

Aufbau eines multifunktionalen Labormessplatzes zur Charakterisierung von polymerbasierten optischen Bauteilen wie Spektrometern oder Multiplexern

Sebastian Smarzyk, Katharina Strathmann, Matthias Haupt

Jade Hochschule, FB-Ingenieurwissenschaften

Abstract

Laborcharakterisierungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung der Leistung, Qualität und Zuverlässigkeit optischer Bauteile, insbesondere bei der Evaluierung erster Demonstratoren. Ein multifunktionaler Messplatz optimiert die begrenzten Laborkapazitäten, reduziert Kosten durch effiziente Ressourcennutzung und fördert die Zusammenarbeit sowie den Wissensaustausch zwischen verschiedenen Projekten. Die Bündelung von Fachwissen treibt innovative Synergien und Fortschritt voran.

1. Einleitung

Die Durchführung von Laborcharakterisierungen, einschließlich spektraler Analyse, Messung von Transmission und Absorption, Reflexion, Streuung, Polarisationsverhalten, Leistungseffizienz, thermischer Stabilität sowie Langzeitalterung, ist unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit, Qualität und Zuverlässigkeit optischer Bauteile sicherzustellen. Besonders bei der Bewertung erster Demonstratoren ist die Laborcharakterisierung von entscheidender Bedeutung, da sie es ermöglicht, die tatsächliche Leistung und Verhaltensweisen der optischen Bauteile, im Vergleich zu den theoretischen Annahmen und Simulationen während des Designprozesses, zu überprüfen [1]. Ein multifunktionaler Messplatz für optische Laborcharakterisierungen bietet die Möglichkeit, den oft sehr begrenzten Platz im Labor optimal zu nutzen, indem verschiedene Geräte und Ausrüstungen in einem einzigen Messaufbau genutzt werden. Dies führt unter anderem zu Kosteneinsparungen durch die Reduzierung redundanter Anschaffungen und Wartungskosten. Zusätzlich ermöglicht die gemeinsame Nutzung von Ausrüstung und Ressourcen zwischen verschiedenen Projekten eine verbesserte Zusammenarbeit und den Austausch von „Know-how“ und Erfahrungen. Dies schafft Synergien zwischen den Forschungsaktivitäten, beschleunigt den Fortschritt und fördert die Entwicklung innovativer Lösungen in einem vielseitigen Forschungsumfeld. Da es sich bei diesem Projekt um die Entwicklung eines Versuchs-Setups handelt und daher hauptsächlich bekannte Techniken angewendet und kombiniert werden, liegt der wesentliche Erkenntnisgewinn in den folgenden Charakterisierungen. Daher werden im nachfolgenden Text die bevorstehenden Charakterisierungsmessungen kurz näher beschrieben, um die Motivation hinter dem Aufbau des Setups zu verdeutlichen. In Abschnitt zwei erfolgt eine kurze Vorstellung der Projekte am Messplatz, während ab Abschnitt drei der Aufbau des Setups näher erläutert wird.

2. Projekte am Messplatz

Arrayed Waveguide Gratings (AWGs) und Spektrometer sind optische Instrumente, die Licht in seine spektralen Komponenten zerlegen. Beide finden Anwendung in der Spektralanalyse, obwohl AWGs hauptsächlich in optischen Kommunikationsnetzwerken eingesetzt werden, unterdessen Spektrometer in verschiedenen wissenschaftlichen und industriellen Bereichen zur Analyse von Materialien und Molekülen genutzt werden. An der Jade Hochschule Wilhelmshaven werden in den Projekten „MiniSpectral“ und „OptiAWG-3D“ zum einen ein miniaturisiertes polymerbasiertes Spektrometer und zum anderen ein Wellenlängenmultiplexer für die optische Kommunikationstechnik entwickelt. Dieser Multiplexer basiert auf einem spritzgegossenen AWG und zielt darauf ab, die derzeitige Datenübertragungsrate von bis zu 1 GBit/s über optische Polymerfasern (Polymer Optical Fiber, POF) auf bis zu 40 GBit/s zu steigern. Abbildung 1 zeigt eine Konzeptzeichnung des AWGs. Das Grundprinzip besteht darin, dass polychromatisches Licht, das verschiedene Wellenlängen umfasst, in das AWG eingeführt wird. Dieses Licht wird dann auf eine Anordnung von optischen Wellenleitern

verteilt, die unterschiedliche Längen haben. Die Lichtwellen durchlaufen diese Wellenleiter mit unterschiedlichen Laufzeiten, was zu Phasenunterschieden zwischen den Wellenleitern führt. An den Ausgangsporten des Wellenleiterarrays treffen die Lichtwellen mit unterschiedlichen Phasen wieder aufeinander und interferieren miteinander. Durch dieses Prinzip der Interferenz können die verschiedenen Wellenlängen nach ihrer spezifischen Wellenlänge getrennt werden, wenn sie das AWG verlassen. Dies ermöglicht es, die Daten, die über jede Wellenlänge übertragen werden, getrennt voneinander zu empfangen und zu verarbeiten [2].

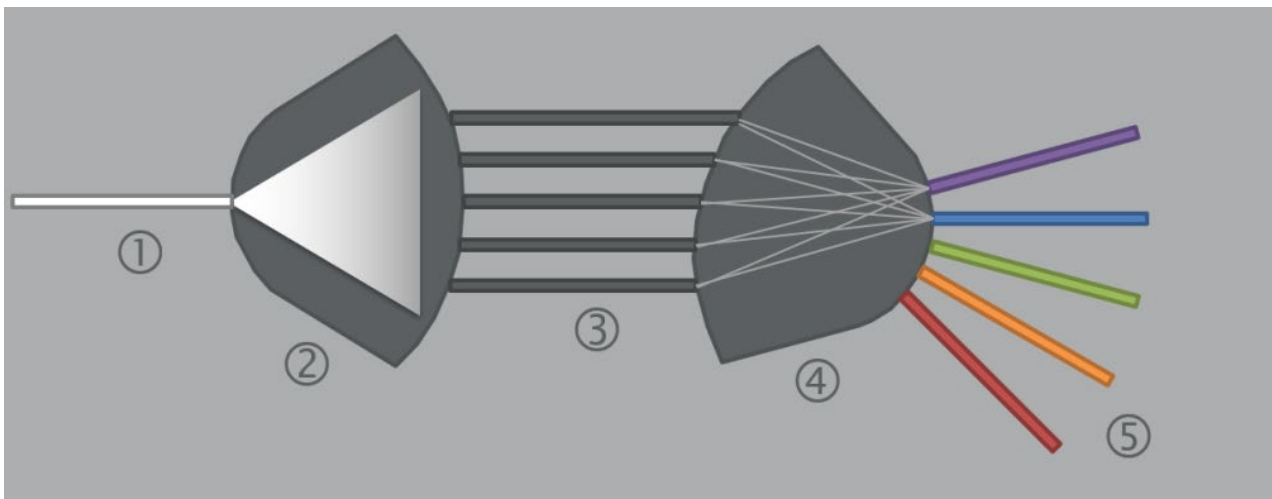


Abbildung 1 Konzeptzeichnung des AWGs 1) Licht verschiedener Wellenlängen wird über eine POF eingekoppelt, 2) Sämtliche Wellenleiter des Wellenleiter Gitters werden bestrahlt, 3) Wellenleiter verschiedener Länge führen das Licht, 4) Durch die unterschiedliche Lauflänge des Lichtes kommt es zur Interferenz, 5) An verschiedenen Punkten auf der Oberfläche des Bauteils können die Wellenlängen ausgelesen werden

Im Rahmen des Projekts "MiniSpectral" arbeiten wir an der Entwicklung eines miniaturisierten Spektrometers, das z.B. in der analytischen Chemie zum Einsatz kommen könnte. Eine innovative Herangehensweise wird verfolgt: Alle Funktionen eines herkömmlichen Spektrometers werden in einer polymerbasierten Optik vereint, deren Grundstruktur dem Prinzip eines Rowland-Kreises entspricht [3]. Diese Optik wird mithilfe eines konkaven Beugungsgitters an der Oberfläche des Bauteils realisiert. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass herkömmliche Einzelkomponenten wie Linsensysteme komplett entfallen. Dank modernster Spritzgusstechnik und speziell entwickelter Werkzeuge ist es möglich, die Herstellung der Optik in einem einzigen Produktionsschritt zu realisieren. Die dreidimensionale Kuppelstruktur der Optik stellt hierbei eine Besonderheit dar.

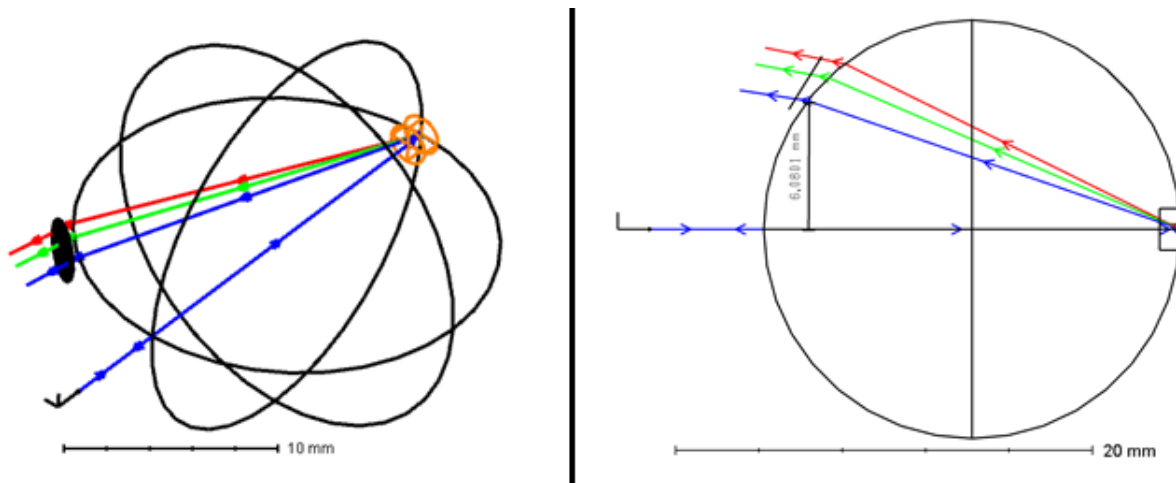


Abbildung 2 Mit Ansys Zemax erstellte Simulationen des entwickelten Spektrometers; Die Kuppel aus Polymer hat einen Radius von r , während das an der Oberfläche aufgebrachte und verspiegelte Gitter einen Krümmungsradius von $2r$ aufweist. Wenn das Licht durch eine Eingangsfaser eingekoppelt wird, trifft es auf das Gitter, das es in seine einzelnen Wellenlängen zerlegt und reflektiert. Aufgrund des Verhältnisses der Radien der beiden Kreise von zwei zu eins fokussieren sich die nach Wellenlängen getrennten Strahlen auf der Oberfläche der Kuppel und werden dann von einer Detektorzeile erfasst. Rechts: Positionen der in Wellenlängenzerlegten Strahlen. Das Licht mit einer Wellenlänge von 400 nm sollte an einer Position von $6,08\text{ mm}$ über der Einkoppelfaser auf der Oberfläche der Polymerkuppel detektiert werden.

Das Dispersionsgitter an der Oberfläche des Bauteils bzw. im Bereich der Kuppel wird eine hohe Dichte von bis zu 1000 Linien pro Millimeter aufweisen. Dadurch wird eine feine Auflösung von weniger als 1 Nanometer ermöglicht, was insbesondere in der analytischen Chemie von Bedeutung ist. Abbildung 2 verdeutlicht das Konzept des Spektrometers. Licht wird durch eine Eingangsfaser in die polymerbasierte Kuppel mit dem Radius r eingeführt. Am Ende der Kuppel befindet sich ein verspiegeltes Dispersionsgitter mit einem Radius von $2r$. Aluminium zeigt sich hier als vielversprechendes Material für die Verspiegelung des Gitters, da es die Reflektivität im sichtbaren Spektralbereich erhöht. Das Gitter zerlegt das Licht in seine einzelnen Wellenlängen, die dann in die Polymerkuppel zurückreflektiert werden. Durch das Verhältnis der Radien des Gitters zur Kuppel von zwei zu eins fokussieren sich die einzelnen Wellenlängen auf der Oberfläche der Kuppel. Dort ist eine Detektorzeile angebracht, um das zerlegte Licht zu detektieren und weiter zu analysieren [4].

3. Umsetzung

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des aufgebauten Messplatzes. Dieser Messplatz dient als zentrales Instrument zur Charakterisierung und Analyse von Lichtsignalen, die durch verschiedene Proben und Bauteile laufen. Ein zentraler Bestandteil dieser Einrichtung besteht aus vier Laserdioden, die jeweils unterschiedliche Wellenlängen (660 nm , 520 nm , 450 nm , 405 nm) emittieren. Diese Lichtquellen sind von entscheidender Bedeutung für die Durchführung verschiedener Experimente und Tests, bei denen die Interaktion von Licht mit Materialien untersucht wird. Um das Licht der Laserdioden zu nutzen, werden sie durch optische Polymerfasern (POF) geleitet. Diese Fasern dienen als Kanäle, die das Licht von den Laserdioden zu einem Punkt der Konvergenz führen, bevor sie in eine einzelne POF zusammengeführt werden. Diese POF fungiert dann als Hauptlichtleiter, der das gebündelte Licht auf das Testobjekt richtet, das untersucht und charakterisiert werden soll. Der Messplatz bietet die Möglichkeit, die Laserdioden sowohl einzeln als auch gleichzeitig zu betreiben. Diese Flexibilität eröffnet eine Vielzahl von Experimentiermöglichkeiten, bei denen unterschiedliche Lichtintensitäten und Wellenlängen-Kombinationen getestet werden können, um verschiedene optische Phänomene zu untersuchen. Um die Interaktion des Lichts mit dem Testobjekt zu analysieren, wird ein hochsensibler Photodetektor verwendet (momentan

Graviton SPD-2 650 für den Wellenlängenbereich von 380 nm – 1000 nm). Der Detektor dient dazu, die Position und Intensität des Lichts zu messen, und ermöglicht es, wichtige Informationen über die optischen Eigenschaften der Probe zu gewinnen.

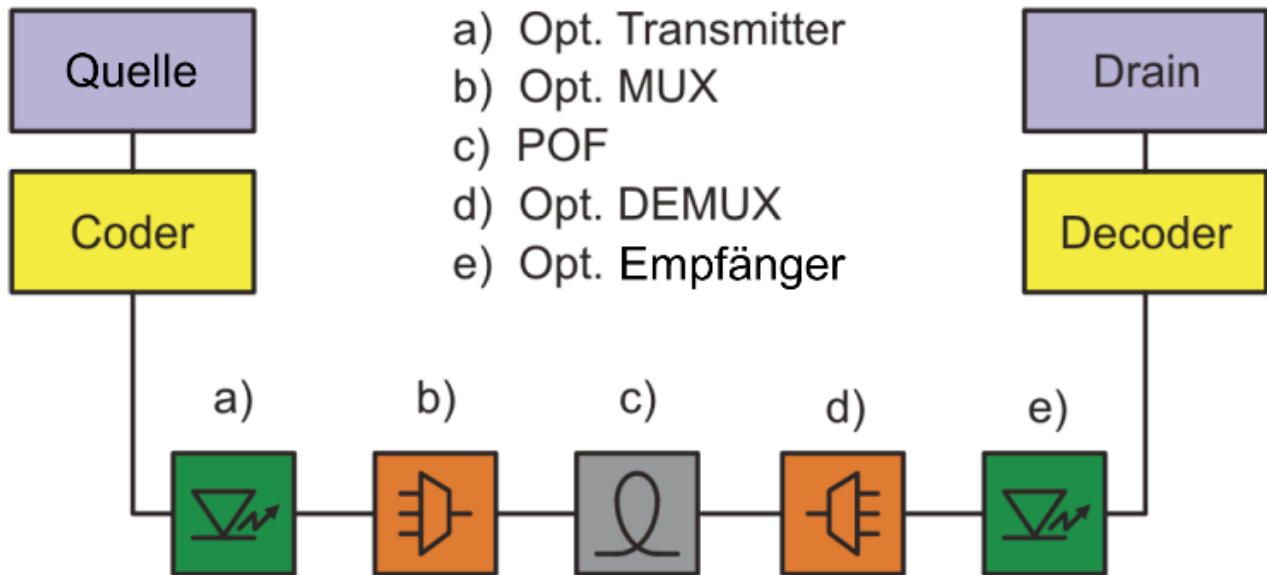


Abbildung 3 Ein schematischer Überblick eines Messplatzes zur Signalanalyse und -charakterisierung, bestehend aus Signalquelle, Messinstrumenten, Steuerungseinheit, Datenerfassung und Auswertung.

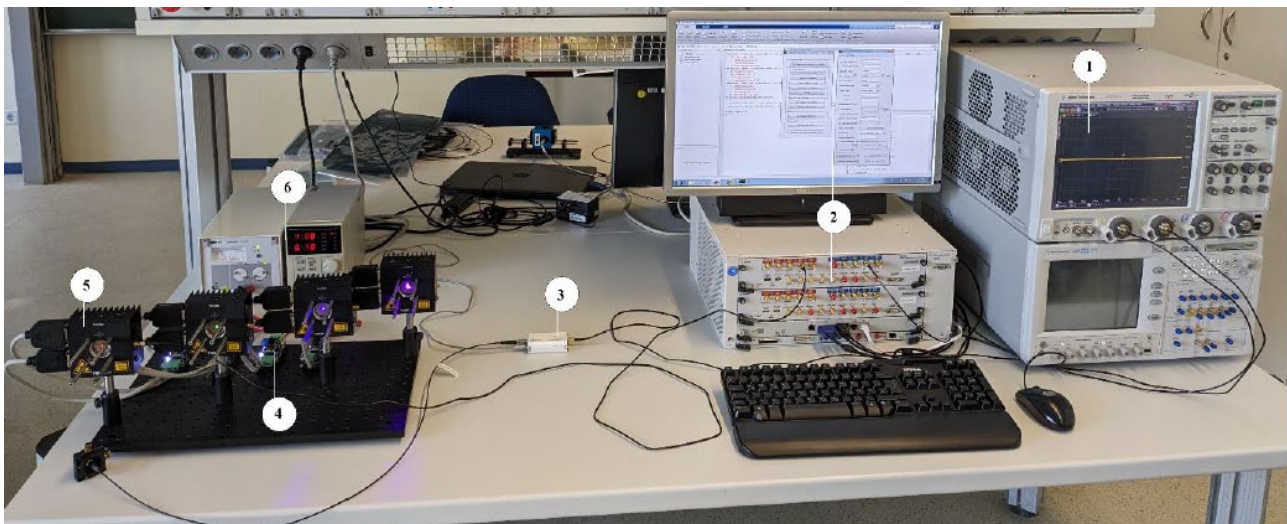


Abbildung 4 Erster Aufbau der Komponenten des Messplatzes: 1) Oszilloskop (DSA-X-91604A); 2) Arbiträrgenerator (M8190A AWG); 3) Photodetektor (Graviton SPD-2 650); 4) Laserdioden Treiber; 5) temperaturgesteuerte Laserdioden-Halterung; 6) Regelnetz-Generator, (Bild: Tobias Überall).

So kann unter anderem durch die Position des Photodetektors ermittelt werden, an welcher Stelle das eingekoppelte Licht das Testobjekt verlässt und diese Position mit der vorher simulierten Position verglichen werden (vergleiche Abbildung 1 und Abbildung 2). Des Weiteren besteht die Möglichkeit mit einem Arbiträrgenerator ein Signal auf die Laserdioden zu modulieren und dieses wiederum durch das Testobjekt zu führen. Anschließend wird das modulierte Signal mithilfe einer Photodiode und eines Oszilloskops erfasst und ausgewertet. Diese Schritte ermöglichen es, die Reaktion des Testobjekts auf das modulierte Lichtsignal zu

untersuchen und wichtige Daten über seine optischen Eigenschaften nicht nur im statischen zu gewinnen. Insgesamt bietet dieser Messplatz eine umfassende und hochpräzise Plattform zur Erforschung verschiedener optischer Phänomene und Materialien. Abbildung 4 zeigt den initialen Aufbau der Geräte für den Messaufbau, wobei die grundlegenden Komponenten wie Laserdioden, Arbiträrgenerator, Oszilloskop und Photodetektor zu sehen sind. Tabelle 1 präsentiert einen Überblick über die breite Palette von Fähigkeiten des Messplatzes. Seine Vielseitigkeit und Flexibilität machen ihn zu einem wichtigen Werkzeug in den Bereichen der Materialwissenschaft, Optoelektronik, Photonik und weiteren Forschungsgebieten, in denen die Wechselwirkung von Licht und Materie im Mittelpunkt steht.

Fähigkeiten	Beschreibung
Signal-Rausch-Verhältnisbestimmung (SNR)	Bestimmt das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen in einem Signal.
Auflösung von Interferenzmustern	Analysiert und bestimmt die Auflösung von Interferenzen in einem Signal.
Validierung der Einfügedämpfung	Validiert die Einfügedämpfung, indem die Differenz zwischen eingehendem und ausgehendem Signal gemessen wird.
Überlagerung von Signalen	Kann mehrere Signale überlagern und deren Interaktion analysieren.
Test von verschiedenen Datenübertragungsraten bis zu 40 Gbit/s	Testet die Leistung und Zuverlässigkeit von Datenübertragungen bei Geschwindigkeiten von bis zu 40 Gigabit pro Sekunde.

Tabelle 1 Übersicht über die vielfältigen Fähigkeiten eines hochmodernen Messplatzes zur präzisen Analyse und Charakterisierung von Signalen sowie Datenübertragungen

4. Zusammenfassung Ausblick

Die Laborcharakterisierung optischer Bauteile ist entscheidend für deren Leistung und Zuverlässigkeit, insbesondere bei der Bewertung von ersten Demonstratoren. Ein multifunktionaler Messplatz optimiert Laborkapazitäten, senkt Kosten und fördert die Zusammenarbeit zwischen Projekten, was zu innovativen Fortschritten führt. Zwei aktuell am Messplatz untersuchte Projekte wurden vorgestellt. Der Messplatz dient als zentrales Instrument zur Charakterisierung und Analyse von Lichtsignalen, die durch verschiedene Proben und Bauteile laufen. Die Flexibilität des Messplatzes ermöglicht es, die Laserdioden einzeln oder gleichzeitig zu betreiben, was eine Vielzahl von Experimentiermöglichkeiten für die Untersuchung verschiedener optischer Phänomene bietet. Ein hochsensibler Photodetektor wird verwendet, um die Interaktion des Lichts mit dem Testobjekt zu analysieren und wichtige Informationen über seine optischen Eigenschaften zu gewinnen. Zusätzlich ermöglicht ein Arbiträrgenerator die Modulation der Laserdioden, um die Reaktion des Testobjekts auf das modulierte Lichtsignal zu untersuchen. Für die Zukunft ließe sich der Messplatz noch weiter automatisieren, sodass beispielsweise ein automatisches Einkoppeln von Licht in das Testobjekt möglich wäre und der gesamte Messvorgang quasi remote am Computer gesteuert werden. Insgesamt bietet dieser Messplatz eine umfassende und hochpräzise Plattform zur Erforschung verschiedener optischer Phänomene und Materialien und ist daher in den Bereichen Materialwissenschaft, Optoelektronik, Photonik und verwandten Forschungsgebieten von großer Bedeutung. Die enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen

Forschungsprojekten am Messplatz wird weitere Synergien schaffen und den Fortschritt in der Optik vorantreiben.

5. Danksagung / Angaben zu

Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

6. Literaturverzeichnis

- [1] I. Kaminow et al. Optical Fiber Telecommunications VA: Components and Subsystems. Optics and Photonics. Elsevier Science, 2010. isbn: 9780080565019
- [2] Dana Seyringer. Arrayed Waveguide Gratings. May 2016. isbn: PDF ISBN: 9781510603592, epub ISBN: 9781510603608, mobi ISBN: 9781510603615. doi: 10.1117/3.2242852.
- [3] Henry A. Rowland. "XXIX. On concave gratings for optical purposes". In: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 16.99 (1883), S. 197–210. doi: 10.1080/14786448308627419.
- [4] Smarzyk, Strathmann, Lass, Haupt. "Entwicklung eines miniaturisierten Spektrometers für den optischen Wellenlängenbereich". In: DGAo Proceeding (2023), P5. url: https://www.dgao-proceedings.de/download/124/124_p5.pdf