

Benutzungsgerechte Untersuchung der Wirkung von Gleitsichtgläsern

Friedrich Fleischmann¹, David Hilbig¹

¹Hochschule Bremen, Neustadtswall 30, 28199 Bremen, Deutschland

+49 421 5905 3453, (friedrich.fleischmann), (david.hilbig)@hs-bremen.de

Zusammenfassung

Moderne Gleitsichtgläser bestehen aus komplexen Freiformflächen. Sie werden zunehmend für die individuellen Bedürfnisse der Benutzer optimiert, was die Komplexität ihrer Charakterisierung erhöht. Gerade die für Brillentragende relevanten und preislich sensitiven Charakteristika wie Breite und Form des sogenannten Progressionskanals werden von aktuellen Normen nicht überprüft. Ein weiterer Anspruch an moderne Gläser ist zudem die korrekte Auslegung des Glases an die Gebrauchssituation, und damit die Blickrichtung während des Gebrauchs, durch die verschiedenen Bereiche des Glases unter anderen Strahlwinkeln wirksam werden. Die Individualisierung der Fertigung bedingt jedoch auch Messverfahren, die in der Lage sind, die Wirkung der Sehhilfe auf das Individuum in Gebrauchssituationen zu bestimmen. Der Beitrag gibt einen Überblick über Realisierungen des „Experimentellen Raytracing (ERT)“, mit denen eine Reihe funktionsrelevanter Messgrößen in Gebrauchssituationen bestimmt werden können und stellt eine Realisierung einer Anordnung dafür vor. Erste Ergebnisse am Beispiel einer Festbrennweiten-Brille werden vorgestellt.

Keywords: Optisches Messverfahren, experimental raytracing, Freiformen, Brillenmessung

Einführung

Mit zunehmenden Alter verliert das Auge seine Akkomodationsfähigkeit, wodurch für scharfes Sehen im Nah-, Mittel- und Fernbereich Sehhilfen mit unterschiedlicher Brechkraft notwendig werden. Gleitsichtbrillen („Progressive Addition Lenses“, PAL) bieten den Vorteil kontinuierlicher Übergänge zwischen diesen Sehbereichen. Dies wird durch eine allmähliche Zunahme der optischen Stärke entlang der Meridianachse erreicht. Allerdings lässt sich dieser Gradient nicht ohne Astigmatismus oder Zylinder in den Bereichen neben der Hauptmeridianachse erzielen. In diesen Übergangsbereichen kommt es zu Verzerrungen, die das scharfe Sichtfeld entlang der horizontalen Achse stark einschränken, insbesondere beim Sehen im Zwischen- und Nahbereich.

Moderne Gleitsichtgläser bestehen aus komplexen Freiformflächen. Fortschritte der Fertigungstechnik ermöglichen inzwischen eine bezahlbare Herstellung solcher optisch wirksamen Freiformen, weshalb die Gläser zunehmend für die individuellen Bedürfnisse der Benutzer optimiert werden. Zur Qualitätsbeurteilung beim Hersteller der Gläser werden Verfahren zur Topografiemessung wie Profilometrie oder Interferometrie eingesetzt, die optische Funktion kann mit Moiré-Deflektometrie [1] oder Shack-Hartmann-Sensoren [2, 3] un-

tersucht werden. Die Vermessung der gefertigten Brillengläser erfolgt zumeist durch Focimeter und beschränkt sich auf die Bestimmung der Brechkraft in einigen ausgewählten Messpunkten [4].

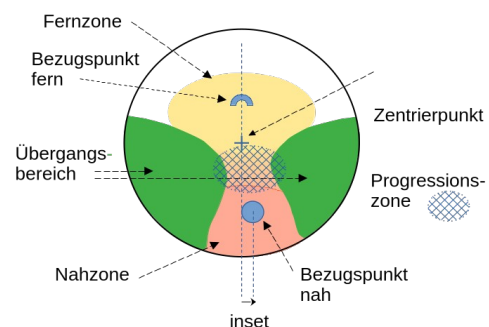


Abb. 1: Veranschaulichung eines Gleitsichtglases und relevanter Bereiche.

Gleitsichtbrillen sollen scharfes Sehen gerade in einer Vielzahl von unterschiedlichen Gebrauchsfällen ermöglichen, beispielsweise im Wechsel von Fernsicht zu Nahsicht während des Autofahrens oder bei der Büroarbeit. Herausfordernd ist dabei die Breite des Bereichs, in dem eine scharfe Sicht möglich ist, was direkt auf den Komfort im Gebrauch wirkt. In Abb. 1 sind charakteristische Bereiche eines (linken) Gleitsichtglases dargestellt. In den

Bezugspunkten nah bzw. fern wird üblicher Weise die Brechkraft überprüft. Das Inset gibt den Versatz zwischen Fern- und Nahsicht an, um die Konvergenz auszugleichen. In den Übergangsbereichen ist keine scharfe Wahrnehmung möglich.

Wie Minkwitz herausgearbeitet hat, bedingen sich die Addition längs einer Scheitellinie und die Zunahme des Astigmatismus senkrecht zu dieser gegenseitig [5], was im praktischen Fall dazu führt, dass bei stärkeren Brechkraftunterschieden zwischen den zu realisierenden Sehbereichen das brauchbare Sichtfeld seitlich stärker eingeengt wird. Dies drückt sich in der Breite der Progressionszone aus. Durch geschickte Verteilung der unvermeidlichen Aberrationszonen kann die individuelle Wirkung auf den Anwender und die Gestaltung des Übergangsbereichs optimiert werden.

Eine Beurteilung vieler qualitätsbestimmender Eigenschaften ist gerade bei individualisierten Gläsern mit den genannten Verfahren nicht möglich. Zudem ermöglichen moderne additive Fertigungsverfahren nicht nur die Herstellung individueller Gläser, sondern eröffnen auch die Möglichkeit einer lokalen Variation des Brechungsindex und damit auch eine neue Form, die bisherige prinzipielle Einschränkungen zu überwinden. Die Individualisierung der Fertigung bedingt jedoch auch Messverfahren, die in der Lage sind, die Wirkung der gefertigten Sehhilfe auf das Individuum in Gebrauchssituationen zu bestimmen. [6,7] In diesem Beitrag werden verschiedene Anwendungen des „Experimentellen Raytracing (ERT)“ zur Bestimmung relevanter Parameter mit hoher lokaler Auflösung und unter Simulation des Gebrauchs durch den Nutzer vorgestellt.

Methode

Das Verfahren des ERT ist in der optischen Messtechnik lange bekannt [8-10]. Beim ERT wird das zu prüfende Gerät (DUT) mit einem schmalen Lichtstrahl abgerastert, der in Abb.2

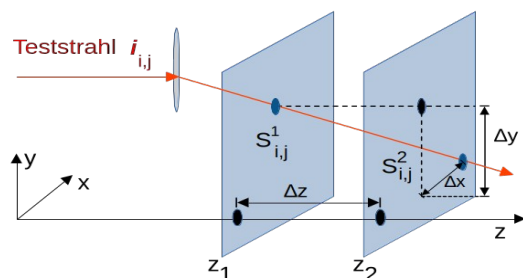


Abb. 2: Prinzip des ERT. Für jeden Messpunkt $i_{i,j}(x_{i,j}, y_{i,j})$ wird der Strahlschwerpunkt $S_{i,j}$ in 2 Ebenen gemessen.

als Teststrahl i bezeichnet wird. Die Richtung des gebrochenen Strahls wird anhand seines Schnittpunkts mit zwei parallelen Bildebenen ermittelt, wodurch ein Strahlgradient bestimmt werden kann. In beiden Ebenen z_1 und z_2 im Abstand Δz werden die Schwerpunktpositionen $S^1_{i,j}$ und $S^2_{i,j}$ aus den von einem CMOS-Sensor erfassten Intensitätsverteilungen berechnet. Der Gradient wird durch die Steigungen T_x und T_y des Strahls in x- und y-Richtung bestimmt und mit Gl. (1) berechnet, wobei die Position des Strahlschwerpunkts $S_{i,j}$ für jede Teststrahlposition $i_{i,j}$ als $z_1(x_1, y_1)$ bzw. als $z_2(x_2, y_2)$ benannt wird.

$$T_x = \frac{x_1 - x_2}{z_1 - z_2} = \frac{\Delta x}{\Delta z}; T_y = \frac{y_1 - y_2}{z_1 - z_2} = \frac{\Delta y}{\Delta z} \quad (1)$$

Über den Zusammenhang der partiellen Ableitungen der Wellenfront mit den gemessenen Strahlgradienten kann mit Gl. (2) durch modale Integration die Wellenfront rekonstruiert werden [10-13] und hieraus Parameter wie Brechkraft, Punktverbreiterungsfunktion (PSF), oder Modulationstransferfunktion (MTF) berechnet werden.

$$\nabla W = \begin{pmatrix} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Die PSF stellt die Punktantwort des optischen Systems, hier des Gleitsichtglases, dar.

Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) ist ein bekanntes Qualitätsmaß und beschreibt das Auflösungsvermögen im Frequenzbereich. Indem der Kontrastverlust vom Objekt zum Bild über der Raumfrequenz aufgetragen wird. Mathematisch ergibt sie sich aus dem Betrag der optischen Transferfunktion (OTF), der Fouriertransformierten der PSF.

Gerade bei Gleitsichtbrillen ist eine orts aufgelöste Bestimmung der Qualitätsparameter erforderlich, da die optische Wirkung ja gezielt über das Glas variieren soll.

Wie Abb. 3 illustriert, wird in realen Anwendungsfällen nur ein kleiner Teil des Glases benutzt. Nur ein enger Bereich des Lichtes dringt nach Durchgang durch das Glas in die Pupille, wobei die Größe des Bereichs von der Brechkraft des Glases, dem Hornhautscheitelabstand und dem aktuellen, lichtabhängigen, Pupillendurchmesser abhängt. Die Wirkung des Glases in diesem Bereich, der sog. projizierten Pupille, bestimmt die Wahrnehmung des Tragenden. Erfolgt die ERT-Messung be-

schränkt auf diesen Bereich, ergibt sich die Charakterisierung des gewählten Parameters im Gebrauchsbereich, und bei Auswertung einer Vielzahl dieser Bereiche die orts aufgelöste Charakterisierung des gesamten Glases.

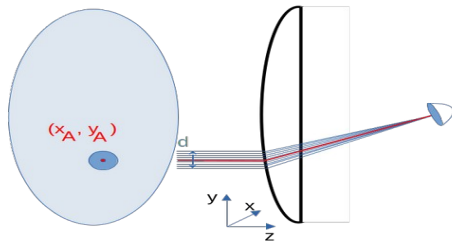


Abb. 3: Ortsaufgelöste Messung in einer Subapertur. Um jeden Messpunkt (x_A, y_A) , wird im Bereich der projizierten Pupille mit Durchmesser d die Wellenfront rekonstruiert.

Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 4 für den Fall der Messung an 5 Positionen entlang der Meridionalebene einer um die typische 18° -Verkipfung des Brillenglases in der Fassung dargestellt. Die rot markierten Punkte symbolisieren die Messbereiche der untersuchten projizierten Pupillen.

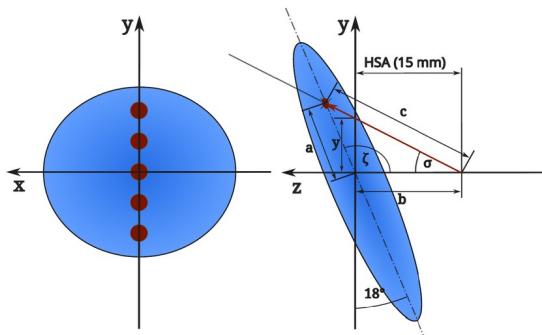


Abb. 4: Verkipfung des Glases zur Simulation der Gebrauchslage. Die Messung erfolgt hier an 5 Messpositionen der projizierten Pupille (rot markiert).

Aufbau

Zur Realisierung des Verfahrens wurde eine Kombination von 2 Translations- und Rotationsachsen zur Halterung des DUT und dessen Ausrichtung im Raum verwendet.

Als Teststrahlquelle diente eine Laserdiode Roithner SPL520-1-3-PD, betrieben unterhalb der Laserschwelle bei 27 mA, als Kamera eine boardlevel Photonfocus BL1-D2080-160-G2, mit Pixelgröße $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$.

Die prinzipielle Anordnung ist in Abb. 5 skizziert.

Anstelle der zur Realisierung des ERT erforderlichen z-Achse zum Anfahren der Messpositionen des Teststrahls wurde ein neuartiger integrierter Gradientensensor eingesetzt. In einem auf den Bildaufnehmer aufgesetztem Etalon erzeugt der eintreffende Teststrahl eine Reihe von Mehrfachreflektionen, aus deren Intensitätsverteilung dann der Eintrittswinkel berechnet wird. Um eine sichere Bestimmung der Strahlwinkel zu gewährleisten, wurde der Sensor um 5° aus der Normalen verkippt [15].

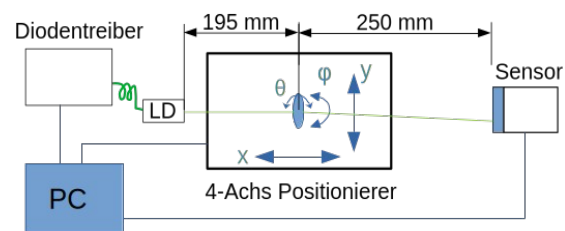


Abb. 5: Schematische Darstellung des Messsystems.

Die sich daraus ergebende Realisierung des 4-Achs-Positionierers und des Messsystems ist in Abb. 6 dargestellt.

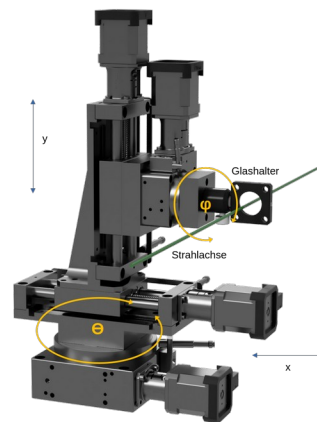


Abb. 6: Darstellung der Bewegungseinrichtung zur Halterung und Verkipfung eines Brillenglases zur Simulation der Gebrauchslage.

Verfahren

Das Brillenglas wird in den Glashalter der Bewegungseinrichtung montiert und senkrecht zum Strahlengang des Teststrahls ausgerichtet. Die PC-Ansteuerung des Positionierers richtet das Glas entsprechend der Neigung der Blickrichtung in der Vertikalen um Winkel ϕ und zur Horizontalen um θ aus, die sich durch die Drehungen ergebenden Verschiebungen des Durchtrittspunktes des Teststrahls werden durch Verfahren der Translationsachsen kompensiert. Um den Durchtrittspunkt herum wird ohne weitere Korrekturen der Bereich der

projizierten Pupille abgescannt. Aus der in dem Bereich bestimmten Wellefront wird dann die lokale Brechkraft berechnet.

Ergebnisse

Erste Ergebnisse zeigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Anordnung. Abb. 5 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer Messung eines Festbrennweitenglasses bei Verkippung entlang der Drehachse ϕ . Die aus den gemessenen Verteilungen ermittelten Brechwerte enthalten neben der Brechkraft noch weitere Anteile wie Astigmatismus. Wiederholungsmessungen zeigen eine gute Wiederholbarkeit der Ergebnisse an den einzelnen Positionen.

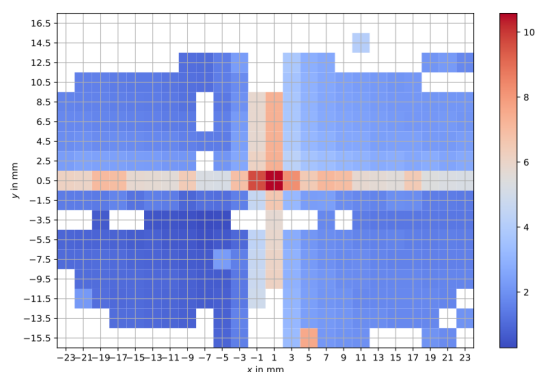


Abb. 7: Aus der Messung bestimmte Brechkraft des kompletten Brillenglasses bei 18° geneigtem Glas. Darstellung inklusive höherer Terme.

Diskussion

Die bislang gewonnenen Ergebnisse decken sich nicht mit den Erwartungen. Wie in Abb. 7 ersichtlich, wird gerade im mittleren Bereich eine sehr hohe Brechkraft, die rapide abnimmt, ermittelt, was beim Messobjekt mit fest 1,5 Dpt nicht plausibel ist und auf eine fehlerhafte Berechnung der Brechwerte aus den Strahlgradienten zurückzuführen sein dürfte. Hierfür kommen primär zwei Fehlerquellen in Frage. Eine erste Analyse zeigt eine unerwartet hohe Fehlerrate der automatisierten Schwerpunktsbestimmung der Mehrfachreflektionen im Gradientensensor, wodurch die Einfallswinkel sprunghaft falsch ermittelt werden. Dies erklärt jedoch nicht die systematisch falschen Werte im Bereich der Meridonal- und Sagittalebene. Ein Vergleich mit ZEMAX-simulierten Messungen deutet auf eine fehlerhafte Bestimmung der Wellenfronten in den projizierten Pupillen hin.

Literaturnachweis

- [1] E. De Lestrangé-Angineur, C. Kee, „Optical performance of progressive addition lenses (PALs) with astigmatic prescription. Sci Rep 2021 (11), 2984 (2021); doi: 10.1038/s41598-021-82697-0
- [2] E. Villegas, P. Artal, „Visual acuity and optical parameters in progressive-power lenses“ Optom. Vis. Sci. 83, 672–681 (2006); doi: 10.1097/01.opx.0000232818.37832.ee
- [3] D. R. Neal, R. Copland J., D. A. Neal, D. Topa, P. Riera, „Measurement of lens focal length using multicurvature analysis of Shack–Hartmann wavefront data, Proc SPIE, 5523 (2004), 243; doi: 10.1117/12.561772
- [4] E.A. Barbosa, D.M. Silva, C.E. Nascimento, F.L. Galvão, J.C.R. Mittani, „Progressive power lens measurement by low coherence speckle interferometry,“ Optics and Lasers in Engineering, Volume 51, Issue 7, 898-906 (2013); doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.02.007
- [5] G. Minkwitz, „Über den Flächenastigmatismus Bei Gewissen Symmetrischen Asphären,“ Optica Acta: International Journal of Optics, 10(3), 223–227 (1963); doi: 10.1080/713817794
- [6] E. Pascual, JA Gómez-Pedrero, J. Alonso „Theoretical performance of progressive addition lenses with poorly measured individual parameters.“ Ophthalmic Physiol Opt.2023 Mar;43(2) 244-253 (2023); doi: 10.1111/opo.13088
- [7] E. Villegas, P. Artal, „Spatially resolved wavefront aberrations of ophthalmic progressive-power lenses in normal viewing conditions,“ Optom. Vis. Sci 2003; 80:106–114 (2003); doi: 10.1002/j.1538-9235.2003.tb01601.x
- [8] G. Häusler, G. Schneider, „Testing optics by experimental raytracing with a lateral effect photodiode,“ Appl. Opt 1988;27:5160–5164 (1988); doi: 10.1364/AO.27.005160
- [9] G. Gutierrez, D. Hilbig, F. Fleischmann, T. Henning, „Locally resolved characterization of progressive addition lenses by calculation of the modulation transfer function using experimental ray tracing.“ Proc. of SPIE 2017; Photonic Instrumentation Engineering IV, 101100E; doi: 10.1117/12.2251992
- [10] F. Fleischmann, D. Hilbig, "Use of experimental ray tracing for locally resolved characterization of progressive addition and contact lenses" Current Directions in Biomedical Engineering, vol. 11, no. 1, 2025, pp. 17-19 (2025); doi: 10.1515/cdbme-2025-0105
- [11] B. Nijboer, "The diffraction theory of optical aberrations: Part II: Diffraction pattern in the presence of small aberrations," Physica 13(10), 605–620 (1947); doi: 10.1016/0031-8914(47)90052-9
- [12] E. Wolf, "On a New Aberration Function of Optical Instruments," J. Opt. Soc. Am. 42(8), 547–552 (1952); doi: 10.1364/JOSA.42.000547
- [13] J. Rayces, "Exact relation between wave aberration and ray aberration," Optica Acta:

- International Journal of Optics 11, 85–88
(1964); doi: 10.1080/713817854
- [14] U. Ceyhan et al., "Inspection of aspherical lenses by wavefront analysis," Proc. SPIE 7389, 73893L–73893L–11 (2009);
doi: 10.1117/12.834224
- [15] N. Mueller, R. Luening and F. Fleischmann,
"Optical Beam Gradient Sensor," *Sensors and Measuring Systems; 21th ITG/GMA-Symposium*, Nuremberg, Germany, 1-7 (2022);
<https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9861877>