

Heiko Reinsch, Maik Baier, Michael Schulz

Hochgenaue Messanlage zur Bestimmung des spektralen Transmissionsgrades an Prismen-Ferngläsern und anderen optischen Komponenten

ISSN 2751-6598
ISBN 978-3-944659-39-8

DOI 10.7795/110.20241111

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Metrologie

PTB-M-7

Braunschweig, November 2024

Heiko Reinsch, Maik Baier, Michael Schulz

Hochgenaue Messanlage zur Bestimmung des spektralen Transmissionsgrades an Prismen- Ferngläsern und anderen optischen Komponenten

ISSN 2751-6598

ISBN 978-3-944659-39-8

DOI 10.7795/110.20241111

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Reinsch, H., Baier, M. und M. Schulz, 2024.

Hochgenaue Messanlage zur Bestimmung des spektralen Transmissionsgrades an Prismen-Ferngläsern und anderen optischen Komponenten.

Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

PTB-Bericht M-7. ISBN 978-3-944659-39-8.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20241111>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de

PTB-Bericht

Heiko Reinsch, Maik Baier, Michael Schulz
Fachbereich 4.2 Bild und Wellenoptik
Physikalische-Technische Bundesanstalt Braunschweig

**Hochgenaue Messanlage zur Bestimmung des spektralen Transmissionsgrades
an Prismen-Ferngläsern und anderen optischen Komponenten**

PTB-M 7

Stand: 14. März 2024

Kontakt: Heiko.Reinsch@ptb.de

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG	4
1.1 KONZEPTION	4
1.2 OPTISCHE GRUNDLAGEN	5
2 TECHNISCHER TEIL	6
2.1 DER AUFBAU DER MESSANLAGE	6
2.2 DIE LICHTQUELLE	7
2.3 DER MONOCHROMATOR	8
2.4 DER KOLLIMATOR	8
2.5 DIE APERTURBLENDE	9
2.6 DER PRÜFLING	9
2.7 DIE FALSCHLICHTBLENDE	9
2.8 DIE PHOTOMETERKUGEL	9
2.9 DIE OPTOELEKTRONIK	11
2.10 DIE MOTORSTEUERUNG	11
2.11 DAS MESSPROGRAMM	12
3 QUALITÄTSSICHERUNG UND VERGLEICHSMESSUNGEN	12
3.1 UNTERSUCHUNGEN ZUR LINEARITÄT DES ÜBERTRAGUNGSVERHALTENS	14
3.2 DIE WELLENLÄNGENSKALA DES MONOCHROMATORS	15
3.3 VERGLEICHSMESSUNG AN EINEM FILTER	15
4 DANKSAGUNG	16
5 QUELLENVERZEICHNIS	16

Zusammenfassung

Es wird eine rechnergesteuerte Messanlage beschrieben, deren Konzeption es gestattet, den spektralen Transmissionsgrad von strahlformändernden Optiken, wie z.B. Ferngläsern mit versetztem Strahlengang und von anderen optischen Komponenten mit nicht versetztem Strahlengang, mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Dazu gehört die Beschreibung des Messprinzips, Aufbaus, Funktion, Software und Elektronik der gesamten Messanlage. Eine Erweiterung zur Transmissionsmessung von Mikroskopobjektiven wird ebenfalls dargestellt.

Summary

A computer-controlled measuring system is described, the concept of which allows the spectral transmittance of beam-shaping optics to be determined with high accuracy, such as e.g., prism binoculars with an offset beam path and other optical components with no beam path offset. This includes the description of the measuring principle, setup, function, software, and electronics of the entire measuring system. An extension to microscope objectives is also shown.

Einleitung

1.1 Konzeption

Das hier verwendete Messprinzip zur Messung des Transmissionsgrads strahlformändernder Optiken, wie Ferngläsern oder Objektiven basiert auf einem variablen Strahlengang. Im ersten Schritt wird der am Empfänger ankommende Strahlungsfluss, zunächst ohne den Prüfling, gemessen. Im zweiten Schritt wird dann der Prüfling in den Strahlengang eingeschoben und in diesem Zustand der am Empfänger ankommende Strahlungsfluss gemessen. Der Strahlungsfluss durch den Prüfling wird ins Verhältnis zum Strahlungsfluss ohne Prüfling gesetzt. Dieser Quotient ist der Transmissionsgrad.

Unterschiedliche Abschattungen oder Reflektionen beeinflussen das Messergebnis und sind zu vermeiden. Da der Strahlengang (z. B. bei Prismen-Ferngläsern) einen seitlichen Versatz aufweisen kann, sind Linearverschiebeeinheiten für den Prüfling und den Detektor notwendig.

Bei einer Vorgängerversion der aktuellen Apparatur erfolgte die Messung des spektralen Transmissionsgrades auf manuelle Weise, also durch Handbedienung der Verschiebeeinheiten, des optischen Verschlusses und des Monochromators. Die Spannungswerte wurden mit einem Multimeter gemessen und die eingestellten Wellenlängen am Monochromator visuell abgelesen. Das fotoelektrische Sensorelement reagiert dabei gleichermaßen empfindlich auf das Nutzsignal, wie auch auf störendes Streulicht oder Fremdlicht. Prinzipiell ist daher die manuelle Bedienung ungünstig, da ein Operateur nicht bei völliger Dunkelheit Messgeräte ablesen und genaue Verstellungen von Verschiebeeinheiten vornehmen kann.

Aus diesem Grunde ist in den letzten Jahren der gesamte Messaufbau automatisiert worden. Mit den Mitteln der rechnergestützten Prozesssteuerung und Datenerfassung ist eine vollautomatisch ablaufende Messung möglich. Der Einfluss eines Operateurs und das durch beleuchtete Geräte verursachte Fremdlicht ist dadurch ausgeschlossen.

Die so entstandene Messanlage nutzt als Steuerrechner einen PC, der über USB und den IEEE-488-Bus (IEC-Bus) mit den angeschlossenen Geräten kommuniziert, den Messablauf überwacht und die Messdaten sammelt, aufbereitet und bereitstellt.

Dieses Konzept bietet die Möglichkeit, nach einmaliger, experimentell ermittelter und abgespeicherter Justierung (für die Positionen des Prüflings und des Detektors) automatisch einen Messzyklus durchzufahren, der dann ohne Anwesenheit eines Operateurs beliebig oft wiederholt werden kann.

Durch die so gewonnene Möglichkeit von Vielfachmessungen kann die statistische Unsicherheit durch die Schwankungen des Messsignals, also das Rauschen, drastisch reduziert werden.

1.2 Optische Grundlagen

Mit dieser Messanlage kann der spektrale Transmissionsgrad von optischen Elementen oder Systemen bestimmt werden. Dies können Fernrohre, Fotoobjektive, Linsen, Graugläser oder andere lichtabsorbierende Komponenten sein. Die Messung der spektralen Transmission dient u.a. zur Ermittlung der Farbtreue bzw. der Farbfilterung von optischen Komponenten. Der spektrale Transmissionsgrad wird mit Hilfe eines achsenparallel einfallenden und begrenzten Strahlenbündels über die Messung des Verhältnisses der Strahlungsleistung mit und ohne Probe bestimmt. Aus diesen beiden Messwerten kann der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ einer optischen Komponente bestimmt werden. Als Grundlage wird die Norm DIN ISO 14490-5 [3] verwendet. Ist bei der Wellenlänge λ der auf den Prüfling einfallende Strahlungsfluss $\Phi_o(\lambda)$ und der austretende Strahlungsfluss $\Phi(\lambda)$, so ergibt sich der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ zu:

$$\tau(\lambda) = \Phi(\lambda) / \Phi_o(\lambda).$$

Das Ergebnis ist eine einheitenlose Größe, die bei jeder gemessenen Wellenlänge als Prozentwert angegeben wird.

2 Technischer Teil

2.1 Der Aufbau der Messanlage

Zur Messung des Transmissionsgrades von Prismen-Ferngläsern ist es, bedingt durch den versetzten Strahlengang, erforderlich, die Position von Detektor und Prüfling für die verschiedenen Phasen des Messablaufes in weiten Bereichen zu verändern und genau auf die jeweilige Messposition einzustellen. Abb. 1 zeigt den Aufbau der Messanlage.

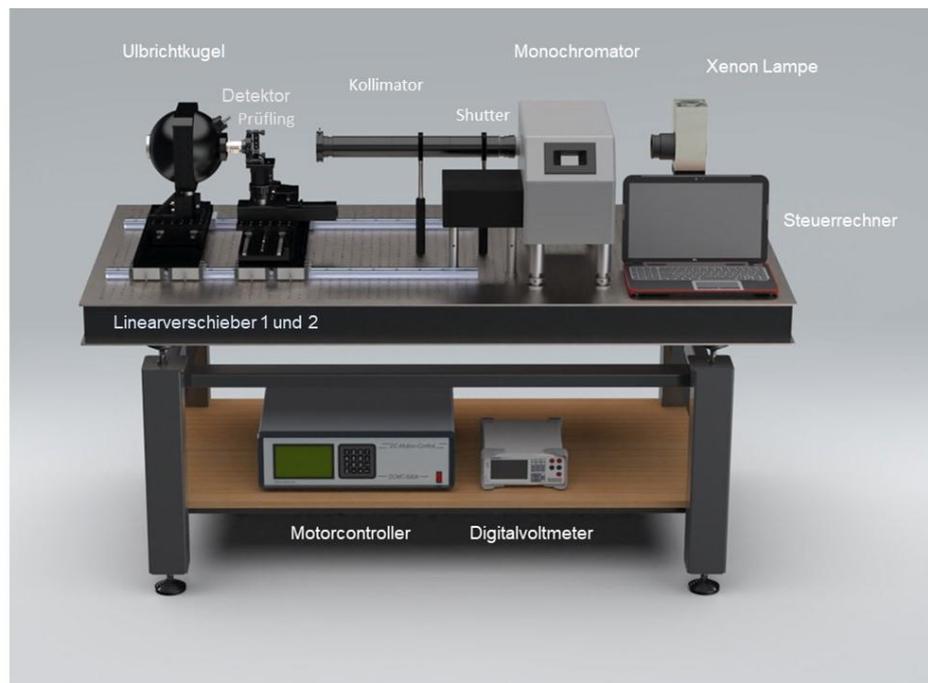


Abb. 1: Aufbau der Messanlage

Der Messaufbau befindet sich auf einem optischen Tisch. Detektor und Prüfling sind auf spindelgetriebenen, motorisch verstellbaren Linearverschiebern befestigt, die eine Verstellung quer zur optischen Achse ermöglicht. Beide Verschiebeeinheiten haben einen freien Verstellbereich von etwa 300 mm.

Die Abb. 2 zeigt ein Foto der Messanlage mit einem Fernglas als Prüfling:

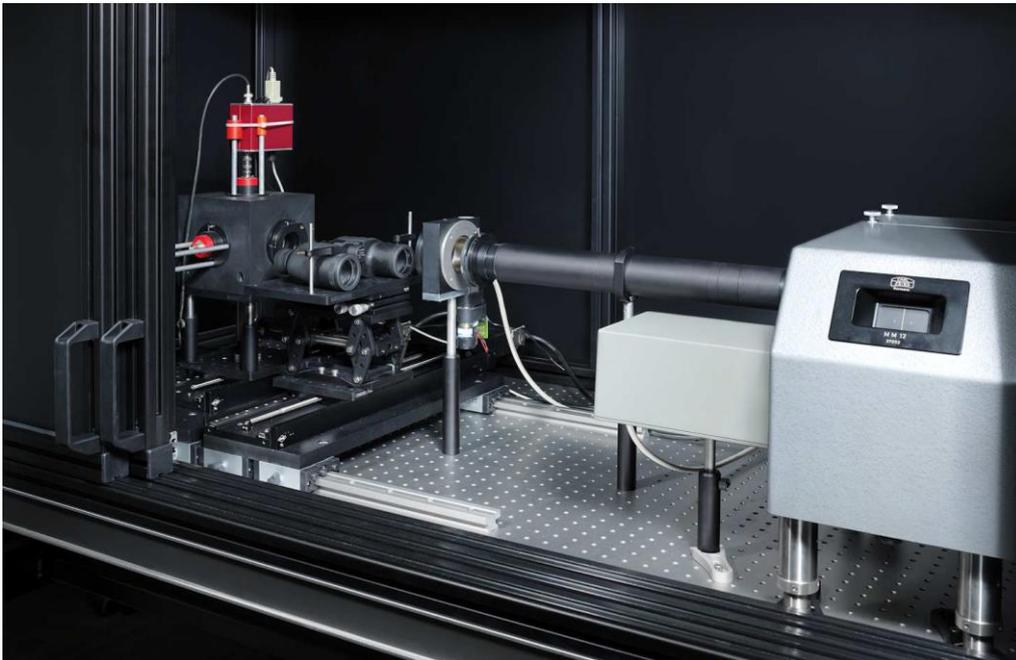


Abb. 2: Foto der Messanlage

Die Positionsfindung innerhalb dieses Weges geschieht durch Zählung der Impulse eines inkrementalen Drehgebers auf der Motorachse. Die Referenzposition, also der Nullpunkt der Zählung, wird durch einen Referenzschalter festgelegt, der zu Beginn einmal angefahren werden muss.

Mit Hilfe der Verschiebeeinheiten und einer kommerziellen Controllereinheit [1] werden zunächst empirisch die richtigen Positionen von Detektor und Prüfling in Einheiten der Zählinkremente ermittelt und in Form einer Tabelle im Steuerrechner abgelegt. Es können so alle erforderlichen mechanischen Justierungen mit hinreichender Genauigkeit rechnergesteuert reproduziert werden.

2.2 Die Lichtquelle

Als Strahlungsquelle findet eine Xenonlampe Verwendung, die einen räumlich und zeitlich konstanten Strahlungsfluss bzw. spektrale Bestrahlungsstärke im vorgesehenen Wellenlängenbereich aussendet. Die Strahlungsleistung muss über die Messzeit im Rahmen der gewünschten Messunsicherheit für ein Wertepaar hinreichend konstant gehalten werden. Ferner ist die Lichtquelle gegen ungewollte diffuse Lichtabstrahlung in den Raum durch ein geeignetes

Lampenhaus abgeschirmt. Die Lichtquelle ist so justiert, dass der Eintrittsspalt des Monochromators gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Bei einer guten Justierung weist dann auch der aufgeweitete, parallele Messstrahl hinter dem Kollimator eine homogene Bestrahlungsstärke über seinen Durchmesser auf.

2.3 Der Monochromator

Der Monochromator dient zur spektralen Selektion der Strahlung der Lichtquelle. Durch Variation der Wellenlänge werden Messungen des spektralen Transmissionsgrades möglich. Der verwendete Doppel-Monochromator ist vom Typ CARL ZEISS MM 12 [2]. Die spektrale Zerlegung erfolgt durch Prismen, die Abbildung des Eintrittsspalt auf den Austrittsspalt wird durch einen Hohlspiegel realisiert. Der Monochromator besteht aus zwei einzelnen hintereinandergeschalteten Prismenmonochromatoren mit additiver Dispersion. Die Prismen im Innern des Monochromators werden von der Strahlung zweimal durchsetzt. Die Reflexion erfolgt an Planspiegeln, die gemeinsam bewegt werden, während die Prismen fest montiert sind. Der Strahlengang wird durch Umlenkspiegel so abgewinkelt, dass Eintritts- und Austrittsbündel coaxial liegen. Die Planspiegel der Littrow-Anordnung sind fest auf einem drehbaren Tisch montiert und werden über einen langen Hebelarm mittels einer Spindel eingestellt. Durch Anflanschen einer Antriebseinheit ist es möglich, die Wellenlängen motorisch in Schritten von 360 nm bis 900 nm einzustellen. Dafür sind im Steuerrechner Tabellen für Schrittweiten von 10 nm abgelegt. Die Position der Anfangswellenlänge ist durch einen Referenzschalter festgelegt. Der verwendete Monochromator MM 12 hat einen variablen Eintrittsspalt. Wenn dieser in seiner Breite variiert wird, ändert sich bei einer Lichtquelle mit Kontinuumstrahlung nicht nur die Bestrahlungsstärke, sondern auch die spektrale Intensitätsverteilung. Der Monochromator wirkt wie ein Filter mit variabler spektraler Bandbreite. Je größer die Spaltbreite ist, desto größer ist auch die spektrale Bandbreite.

2.4 Der Kollimator

Der Kollimator mit einer ungefähren Brennweite von 500 mm ist eine aus Quarzglas bestehende Linse mit einer definierten, von der Wellenlänge des Lichtes weitgehend unabhängigen Brennweite. An dieser Stelle wird das aus dem Monochromator austretende divergente Strahlenbündel kollimiert und an den Durchmesser des Strahlenganges angepasst.

2.5 Die Aperturblende

Die Aperturblende ist eine kreisförmige, einstellbare Irisblende zur Vignettierung des Messstrahlenbündels. Dabei muss sichergestellt sein, dass der Messstrahl an keiner Stelle im übrigen Strahlengang beschnitten wird.

2.6 Der Prüfling

Unterschiedliche Prüflinge können gemessen werden. Es kann der spektrale Transmissionsgrad von optischen Komponenten mit geradlinigem Strahlengang (Linsen, Graugläsern, Objektiven) und solchen mit abgelenkten Strahlengängen, wie z.B. bei Prismen-Ferngläsern, gemessen werden. Der Prüfling wird senkrecht zur optischen Achse im Strahlengang justiert. Die Eintrittspupille weist in Richtung der Aperturblende. Eine neue Entwicklung ist eine Adaption der Messanlage auch für Mikroskopobjektive.

Bei der Messung der Transmission optischer Systeme mit Prismen kann es zu einer Polarisationsabhängigkeit des Transmissionswertes kommen, wenn mit polarisiertem Licht eingestrahlt wird. Um diese Abhängigkeit zu untersuchen, kann ein zusätzlicher Polarisator nach dem Monochromator eingebaut werden. Hierauf wird aber in diesem Bericht nicht weiter eingegangen.

2.7 Die Falschlichtblende

In der Austrittspupille des Prüflings und nahe der Eintrittsöffnung der Ulbricht-Kugel, ist eine Falschlichtblende angeordnet, die verhindert, dass im Prüfling entstehendes Falschlicht in die Ulbricht-Kugel gelangt und so das Messergebnis verfälscht.

2.8 Die Ulbricht-Kugel

Die Ulbricht-Kugel, auch Photometerkugel genannt, liefert eine integrale Information der Bestrahlungsstärke über die gesamte Fläche des einfallenden Lichtbündels, d.h. die Strahlungsleistung ist unabhängig vom Strahldurchmesser. Dabei muss der Strahldurchmesser kleiner als die Eintrittsöffnung der Kugel sein. Der spektrale Reflexionsgrad der inneren Beschichtung der Ulbricht-Kugel ist hoch, aber diffus und nahezu spektral konstant über den gesamten Spektralbereich. Das Verhältnis des Durchmessers der Eintrittsöffnung zum Durchmesser der Kugel ist nach DIN ISO 14490-5 [3] gewählt. Die mechanische Halterung des Detektorelements (Fotodiode) ist so konstruiert, dass die Oberfläche des Detektors sich der inneren Fläche der Kugel ohne Übergänge angleicht. Abb. 3 zeigt Komponenten der Ulbricht-Kugel.



Abb. 3: Die Ulbricht-Kugel mit verschiedenen Einsätzen und Justierhilfen

Ein Problem bei der Transmissionsmessung (insbesondere von Mikroskopobjektiven) ist die Eintrittsöffnung der Ulbricht-Kugel, aus der Licht auf die Objektiv-Fassung fällt und von dort z.T. wieder in die Kugel reflektiert wird und somit ein unerwünschtes Zusatzsignal erzeugt. Außerdem verfälscht der fehlende Kugelausschnitt in der Eintrittsöffnung die Homogenität der Ausleuchtung der Kugel. Ein patentiertes Zusatzelement [4] löst dieses Problem weitgehend, siehe Abb. 4. Es ist so gekrümmt, dass es sich der Innenwand der Kugel mit den gleichen Reflektionseigenschaften anschließt und den inneren Radius der Kugel weiterführt. Durch ein kleines Loch im Aufsatz wird dann das (Mikroskop-) Objektiv eingekoppelt. Durch den Aufsatz befindet sich das Objektiv nicht mehr im kritischen Bereich der Kugel und erzeugt kaum noch parasitäre Reflektionen. Das transmittierte Licht kann jetzt unverfälschter gemessen werden, was die Transmissionsmessung wesentlich genauer macht.

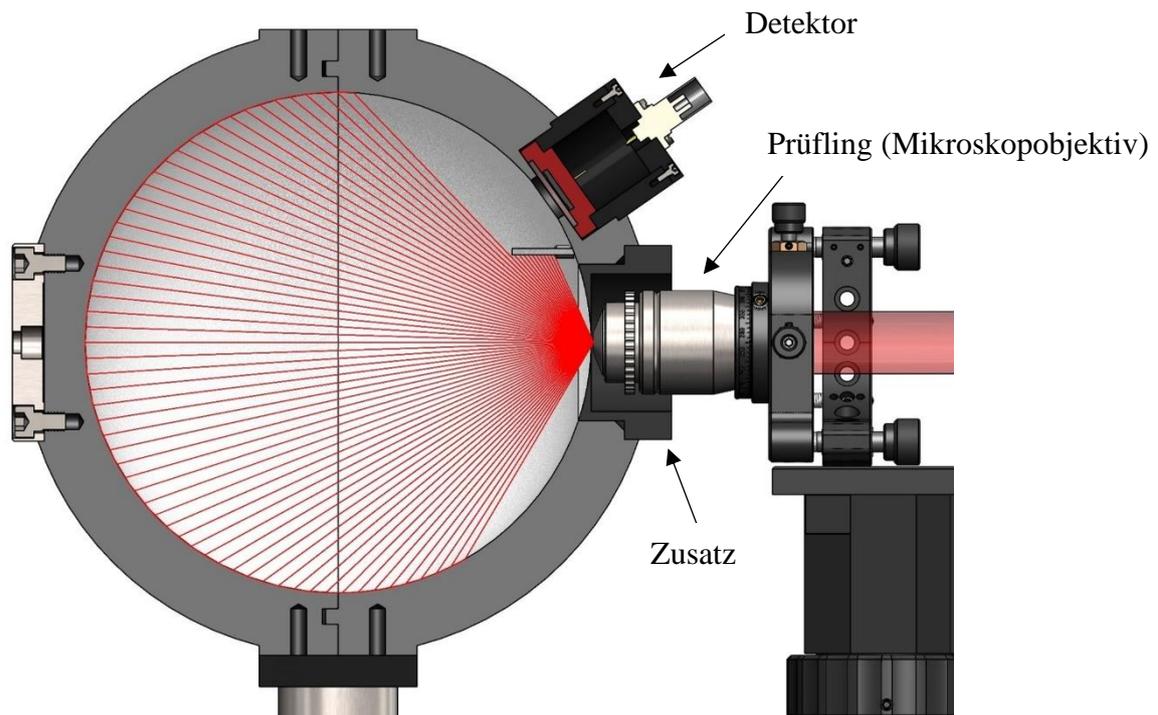


Abb. 4: Adaption für Mikroskopobjektive mit patentiertem Zusatzelement

Für die Apparatur gibt es verschiedene Einsätze, um für verschiedene Prüflinge eine optimale Eingangsbeleuchtung zu realisieren.

2.9 Die Optoelektronik

Der verwendete Empfänger ist eine Silizium-Fotodiode (Hamamatsu, Typ S1337) mit geeigneten spektralen Empfindlichkeiten und guten Linearitäten im verwendeten Dynamikbereich über den gesamten verwendeten Wellenlängenbereich. Dabei handelt es sich um einen Typ mit einem nutzbaren Spektralbereich von 380 nm - 900 nm. Ein Verstärker (Gigahertz Optik, Typ P9202) wandelt die nachzuweisende Bestrahlungsstärke direkt in eine dazu proportionale Spannung um. Ein 24 Bit Digitalvoltmeter digitalisiert das Messsignal. Eventuell vorhandene statistische Rauschanteile werden durch eine digitale Mittelung vermindert. Das Messprinzip basiert auf der Differenz zweier Einzelmessungen. Deshalb darf die analoge Signalverarbeitung in der Zwischenzeit keine Gleichspannungsdriften zeigen.

2.10 Die Motorsteuerung

Die 4-kanalige Motorsteuerung wird vom PC über die IEEE-488-Schnittstelle angesteuert. Dazu wird die USB-Schnittstelle per Adapter in IEEE-488 umgesetzt.

Die Motorsteuerung eignet sich zur Ansteuerung von bis zu 5 Gleichspannungsmotoren. Die Achsen sind unabhängig voneinander positionierbar. Die vom Hersteller vollständig

offengelegte und dokumentierte Hard- und Software ermöglicht eine Anpassung an diverse Mess- und Steueraufgaben. Erweiterungen der Hardware durch selbstentwickelte Einsteckkarten sind ebenfalls möglich, z.B. zur Steuerung eines magnetischen Verschlusses (siehe Abb. 1).

2.11 Das Messprogramm

Das Messprogramm ist auf einem konventionellen PC realisiert. Es ist ein in der Sprache "Visual C++" geschriebenes, speziell auf diesen Anwendungsfall zugeschnittenes Programm.

Zunächst werden alle mechanischen Elemente in eine definierte Ausgangsstellung gebracht. Bei den motorisch getriebenen Elementen ist dies ein Anfahren des Referenzschalters. Im PC werden alle Impulszahl-Tabellen geladen, die den Zusammenhang zwischen den Zählerständen und den eigentlichen Positionen herstellen. Dadurch sind exakte Positionierungen von Empfängerinheit und Prüfling, sowie die Einstellung der Wellenlänge am Monochromator möglich.

Die Tabelle 1 stellt einen typischen Messablauf dar:

Tabelle 1: Ablaufplan einer Messung

Eingabe der Anfangs- und Endwellenlänge
Monochromator auf Wellenlänge einstellen
Ulbricht-Kugel in den Strahlengang fahren
Verschluss öffnen
Messung 1 (ohne Prüfling)
Verschluss schließen
Prüfling in den Strahlengang fahren
Verschluss öffnen
Messung 2 (mit Prüfling)
Messergebnis = $\text{Messung 2} / \text{Messung 1} * 100\%$
Ausgabe und Speichern der Messwerte

3 Qualitätssicherung und Vergleichsmessungen

Die zu erwartende Messunsicherheit der Messeinrichtung wurde mittels GUM Workbench der Metrodata GmbH ermittelt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Messunsicherheitsbudget

T: Transmissionswert

Größe	Wert	Standard-messunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
M	90.000 %	0.200 %	Normal	1.0	0.20 %	10.3 %
dPol	0.0 %	0.100 %	Normal	1.0	0.10 %	2.6 %
dFalsch	0.0 %	0.100 %	Normal	1.0	0.10 %	2.6 %
dFleck	0.0 %	0.200 %	Normal	1.0	0.20 %	10.3 %
dBlende	0.0 %	0.200 %	Normal	1.0	0.20 %	10.3 %
dJust	0.0 %	0.500 %	Normal	1.0	0.50 %	64.1 %
T	90.000 %	0.624 %				

Ergebnisse:

Größe	Wert	Erw.-Messunsicherheit	Erweiterungsfaktor	Überdeckungswahrscheinlichkeit
T	90.0 %	1.2 %	2.00	95%

Liste der verwendeten Größen:

Größe	Einheit	Definition
T	%	Transmissionswert
M	%	Messwert der Transmission
dPol	%	Einfluss der Polarisation
dFalsch	%	Einfluss des Falsch-/Streulichts
dFleck	%	Einfluss der Fleckvariation in der Ulbrichtkugel
dBlende	%	Einfluss der Blendenunsicherheit
dJust	%	Einfluss der Justage

3.1 Untersuchungen zur Linearität des Übertragungsverhaltens

Die Linearität des Übertragungsweges beschreibt bei dieser Messanlage den linearen Zusammenhang zwischen der eingestrahelten Bestrahlungsstärke und dem digitalen Spannungswert im Rechner. Die Linearität des Fotosensors und der Signalverarbeitung wurde durch Messung von Graufiltern verschiedener Transmission überprüft. Von den drei dabei verwendeten Filtern hatten zwei Transmissionswerte von etwa 55 % und eines von 35 %. Aus den gemessenen Einzelwerten und der Kombination aus den drei Filtern wurde die spektrale Transmission der Gesamttransmission errechnet und gemessen. Das Ergebnis ist in Abb. 5 dargestellt. Es zeigten sich so Differenzen zwischen den gemessenen und gerechneten (kombinierten) Transmissionswerten von weniger als 0,05 %. Daraus lässt sich schließen, dass das Übertragungsverhalten hinreichend linear ist.

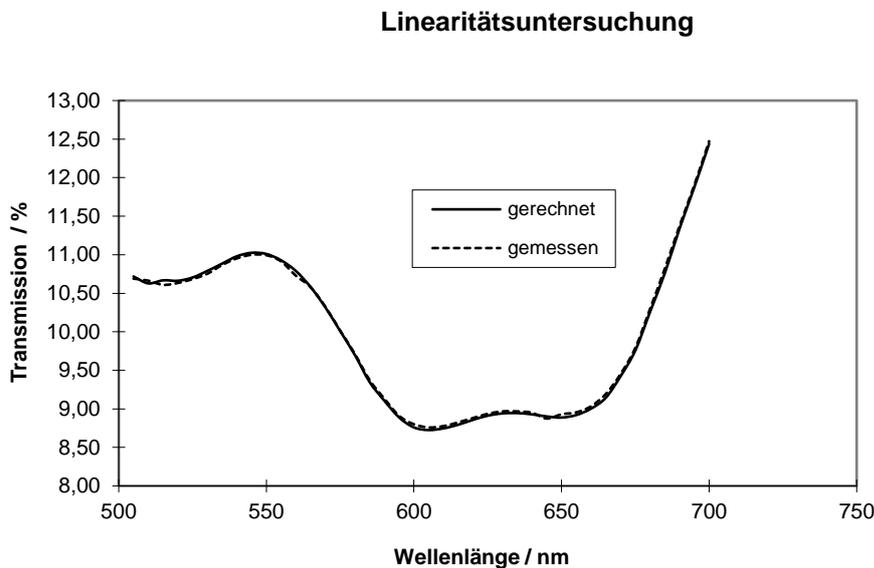


Abb. 5: Vergleich der gemessenen Gesamttransmission und aus den Einzelkurven berechneten Kombination der Filter

3.2 Die Wellenlängenskala des Monochromators

Die Skala des Monochromators wurde mit der Strahlung von Spektrallampen und Lasern bei diskreten Wellenlängen überprüft. Es werden verwendet: Cd-Linien bei 468 nm, 480 nm, 509 nm und 644 nm, Helium-Linien bei 588 nm, 668 nm und 707 nm, sowie Laserlinien bei 544 nm und 644 nm. Im Rahmen der Ablesegenauigkeit von etwa 1 nm der Wellenlängenskala des Monochromators waren keine Abweichungen feststellbar. Die Einstellung der jeweiligen Linie auf die Mitte des Austrittsspalt erfolgte mit einem Ablesefernrohr. Die Breite der Spalte wurde der jeweiligen spektralen Linienbandbreite angepasst.

3.3 Vergleichsmessung an einem Filter

Zum Vergleich mit anderen Messverfahren [5] wurde ein Graufilter gemessen. Der Vergleich der Messungen ist in Abb. 6 dargestellt und zeigt Unterschiede in Bereich bis 780 nm von unter 0,6%. Die erweiterte Unsicherheit der in diesem Bericht beschriebenen Apparatur ist 1,2% (wobei die Justageeinflüsse am größten sind), die der anderen Instrumente liegen bei unter einem Prozent. Damit stimmen die Messergebnisse im Rahmen der Unsicherheiten überein.

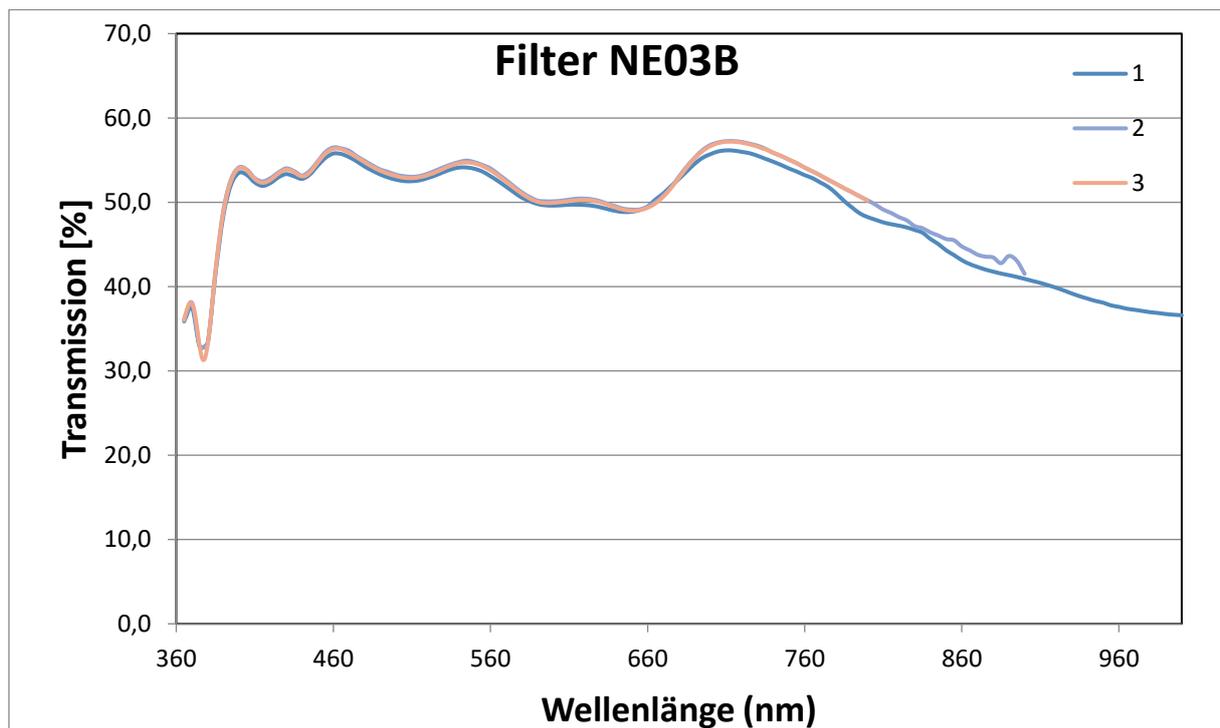


Abb. 6: Vergleich verschiedener Messungen dreier Arbeitsgruppen.

- 1: AG "Form- und Wellenfrontmetrologie"
- 2: AG "Digitale Mikroskopie" (heute: Optische Nanometrologie)
- 3: AG "Reflexion und Transmission"

4 Danksagung

Die Autoren danken den Kolleginnen und Kollegen der anderen Arbeitsgruppen für die Bereitschaft eines internen Messvergleichs.

5 Quellenverzeichnis

- [1] Bedienungsanleitung des 5 Achsen DC-Motorcontroller OWIS 600 A
- [2] Bedienungsanleitung des Doppel-Monochromator CARL ZEISS MM 12
- [3] DIN ISO 14490-5:2018-05, Optik und Photonik - Prüfverfahren für Fernrohre - Teil 5: Prüfverfahren zur Bestimmung des Transmissionsgrads
- [4] Patent 10 2018 103 886, „Ulbricht-Kugelanordnung und Verfahren zum Messen einer Transmission einer Optik“, veröffentlicht am 13.1.2022
- [5] Cary 6000i, siehe <https://www.agilent.com/en/product/molecular-spectroscopy/uv-vis-uv-vis-nir-spectroscopy/uv-vis-uv-vis-nir-systems/cary-6000i-uv-vis-nir> (abgerufen am 15.8.2023)



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz**

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de