyroskop einzukoppeln. Der Durchmesser w_0 des kollinierten Strahls (an der Strahltaille) ist proportional zur effektiven numerischen Apertur der Faser NAe^2 und der Brennweite der Kollimatorlinse. Die Divergenz θ ist umgekehrt proportional zu dem Strahldurchmesser, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

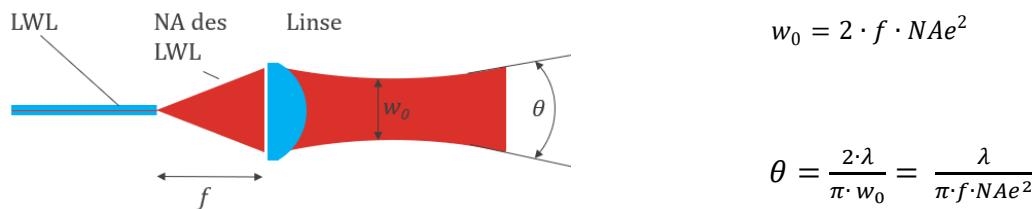


Abbildung 6.14: Kollimation von Licht aus einer LWL

Folglich erfordert eine kleine Divergenz generell große Brennweiten (die numerische Apertur der LWL ist nicht frei wählbar, da auch hier wieder spezielle Anforderungen wegen der Single-Mode-Eigenschaften gelten).

Der von der PTB für die Vorab-Versuche im Demonstrator spezifizierte und gewählte Kollimator besitzt eine Brennweite von $f = 12$ mm, die numerische Apertur beträgt 0,08. Damit ergibt sich eine rechnerische Strahldivergenz von $\sim 0,03^\circ$. Diese Konfiguration erwies sich aus optischer Sicht als geeignet.

Verkleinerungen der Kollimatoren, die mit Verkürzung der Brennweite f einhergehen, werden zu einer größeren Divergenz führen, was ungünstig für die Ausbreitung des Strahls im Resonator sein kann. Die Verwendung einer GRIN-Linse (Gradienten-Index-Linse) kann diesen Zusammenhang ggf. teilweise umgehen, siehe Abbildung 6.15.

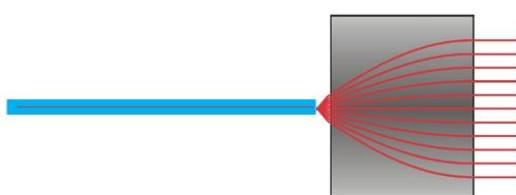
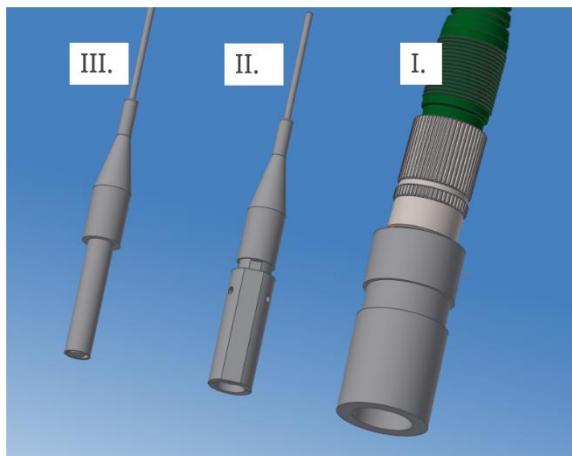


Abbildung 6.15: Strahlengang GRIN-Linse
zur Strahlkollimation

Der Abstand zwischen Faseraustritt und Linse kann reduziert werden und damit die Länge des Kollimators potentiell verkürzt werden. Auf der anderen Seite weist die GRIN-Linse selber, je nach optischen Eigenschaften, eine größere Länge auf als Standardlinsen. Der Zusammenhang zwischen Durchmesser des kollinierten Strahls und dessen Divergenz (Gaußstrahl-Charakteristik) bleibt aber auch hier bestehen.

Ein weiterer Ansatz zur Miniaturisierung ist der Verzicht einer trennbaren Koppelstelle zwischen Faser und Kollimator und der Verzicht der Justagemöglichkeit des Kollimators (Justierung des Faseraustritts bzgl. der Linse). Hierzu eignen sich sogenannte Pigtail Kollimatoren. Diese sind fest mit der Faser verbunden. Die Justierung erfolgt hier vom Hersteller. Abbildung 6.16 zeigt exemplarisch den Größenvergleich zwischen dem für den Demonstrator verwendeten justierbaren Kollimator (I.) und zwei Pigtail Kollimatoren der Firma Thorlabs. Variante II. basiert auf einer asphärischen Linse, Variante III. auf einer GRIN-Linse. Eine deutliche Miniaturisierung

der Länge und des Durchmessers ist deutlich zu sehen. Die Divergenz von Variante II. ist 4-fach größer, die von Variante III. ca. 8-fach größer als die der aktuell verwendeten Variante I.



	<i>f</i>	θ
Schäfter Kirchhoff (I)	12 mm	0,03°
Thorlabs (II)	4,23 mm	0,12°
Thorlabs (III)		0,25°

Abbildung 6.16: Vergleich Kollimatoren:

- I. Schäfter Kirchhoff 60FC-4-M12-08
- II. Thorlabs CFP5-1550A
- III. Thorlabs 50-1550PM-FC

Das Miniaturisierungspotential von Kollimator III ist nur unwesentlich besser als von Kollimator II, die Divergenz aber mit 0,25 ° doppelt so groß. Daher wird wegen der kleineren Divergenz für weitere Entwicklungen Variante II. gewählt.

6.2.5 Arbeitspaket 2500 Aufbau eines justagearmen Resonators

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, das Justagekonzept dahingehend weiterzuentwickeln, dass nötige Justageelemente nach einer Justage vom Resonator entfernt werden können. Dies ist insbesondere für die Kollimatoren anzustreben, da deren Justierstellen derzeit den größten Bau Raum benötigen. Basierend darauf sollte ein miniaturisierter optischer Resonator aufgebaut werden.

Betrachtet man die Konstruktion des Si-Spiegel Gyroskops (vergleiche Abbildung 6.11) ist zu erkennen, dass eine Miniaturisierung nur möglich ist, wenn die Kollimatoren näher an den Resonator rücken und sich damit auch deren lateraler Abstand reduziert. Der aktuell große Bau Raum ist wegen der erforderlichen Justierelemente der Kollimatoren nötig. Diese besitzen radial zur Strahlachse positionierte Zug- und Druckschrauben um eine Kippung der Kollimatoren feinfühlig und langzeitstabil justieren zu können, vgl. Abbildung 6.3.

Als Ansatz zur Miniaturisierung wird eine Trennung von Justierstelle und Justierelement angestrebt. Das Justierelement soll nach Justage der Strahlrichtung und -position wieder von der Justierstelle entfernt werden können.

Justierstelle

Eine Variante, die alle rotatorischen Freiheitsgrade erlaubt, ist die Kugel-Kegel-Paarung. Abbildung 6.17 zeigt den Kollimator II., auf dem ein kugelförmiger Aufsatz befestigt ist. Dieser Kollimator mit Kugelkopf wird von einem entsprechenden Kegel aufgenommen. Somit kann der Kollimator in diesem Kegel um alle drei rotatorischen Freiheitsgrade justiert werden. Nach erfolgter Justage muss der kugelförmige Kollimator fixiert werden. Hier ist die Verwendung von geeigneten Klebern geplant. Der Kelber und der Klebespalt sind so zu wählen, dass eine Schrumpfung des Klebers die Kugel in den Kegel hineinzieht.

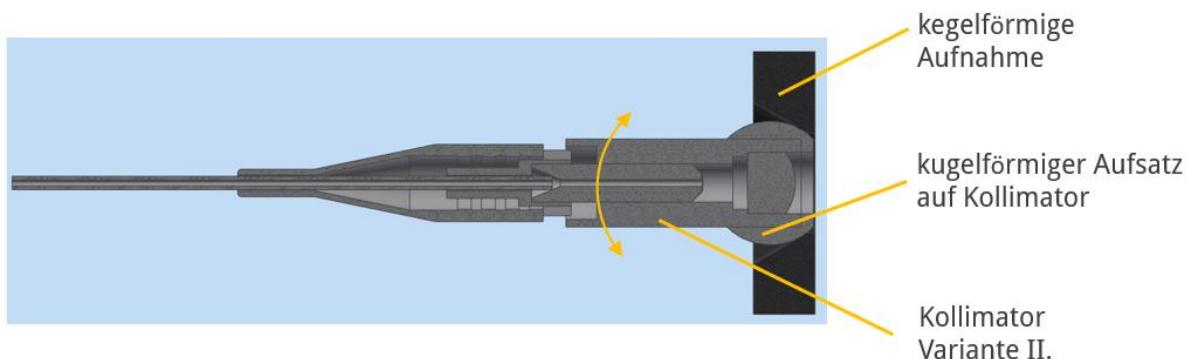


Abbildung 6.17: Miniaturisierte Justierstelle Kollimator

Justierelement

Im nächsten Schritt wurde ein Justierelement entwickelt, dass folgende Forderungen erfüllt:

- feinfühlige und reproduzierbare Erzeugung einer Nick- und Gier-Rotation des Kollimators bzgl. der Strahlachse
- Möglichkeit einer zusätzlichen händischen Rotation des Kollimators um die Strahlachse
- sichere Fixierung des Kollimators in seiner Lage während der Justage und des Klebevorgangs
- Entfernen des Justierelements ohne die Justagelage der Justierstelle wieder zu verändern

Die Konstruktion des Justierelements ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Die kegelförmige Aufnahme der Justierstelle kann fest am Resonator (nicht dargestellt) verschraubt werden und vor der Verschraubung lateral positioniert werden. Der Kollimator wird vom zylinderförmigen Kollimatorhalter fixiert. Dieser liegt an einer rechtwinkeligen Schneide an und ist mittels einer Blattfeder in dieser Lage in x-y-Richtung fixiert. Eine weitere Blattfeder (F_z -Feder) drückt den Kollimatorhalter mit dem Kollimator in die kegelförmige Aufnahme. Somit ist die Lage des Kollimators vollständig definiert und fixiert. Über die Mikrometer-Stellschrauben kann die Schneide in x- und y-Richtung verschoben werden. Da die Paarung Kollimator / kegelförmige Aufnahme nur rotatorische Freiheitsgrade besitzt, werden durch Verschiebung der Schneide in x ein Gierwinkel und durch Verschiebung in y ein Rollwinkel erzeugt. Weiterhin kann der Kollimatorhalter inklusive des Kollimators händisch um seine Achse (also die Strahlachse) rotiert werden. Nach erfolgter Justage wird der Spalt der Paarung kegelförmige Aufnahme / kugelförmiger Aufsatz mit geeignetem Kleber gefüllt und der Kollimator damit fixiert.

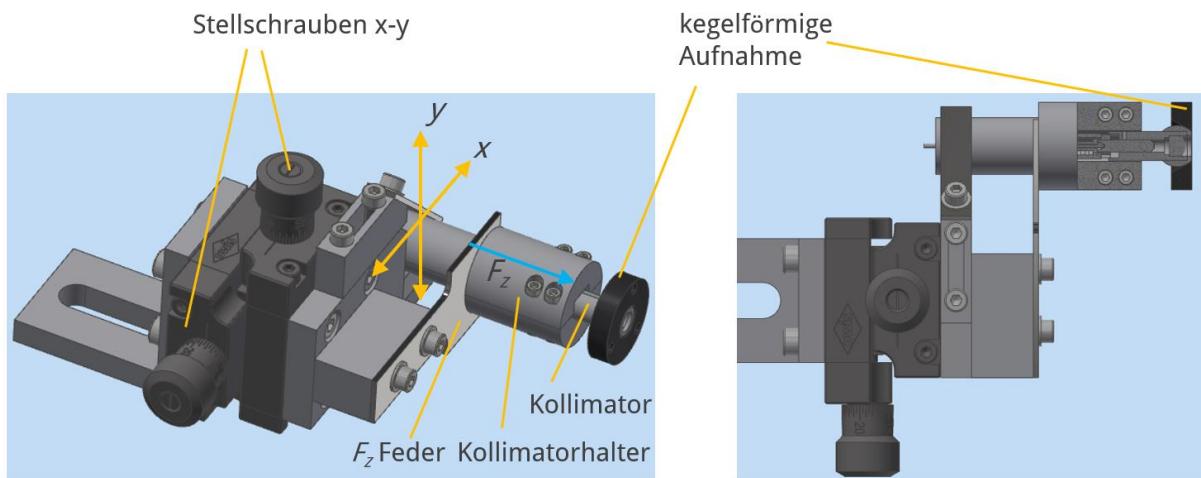


Abbildung 6.18: Justierelement für Justierstelle Kollimator-Kegel-Paarung

Versuchsaufbau Justierstelle – Justierelement

Es wurde ein Versuchsaufbau entwickelt um die Handhabung des Justierelements und die Stabilität der Justierstelle zu untersuchen. Der Kollimator ist dabei durch einen Kollimatororddummy ersetzt, der die geplante Kugelform aufweist und identische Abmessungen wie der geplante Kollimator besitzt. Die Justagelage kann wieder mittels eines Autokollimatorfernrohrs gemessen werden (vgl. AP 2200, Abbildung 6.4). Damit kann die Stabilität dieser Justierstelle quantitativ mit der Stabilität der in AP2200 untersuchten Justierstellen verglichen werden.

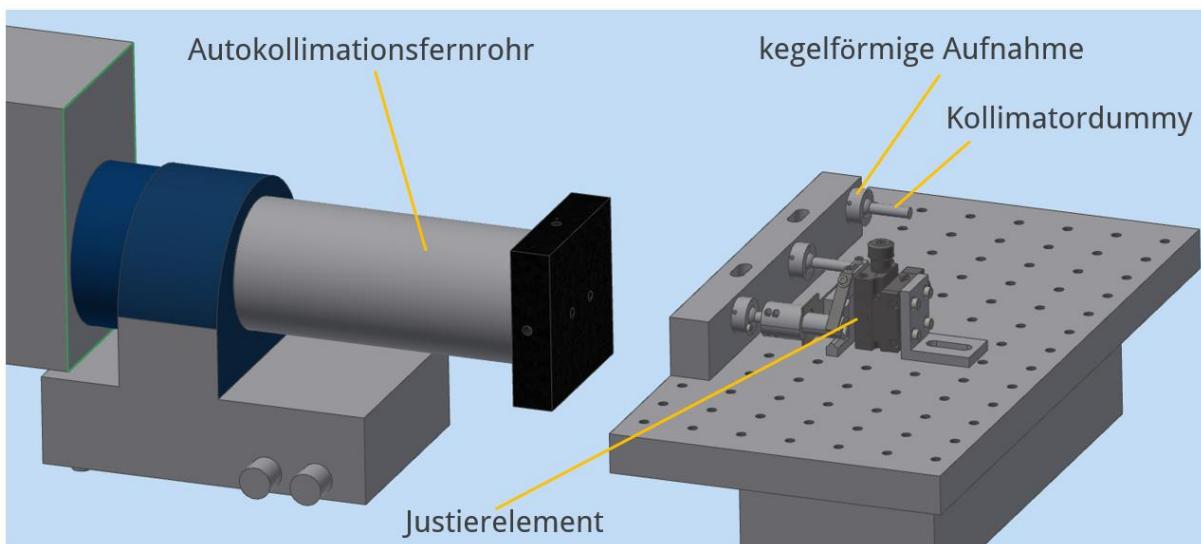


Abbildung 6.19: Versuchsaufbau Justierstelle – Justierelement

Konstruktion eines justagearmen Resonators

Die Basis hier bilden der in AP 2300 durch SIOS entwickelte Resonator mit 60 mm Umlauflänge (Spacer) sowie die in diesem AP entwickelte Kombination aus Justierstelle und abnehmbaren Justierelement (Ein- und Auskopplung). Es wurden die in 2400 ausgewählten Kollimatoren verwendet. Die Verbindung zwischen dem Resonator und der Ein- und Auskopplung (Halter Ein- und Auskopplung) wurde neu konstruiert, siehe Abbildung 6.20.

Damit sind die Justierstellen realisiert, mit denen der Resonator sowie die Ein- und Auskopplung justiert werden kann.

Die Abmessungen wurden auf 58 mm x 53 mm reduziert (im Vergleich zu 86 mm x 92 mm beim Vorab-Aufbau des Si-Doppelspiegel Resonators, vgl. Abbildung 6.20).

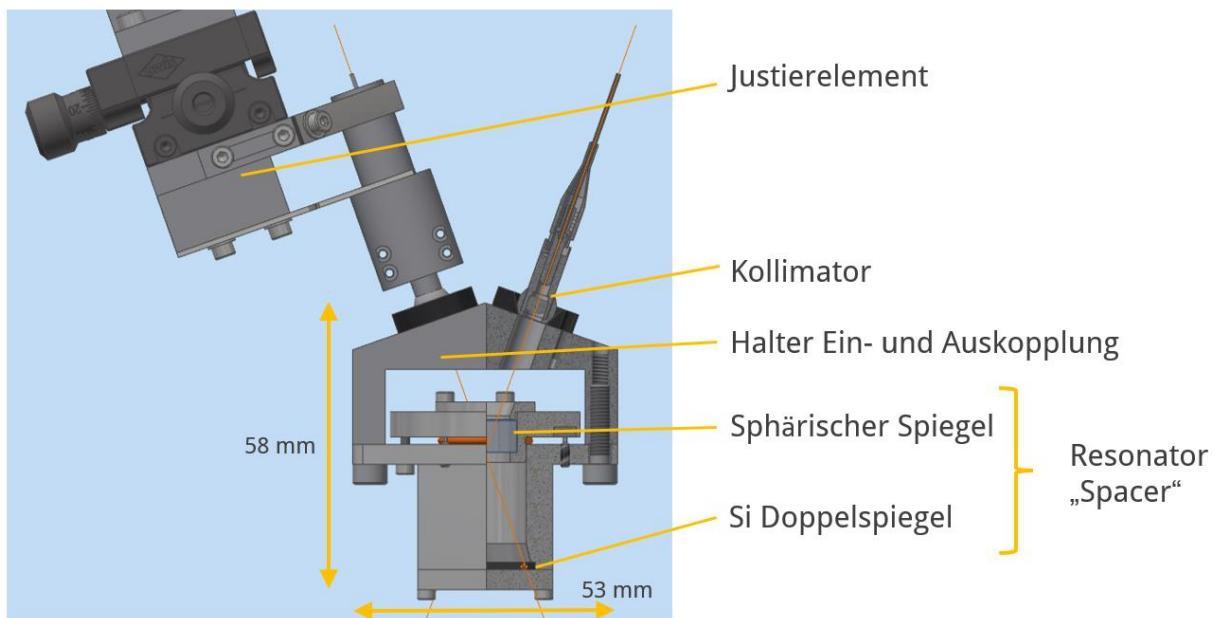


Abbildung 6.20: Miniaturisiertes Gyroskop mit Si-Doppelspiegel-Resonator

6.3 Arbeitspaket 3000 Elektronik

6.3.1 Arbeitspaket 3100 Modulationsgenerierung

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

6.3.2 Arbeitspaket 3200 HF-Signalerfassung

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

6.3.3 Arbeitspaket 3300 Analoge Resonator-Stabilisierung

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

6.3.4 Arbeitspaket 3400 Digitale Resonator-Stabilisierung

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

6.3.5 Arbeitspaket 3500 Signalauswertung für kleine Resonatoren

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

6.4 Arbeitspaket 4000 Inbetriebnahme und Verifikation

6.4.1 Arbeitspaket 4100 Design und Integration

Innerhalb dieses APs sollte ein Design für das vollständige Gyroskop festgelegt werden und die Komponenten aus Mikrotechnik, Regelungs- und Auswertetechnik zu einem Prototyp zusammengefügt werden.

In diesem AP sollte ein Design für das vollständige Gyroskop festgelegt werden und die Komponenten aus Mikrotechnik, Regelungs- und Auswertetechnik zu einem Prototyp zusammengefügt werden.

Im Verlauf des Vorhabens zeichneten sich technologische und konzeptionelle Einschränkungen ab, die ein funktionsfähiges Gyroskop auf Basis der geplanten Si-Doppelspiegel nicht ermöglichten. Zum einen konnten die Si-Spiegel nicht mit der erforderlichen optischen Güte hergestellt werden, wodurch diese für den Einsatz in einem Resonator ausschieden. Zum anderen wurden insbesondere Winkeldriften als messtechnisches Problem ermittelt (vgl. 6.4.2). Die durch die PTB vorgeschlagene Änderung des optischen Aufbaus (Ein- und Auskoppeln der Strahlen über zwei verschiedene Spiegel) konnte aufgrund der weit fortgeschrittenen Bearbeitungszeit nicht mehr umgesetzt werden.

Als aktuell (generell) funktionsfähiger Aufbau des Gyroskops steht somit der Vorab-Demonstrator mit kommerziell erhältlichen sphärischen und justierbaren Spiegeln sowie 270 mm Umlauflänge in Verbindung mit der Prototyp-Hardware, die durch die PTB entwickelt, aufgebaut und in ein Rechnergehäuse integriert wurde (siehe Abbildung PTB 6.46).

Die entwickelten und teilweise praktisch aufgebauten Gyroskop-Varianten (excl. der Elektronik) stellen den Beitrag der Firma SIOS zu diesem AP dar und sind in Abbildung 6.21 dargestellt.

Variante a) ist das Gyroskop, das aufgebaut wurde, messfähig ist und an dem die entsprechenden Entwicklungen und Untersuchungen von der PTB durchgeführt wurden.

Variante b) stellt das praktisch aufgebaute Si-Doppelspiegel Vorab-Gyroskop dar. Es konnte unter anderem durch die nicht hinreichende Qualität der Si-Spiegel nicht in Betrieb genommen werden.

Variante c) zeigt eine konstruierte Version mit Si-Doppelspiegel und miniaturisierter Ein- und Auskopplung der Strahlen.

Variante d) entspricht nahezu Variante c), verwendet aber anstelle des Si-Doppelspiegels zwei kommerzielle Planspiegel. Der Winkel zwischen den Spiegeln wird durch die Form des

Grundkörpers und dessen Fertigungstoleranzen definiert. Anstelle der Planspiegel könnten auch sphärische Spiegel platziert werden.

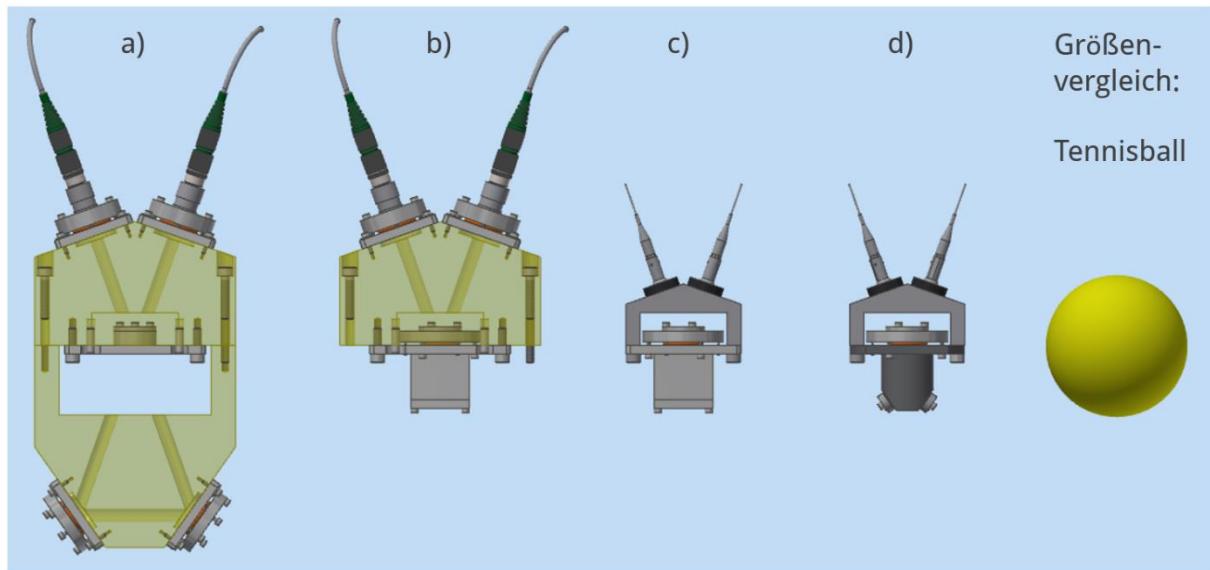


Abbildung 6.21: a): Vorab-Demonstrator (270 mm Resonator Umlauflänge)
 b): Vorab-Demonstrator Si-Doppelspiegel (60 mm Umlauflänge).
 c): Miniaturisiertes Gyroskop mit Si-Doppelspiegel-Resonator
 d): Miniaturisiertes Gyroskop mit kommerziellen Spiegeln

Die Abmessungen und die Massen der Varianten sind in Tabelle 1 aufgetragen. Im Vergleich zur praktisch umgesetzten und messtechnisch untersuchten Variante a) stellt Variante c) und d) eine deutliche Miniaturisierung dar. Ein praktischer Nachweis von deren Funktionsfähigkeit konnte aber aufgrund der beschriebenen Probleme nicht erbracht werden. Generell könnte die Variante d) weiterentwickelt werden um, wie von der PTB vorgeschlagen, eine Ein- und Auskopplung der Strahlen über zwei getrennte Spiegel umzusetzen.

Tabelle 1: Abmessungen und Masse der Gyroskop Varianten

Variante	Abmessungen H × B × T in mm (excl. optische Faser)	Masse in g
a)	210 × 93 × 42	1350
b)	148 × 93 × 42	790
c)	90 × 53 × 39	260
d)	90 × 53 × 39	233

6.4.2 Arbeitspaket 4200 Signaloptimierung

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

6.4.3 Arbeitspaket 4300 Evaluierungsmessung

Dieses Arbeitspaket wurde von der PTB bearbeitet.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises bei SIOS bilden die Personalkosten. Aufgrund der hohen Komplexität der Projektarbeiten und der genehmigten Projektverlängerung kam es zu einem höheren Personalbedarf als ursprünglich geplant. Die daraus resultierenden höheren Personalkosten konnten zum Teil durch geringere Reise- und Materialkosten ausgeglichen bzw. aus Eigenmitteln finanziert werden.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Als Universitätsinstitut ist das IMT auf Förderungen im Rahmen von öffentlichen Förderprogrammen angewiesen, da eine Finanzierung von Forschungsvorhaben aus Eigenmitteln nicht möglich ist. Die Arbeiten wurden sorgsam geplant und im Sinne eines wirtschaftlichen Umgangs mit Fördermitteln bearbeitet.

Die Kernaufgabe der PTB ist die Darstellung und Weitergabe der Einheiten. Wie frühere Arbeiten zu Laserkreiseln gezeigt haben, sind solche Systeme metrologisch von großem Interesse und gehören daher auch in das Aufgabenspektrum der PTB, aber entsprechend der damaligen Erfahrungen ist die genaueste Rückführung über Winkelkomparatoren mit Encodern möglich. Daher liegt in diesem Bereich der Hauptschwerpunkt der Arbeiten in der PTB, die mit der Grundausstattung der PTB durchgeführt werden. Weitere, auch wichtige Arbeiten, zur Verbesserung von Messsystemen können daher nur mit Hilfe zusätzlicher Zuwendungen durchgeführt werden.

Die SIOS Meßtechnik GmbH agiert in einem Markt, der von einem hohen Veränderungstempo geprägt ist. Die Sicherung und der weitere Ausbau der gewonnenen Marktposition setzen eine Weiterentwicklung der Standardprodukte, in vermehrtem Maße aber auch die Erweiterung der Produktpalette voraus. Neben interferometrischen Längenmesssystemen entwickelt und fertigt SIOS Spektrometer für Spezialanwendungen. Das Verbundprojekt *MORe-G-II* bildet dabei einen vielversprechenden Ansatz diese Produktlinie zu ergänzen, bzw. weiter auszubauen.

Aufgrund der Neuartigkeit, der Komplexität und des fachübergreifenden Charakters der zu entwickelnden Verfahren und technischen Systeme konnten die Projektziele nur durch Bildung eines Verbundes von mehreren Partnern erreicht werden, wie er im durchgeführten Förderprojekt realisiert wurde. Dabei haben die Kernkompetenzen der Partner des Verbundprojektes die ganze Breite an benötigtem Know-how abgedeckt, sodass SIOS unmittelbar von der Erfahrung der am Projekt beteiligten Partner profitieren konnte. Ohne Förderung und den gebildeten Verbund wäre die Entwicklung des kompakten Gyroskops nicht oder nur mit großer zeitlicher Verzögerung möglich geworden. Entsprechende Zukunftsmärkte könnten von SIOS nicht erschlossen werden.

Mit den in *MORe-G-II* entwickelten Technologien wurde ein Beitrag zur Entwicklung kompakter Gyroskope für den navigatorischen Einsatz in der Luft- und Raumfahrt erarbeitet. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung eines optischen Gyroskops unter Verwendung von neuen Technologien und Verfahren, der Entwicklung einzelner funktionsfähiger Baugruppen und der Integration in ein Gyroskop-Prototypen.

Dabei lassen sich Teile der entwickelten Technologien und Verfahren auch auf andere Anwendungen übertragen.

9 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

Anhand der in Abschnitt 6.4.3 beschriebenen Verifikation des Prototyps zeigt sich, dass eine Verwendung als Gyroskop in der Navigation noch weitere Entwicklungsarbeiten erfordert, um mit kommerziell verfügbaren Systemen konkurrieren zu können. Die hierfür notwendigen Konzepte wurden erarbeitet, deren Umsetzung aber nicht mit den zusammengesetzten Mikrospiegel realisiert werden kann, sondern eine Neukonstruktion des Resonators erfordert, die aus zeitlichen Gründen nicht mehr im Projekt erfolgen konnte. Doch auch wenn in dem Projekt kein Gyroskop als Produkt hervorgegangen ist, werden die in diesem Vorhaben entwickelten Komponenten und Verfahren weiterentwickelt und auch für andere Anwendungsbereiche genutzt werden.

So haben sich die von der SIOS konstruierten Justierelemente neben ihrer einfachen Handhabung durch eine sehr gute Temperatur- und Langzeitstabilität ausgezeichnet, sodass eine zukünftige Verwendung in verschiedenen hochpräzisen optischen Systemen möglich ist. Die SIOS plant hier konkret auf dieser Basis die Entwicklung neuer Einkopplungen der SIOS Laser in Lichtwellenleiter, entsprechender Justagestellen in Serieninterferometer voranzutreiben. Weiterhin eignen sich diese für den Einsatz für weitere projektspezifische Justageelemente und für hochstabile Vorrichtungen in der Produktion. Die untersuchten Kollimatoren können die Basis für weitere Entwicklungen der SIOS Kollimatoren darstellen.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Photodiodenverstärker wurden von der PTB erfolgreich in einem Interferometer in einer Längenmessmaschine eingesetzt, die zur Unterstützung von Entwicklungen zur Halbleiterlithographie genutzt wird. Das FPGA System, das in diesem Projekt von der PTB genutzt wurde, soll zu einer universellen Plattform ausgebaut werden, die von SIOS verwendet werden kann, um eine Vielzahl von interferometrischen Messverfahren, wie Längeninterferometrie, Gyroskope oder Laserstabilisierungen in einer Elektronik zu kombinieren. In einem vom BMWK finanzierten Transferprojekt zwischen der PTB und SIOS werden aktuell in der PTB entwickelte interferometrische Auswerteverfahren zusätzlich zu dem in diesem Projekt realisierten modifizierterm Pound-Drever-Hall Verfahren zur Stabilisierung von Lasern auf dieser Plattform implementiert.

Das im Rahmen des Vorhabens an der PTB entwickelte modifizierte Pound-Drever-Hall-Verfahren hat sich als leistungsfähige Methode zur simultanen Stabilisierung mehrerer Resonatormoden herausgestellt und bietet daher aufgrund der Fähigkeit zur simultanen Bestimmung des freien Spektralbereiches FSR des Resonators die Möglichkeit Längenänderungen des Resonators zu bestimmen. Mit dem Verfahren kann mit einem stabilisierten Laser aber auch die Länge des Resonators auf einen absoluten Wert geregelt werden. Damit ist es möglich Laser unterschiedlicher Wellenlänge zueinander zu stabilisieren, aber auch eine stabile Referenzstrecke für Absolutinterferometrie mittels des FSI Verfahrens zu schaffen. Eine solche Entwicklung ist Teil eines Projektvorschlags im „European Partnership for Metrology“ Programms der EU.

Im Rahmen des Projekts wurden in der PTB fünf Erfindungsmeldungen eingereicht, davon jeweils zwei zu Ringresonatoren und zum Einsatz von passiven Resonatoren in der Längenmesstechnik sowie eine zum Thema Faserringlaserinterferometer.

10 Bekanntgewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Bei der Bearbeitung der einzelnen Themenfelder wurde zu den jeweiligen Themen recherchiert, ob und inwieweit an anderen Stellen Fortschritte erzielt wurden. Aufmerksam werden die Produkte des Hersteller KVH Industries, Inc als auch Fizoptika beobachtet, die derzeit die kleinsten kommerziell erhältlichen FOGs anbieten. Diese genannten Technologien basieren auf der FOG-Technologie. Insofern setzt keine der Technologien auf Spiegel und einen freilaufenden Laserstrahl, wie es das Vorhaben MOrE-G II tut. Die genannten Technologien tangieren also nur das

Vorhaben im Bereich der optischen Gyroskope, haben aber nur einen geringen Einfluss auf die Technologie des *MORe-G II*. Es ist nicht zu erwarten, dass in den nächsten Jahren ein Gyroskop mit dieser Technologie für Luft- und Raumfahrtanwendungen auf den Markt kommt.

11 Erfolgte Veröffentlichungen

Seitens der SIOS sind im Projektzeitraum keine Veröffentlichungen erfolgt. Dies begründet sich zum einen durch die während der Corona-Pandemie nicht stattfindenden Fachkonferenzen und zum anderen durch das Ziel das Know How der Firma SIOS zu schützen. Die SIOS bearbeitete Arbeitspakte die viele Schnittmengen mit firmeninternen Technologien haben.

12 Zusammenfassung

Die im Rahmen des Vorhabens *MORe-G II* vom IMT der TU Braunschweig, der PTB Braunschweig und der SIOS Meßtechnik GmbH bearbeiteten Arbeitspakte wurden erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen. Die jährlich erstellten technischen Zwischenberichte beinhalten ausführliche Herleitungen und Untersuchungen der entwickelten Technologien. Der Abschlussbericht beinhaltet alle wichtigen und abschließenden Erkenntnisse, die im Rahmen dieses Projekts gewonnen werden konnten.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert von dem Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 50RK1952.

13 Quellen

- [1] DIE LUFTFAHRTSTRATEGIE DER BUNDESREGIERUNG, BROSCHÜRE VOM 01.03.2014, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/luftfahrtstrategie-der-bundesregierung.html>
- [2] HIGHTECH-STRATEGIE 2020, <https://www.hightech-strategie.de/>, ZULETZT GEPRÜFT AM 16.05.2018
- [3] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR) STRATEGIE 2030 – KURZFASSUNG, STAND 24.07.2017, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/dlr-strategie-2030-kurzfassung.pdf?blob=publicationFile&v=6p>,
- [4] DLR NEWSLETTER – COUNTDOWN, DEZEMBER 2015, NR. 31, [HTTPS://WWW.DLR.DE/RD/DESK-TOPDEFAULT.ASPX/TABID-4788/7944_READ-45190/](https://www.dlr.de/rd/DESK-TOPDEFAULT.ASPX/TABID-4788/7944_READ-45190/), ZULETZT GEPRÜFT AM 07.02.2019
- [5] VITTORIO M. N. PASSARO, ANTONELLO CUCCOVILLO, LORENZO VAIANI, MARTINO DE CARLO, AND CARLO EDOARDO CAMPANELLA, GYROSCOPE TECHNOLOGY AND APPLICATIONS: A REVIEW IN THE INDUSTRIAL PERSPECTIVE, SENSORS (BASEL), DOI: 10.3390/S17102284
- [6] FITZOPIKA, [HTTPS://FIZOPTIKA.COM/](https://fizoptika.com/), ZULETZT GEPRÜFT AM 07.02.2019

- [7] BÜTEFISCH, S.; BRAND, U.; BÜTTGENBACH, S.; WILKENING, G.: „TACTILE METROLOGY FOR ACTIVE MICROSYSTEMS“, MICROSYSTEM TECHNOLOGIES, VOL. 14, PP. 1933-1939 (2008)
- [8] KHIAT, A., LAMARQUE, F., PRELLE, C., PHATARALAOHA, A., DITTMER, J., KRAH, T., LEESTER-SCHÄDEL, M., BÜTTGENBACH, S.: „SILICON GRATING MICROFABRICATION FOR LONG-RANGE DISPLACEMENT SENSOR“, JOURNAL OF MICRO/NANOLITHOGRAPHY, MEMS, AND MOEMS (JM3), VOL. 7, P. 021007, (2008)
- [9] LEESTER-SCHÄDEL, M.; HOXHOLD, B.; DEMMING, S.; BÜTTGENBACH, S.: „MICRO ACTUATORS ON THE BASIS OF THIN SMA FOILS“, MICROSYSTEM TECHNOLOGIES, VOL. 14, NO. 4-5, PP 697-704 (2008)
- [10] HOXHOLD, B.; BÜTTGENBACH, S.: „MICRO TOOLS WITH PNEUMATIC ACTUATORS FOR DESKTOP FACTORIES“, SENSORS & TRANSDUCERS, SPECIAL ISSUE, VOL. 7, PP. 160-169 (2009)
- [11] BÜTTGENBACH, S.; BALCK, A.; DEMMING, S.; LESCHE, C.; MICHALZIK, M.; AL-HALHOULI, A.T.: „DEVELOPMENT OF ON CHIP DEVICES FOR LIFE SCIENCE APPLICATIONS“, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING, VOL. 3, PP. 148-158 (2009)
- [12] DITTMER, J.; JUDASCHKE, R.; BÜTTGENBACH, S.: „MICRO-FABRICATED ROTATIONAL ACTUATORS FOR ELECTRIC VOLTAGE MEASUREMENTS EMPLOYING THE PRINCIPLE OF ELECTROSTATIC FORCE“, SENSORS & TRANSDUCERS, SPECIAL ISSUE, VOL. 7, PP. 25-33 (2009)
- [13] LUCAS, N.; FRANKE, R.; HINZE, A.; KLAGES, C.-P.; FRANK, R.; BÜTTGENBACH, S.: „MICROPLASMA STAMPS FORT THE AREA-SELECTIVE MODIFICATION OF POLYMER SURFACES“, PLASMA PROCESSES AND POLYMERS, VOL. 6, PP. 370-374 (2009)
- [14] CADARSO, V.J., LLOBERA, A., VILLANEUVA, G., SEIDEMANN, V., BÜTTGENBACH, S., PLAZA, J.A.: „POLYMER MICROOPTOELECTROMECHANICAL SYSTEMS:ACCELEROMETERS AND VARIABLE OPTICAL ATTENUATORS“, SENSORS AND ACTUATORS A: PHYSICAL, PP 147-153 (2008)
- [15] NIESEL, T., AND V. WULFEN, B., PATENT APPL. NO.: DE 102012015209 B3: RINGLASERKREISEL, 3. AUGUST 2012, ANTRAGSSTELLER: TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, (2012)
- [16] NIESEL, T., LEBER, I., & DIETZEL, A. (2015, AUGUST). EXAMINATION OF THE QUALITY OF 120 DEGREE SILICON DOUBLE MIRROR FOR A MICRO-OPTICAL LASER GYROSCOPE. IN SPIE OPTICAL ENGINEERING+ APPLICATIONS (PP. 957502-957502). INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS.
- [17] LEBER, I., NIESEL, T., & DIETZEL, A. (2015, SEPTEMBER). WAVEGUIDE-COUPING TO BE USED IN A MICRO OPTICAL LASER GYROSCOPE. IN SPIE OPTICAL ENGINEERING+ APPLICATIONS (PP. 95770O-95770O). INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS.
- [18] NIESEL, T., I. LEBER, AND A. DIETZEL. "KLEMMVORRICHTUNG ZUR GENAuen POSITIONIERUNG VON 120° SILIZIUM DOPPELSPIEGELN IN EINEM MOEMS-GYROSKOP." MIKROSYSTEMTECHNIK 2015 (2015)
- [19] LEBER, I., NIESEL, T., BITTER, M., & DIETZEL, A. (2015). OPTISCHE KOPPLER-STRUKTUREN AUS SU-8 UND ORMOCER® ZUR VERWENDUNG IN EINEM OPTISCHEN MIKROGYROSKOP, MIKROSYSTEMTECHNIK 2015
- [20] NIESEL, T., LEBER, I., DIETZEL, A. & FLÜGGE, J. (2016). MORE-G – DEVELOPMENT OF A MICRO-OPTICAL RESONATOR GYROSCOPE, MNE (2016)
- [21] LEBER, I., NIESEL, T., WERNER, C., YU, L., FLÜGGE, J., DIETZEL, A.: ASSEMBLY OF A MICRO-OPTICAL RESONATOR BASED ON SILICON MICRO MIRRORS FOR USE IN GYROSCOPES, SPIE (2017)
- [22] LEBER, I., NIESEL, T., WERNER, C., YU, L., FLÜGGE, J., DIETZEL, A.: MIKROTECHNISCH HERGESTELLTE STRAHLTEILERAUFNAHME ZUR VERWENDUNG IN EINEM OPTISCHEN GYROSKOP, MIKROSYSTEMTECHNIK 2017
- [23] NIESEL, T.; DIETZEL, A. (HG.) (2013): 120° DOPPELSPIEGEL AUS SILIZIUM FÜR DEN EINSATZ IN EINEM MOEMS-GYROSKOP. MIKROSYSTEMTECHNIK KONGRESS 2013.
- [24] NIESEL, T.; DIETZEL, A. (2014): FABRICATION OF 120° SILICON DOUBLE MIRRORS ROBUST AGAINST MISALIGNMENT FOR USE IN MICRO OPTICAL GYROSCOPES. IN: *MICROELECTRONIC ENGINEERING* 121, S. 72–75. DOI: 10.1016/j.mee.2014.03.035.
- [25] NIESEL, T.; DIETZEL, A. (2016): MICRO-CLAMPS FOR PRECISE POSITIONING OF 120° SILICON DOUBLE MIRRORS IN A MOEMS GYROSCOPE. IN: *MICROELECTRONIC ENGINEERING* 159, S. 27–31. DOI: 10.1016/j.mee.2016.02.029.
- [26] FILATOV, YU.V.; LUKYANOV, D.P.; PROBST, R.: DYNAMIC ANGLE MEASUREMENT BY MEAN OF A RING LASER 1997, METROLOGIA, 1997, 34, 343-351
- [27] JUST, A.; KRAUSE, M.; PROBST, R.; BOSSE, H.; HAUNERDINGER, H.; SPAETH, CH.; METZ, G.; ISRAEL, W.: COMPARISON OF ANGLE STANDARDS WITH THE AID OF A HIGH-RESOLUTION ANGLE ENCODER 2009, PRECISION ENGINEERING 33 (2009) 530-533
- [28] RALF D. GECKELER, ANDREAS JUST, 2014, A SHEARING-BASED METHOD FOR THE SIMULTANEOUS CALIBRATION OF ANGLE MEASURING DEVICES, MEASUREMENT, SCIENCE AND TECHNOLOGY, 25 (2014) 105009

-
- [29] RALF D. GECKELER, ALFRED LINK, MICHAEL KRAUSE, CLEMENS ELSTER, 2014, CAPABILITIES AND LIMITATIONS OF THE SELF-CALIBRATION OF ANGLE ENCODERS MEAS. SCI. TECHNOLOGY 25 (2014, 055003

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Einzelziele.	5
Abbildung 3.1: Planung der Arbeitspakete zu Projektbeginn	8
Abbildung 3.2: Angepasste Planung der Arbeitspakete	8
Abbildung 6.1: Strahlengang im Resonator. M1, M2, M3 sind hier die drei sphärischen Resonatorspiegel	12
Abbildung 6.2: Justagekonzepte Resonatorspiegel: links Festkörpergelenk, rechts sphärisches Gelenk.....	13
Abbildung 6.3: Konstruktive Umsetzung der Ein- und Auskopplung der IR-Stahlen mit rotatorischer und translatorischer Justage der Strahlrichtung	14
Abbildung 6.4: Messprinzip	14
Abbildung 6.5: Vier verschiedene Konzepte von Justageelementen im Versuchsaufbau.....	15
Abbildung 6.6: Kurzzeitstabilität von Justageelement I. und II. infolge eines abgeschlossenen Justagevorgangs zum Zeitpunkt 0.....	16
Abbildung 6.7: Langzeitstabilität von Justageelement I. und II. infolge eines abgeschlossenen Justagevorgangs zum Zeitpunkt 0.....	16
Abbildung 6.8: Stabilität von Justageelement I. und II. infolge einer Erwärmung (0..20 min auf ca. 50°C) und der darauf folgenden Abkühlung (ab 20 min, auf Raumtemperatur) der Justageelemente	16
Abbildung 6.9: Konstruktive Umsetzung der Spiegeljustage mit rotatorischen und translatorischen Freiheitsgraden	17
Abbildung 6.10: Vorab-Demonstrator mit 270 mm Umlauflänge	18
Abbildung 6.11: Si-Spiegel Resonator mit 60 mm Umlauflänge und justierbarer Ein- und Auskopplung	19
Abbildung 6.12: oben: gefertigter und aufgebauter Vorab-Demonstrator mit 270 mm Umlauflänge unten: justierbarer Spacer mit Si-Doppelspiegel und 60 mm Umlauflänge.....	19
Abbildung 6.13: Langzeitstabilität der aus dem Vorab-Demonstrator ausgekoppelten Lichtleistung	20
Abbildung 6.14: Kollimation von Licht aus einer LWL	21
Abbildung 6.32: Strahlengang GRIN-Linse zur Strahlkollimation	21
Abbildung 6.33: Vergleich Kollimatoren:	22
Abbildung 6.17: Miniaturisierte Justierstelle Kollimator	23
Abbildung 6.18: Justierelement für Justierstelle Kollimator-Kegel-Paarung	24
Abbildung 6.19: Versuchsaufbau Justierstelle – Justierelement	24
Abbildung 6.20: Miniaturisiertes Gyroskop mit Si-Doppelspiegel-Resonator.....	25
Abbildung 6.21: a): Vorab-Demonstrator (270 mm Resonator Umlauflänge) b): Vorab-Demonstrator Si-Doppelspiegel (60 mm Umlauflänge). c): Miniaturisiertes Gyroskop mit Si-Doppelspiegel-Resonator d): Miniaturisiertes Gyroskop mit kommerziellen Spiegeln	27