

Korrektur der Abbildungsfehler des Auges in Echtzeit mit einem adaptiven, magnetisch gesteuerten Spiegel

H. Babovsky, M. Krauel, A. Matusevich, A. Kießling, R. Kowarschik
Institut für Angewandte Optik der Friedrich-Schiller-Universität Jena
mailto:holger.babovsky@uni-jena.de

Die Vermessung von Aberrationen höherer Ordnung am Auge ist bereits seit längerem mit einem Hartmann-Shack-Sensor möglich. Um aber auch die subjektiven Eindrücke des Patienten mit einzubeziehen, muss die Wellenfront in einem adaptiven Phoropter korrigiert werden. Dieser Artikel beschreibt die notwendigen Bestandteile, sowie erste Ergebnisse beim Aufbau eines solchen Phoropters.

1 Einleitung

Ein Phoropter erlaubt dem Augenarzt, mit Vorsatzlinsen abgestufter Dioptrienzahl die Aberrationen des Auges zu bestimmen. Traditionell werden dabei nur Korrekturen von Myopie, Hyperopie und Astigmatismus mit sphärischen und torischen Brillengläsern oder Kontaktlinsen durchgeführt. Moderne Geräte können zwar auch die Aberrationen höherer Ordnung (HOA) erfassen, diese werden aber bisher in der klassischen Augenoptik vernachlässigt, obwohl die Korrektur auch dieser Abbildungsfehler die Sehleistung des Auges besonders nachts beträchtlich verbessern könnte. Ziel unserer Arbeit ist es, einen adaptiven Echtzeitphoropter zu entwickeln, der sowohl die Augenfehler vermessen - sie werden in Form von Zernike-Polynomen (s. z. B. [1]) angegeben - als auch mit Hilfe eines adaptiven Spiegels korrigieren kann, so dass der Patient die gewünschte Wirkung sofort selbst überprüfen kann.

2 Grundlagen

2.1 Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor

Zur Bestimmung der Wellenfront (WF) wird ein Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor (SH-WFS) verwendet. Dabei wird die Wellenfront mit Hilfe eines Mikrolinsengitters zerlegt. Die so entstandenen Teilwellen werden auf eine CCD-Matrix fokussiert, wo dann die Abweichung der Positionen der Brennpunkte zu denen einer ebenen Welle gemessen werden. Dies ergibt dann zusammengesetzt die erste Ableitung der WF, welche daraus anschliessend bis auf eine Konstante wieder rekonstruiert wird. Weitere Angaben zum SH-WFS finden sich in [3] und [5]. In unseren Experimenten wird der SH-WFS HASO32 der Firma imagine optic verwendet.

2.2 Adaptiver Spiegel MIRA052

Als adaptiven Spiegel zur WF-Korrektur wird der MIRA052 von imagine eyes von uns genutzt. Er besitzt 52 magnetische Stellelemente welche eine Deformation der Membran von bis zu $\pm 50 \mu\text{m}$ verursa-

chen können. Sie sind gitterförmig angeordnet und werden mit Spannungen von bis zu $\pm 1 \text{ V}$ betrieben. Die Auflösung beträgt 12 bit. Der Spiegel besitzt eine sehr hohe Linearität in Abhängigkeit von der angelegten Spannung $d(U)$ bei einer geringen Hysterese [4]. Die sichtbare Spiegelfläche beträgt 15 mm und besteht aus einer silberbeschichteten Membran. Mit ihm sind Korrekturen der Zernike-Koeffizienten bis zur 6. Ordnung bei einer Ansteuerfrequenz von maximal 300 Hz möglich.

3 Aufbau

Der prinzipielle Aufbau eines solchen Phoropters wurde bereits in verschiedenen Quellen (wie z. B. in [2]) diskutiert und wird aus diesem Grund nur kurz angesprochen.

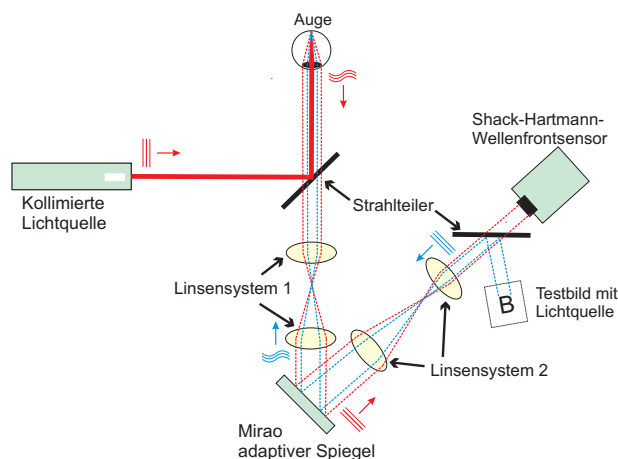


Abbildung 1 Optischer Zweig des adaptiven Echtzeitphoropters

Der optische Arm des Phoropters ist in Abb. 1 dargestellt. Als Lichtquelle wird zur Zeit ein HeNe-LASER verwendet, welcher zu einem späteren Zeitpunkt durch eine IR-LASER-Diode ersetzt werden wird, da der gut sichtbare HeNe-LASER zu einer Verkleinerung der Pupille des Auges führt, die Aberrationen höherer Ordnung aber vor allem bei weit geöffneter

Pupille auftreten. Das ebene Bündel wird über einen Strahlteiler auf das Auge gelenkt und von der Augenlinse auf die Netzhaut fokussiert. Das dort gestreute Licht kann als neue Lichtquelle betrachtet werden, so dass effektiv nur ein Linsendurchgang vorhanden ist. Das gestreute Licht tritt aus der Pupille aus und wird durch das Linsensystem 1 auf den, in einer zur Pupille konjugierten Ebene stehenden, Spiegel abgebildet. Dahinter sorgt Linsensystem 2 für eine Abbildung auf den SH-WFS, welcher sich ebenfalls in einer konjugierten Ebene zur Pupille befindet. Die Daten werden vom SH-WFS auf einen PC übertragen, ausgewertet und dann als Spannungswerte an den Spiegel übertragen. Dieser Vorgang wird als closed-loop so lange fortgesetzt bis am SH-WFS eine ebene Welle eintrifft oder der Vorgang vom Nutzer unterbrochen wird.

4 Ergebnisse

Erste Messungen wurden mit einem Kunstauge gemacht, dessen WF als 3D-Darstellung in Abb. 2 zu sehen ist.

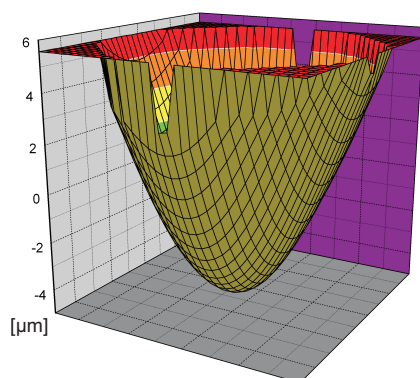


Abbildung 2 3D-Darstellung der Wellenfront eines Kunstauges vor dem closed-loop

Nach dem Durchlaufen des closed-loop-Prozesses hat die am SH-WFS ankommende Welle deutlich geringere Aberrationen (Abb. 3). In dem gesamten Messprozess wurden Verkipnungen ignoriert, da eine Verkippfung nur ein schräger Einfall der WF darstellt. Der peak-to-valley-Wert der WF wurde von ca. 9 µm auf etwa 0,6 µm reduziert. Eine weitere Verbesserung wäre bei einer längeren Laufzeit des closed-loops möglich gewesen.

Abb. 4 zeigt die ersten 36 Zernike-Koeffizienten vor und nach dem closed-loop. Die Verkipnungen und die Sphäre wurden hierbei nicht dargestellt, da der Wert für die Sphäre vor dem closed-loop etwa 4,5 µm betrug. Die Werte der Koeffizienten wurden alle auf Werte von 0,1 µm oder weniger korrigiert. Allerdings kann wie bei Nr. 23 auch eine Erhöhung einzelner Koeffizienten erfolgen.

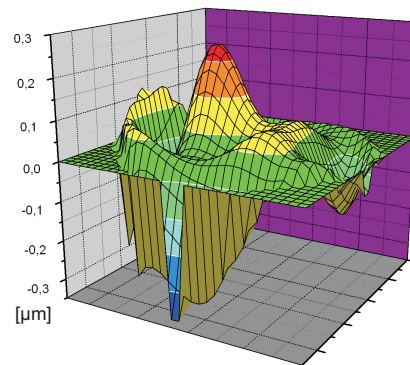


Abbildung 3 3D-Darstellung der Wellenfront eines Kunstauges nach dem closed-loop

Zusammenfassend wurde von uns ein stabil laufender closed-loop aufgebaut, welcher der Korrektur der WF des Auges dient und einen Durchlauf mit 2-3 Hz durchführt. Dabei wurden alle Aberrationen (auch die Sphäre) auf Werte $\leq 0,1$ µm korrigiert.

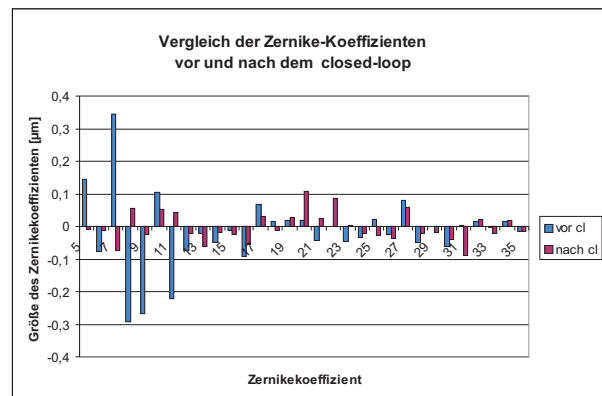


Abbildung 4 Vergleich der Zernike-Koeffizienten vor und nach dem closed-loop ohne Sphäre

Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01EZ0608 gefördert.

Literatur

- [1] Born, Wolf, "Principles of optics," Cambridge University Press
- [2] Porter et al., "Adaptive Optics for Vision Science. Principles, Practices, Design and Applications," Wiley 2006.
- [3] Liang, "A new method to precisely measure the wave aberrations of the human eye with a Hartmann-Shack-wavefront-sensor," Dissertation RKU-Heidelberg (1991).
- [4] Fernandez et al., "Adaptive optics with a magnetic deformable mirror: applications in the human eye," in *Optics Express*, **14**(20), 8900–8917 (2006).
- [5] Prieto et al., "Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye," in *J. Opt. Soc. Am. A*, **17**(8), 1388–1398 (2000).