

■ Perfekt vermessen

Die Wellenfrontanalyse hat im vergangenen Jahrzehnt die Diagnose- und Therapiemöglichkeiten in der Augenheilkunde erweitert. Pate für die Technologie stand die Astronomie.

Immer mehr Menschen möchten Brille oder Kontaktlinsen Adieu sagen. Die LASIK (Laser-in-situ-Keratomileusis) ermöglicht es, eine Fehlsichtigkeit zu korrigieren. Doch ihr geht ein entscheidender Schritt voraus: Zunächst muss der Arzt nämlich wissen, an welchen Stellen der Hornhaut er wie viel Material abtragen soll. Um dieses „Schnittmuster“ zu ermitteln, bedient er sich der Wellenfrontanalyse, die ihren Ursprung in der Astronomie hat.

Turbulenzen in der Atmosphäre beeinträchtigen das Licht der Sterne und erfordern daher zusätzlichen Aufwand bei der Messung mit erdgebundenen Teleskopen. Diese Änderungen des Brechungsindex auf kurzen Zeitskalen führen dazu, dass die Abbildung eines Sterns im Fokus nicht beugungsbegrenzt ist, sondern mehr oder minder verschwommen. In den 90er-Jahren entwickelten Astronomen und Ingenieure daher ein Verfahren, das die Einflüsse der Atmosphäre quasi in Echtzeit misst und die Teleskopspiegel über einen Regelkreis entsprechend deformiert, um eine beugungsbegrenzte Abbildung zu erhalten. Dazu erzeugen die Astronomen mithilfe eines Laserstrahls einen „künstlichen Leitstern“ am Himmel in unmittelbarer Nach-



Delphimages/Fotolia.com

Daten aus der Wellenfrontanalyse fließen in die Planung von Augenkorrekturen per Laser, in die Kontrolle von

Augenimplantaten und in die individuelle Anpassung von Brillengläsern ein.

barschaft des Beobachtungsobjekts (Abb. 1). Je nach Wellenlänge wird das Laserlicht durch Rayleigh-Streuung an Molekülen und Aerosolen in den unteren 10 bis 20 km der Atmosphäre oder an Natriumatomen in 90 km Höhe zurückgestreut. Das Licht des künstlichen Sterns fällt auf einen Sensor, der die durch die Atmosphäre deformierte Wellenfront misst. Damit liefert er die Information, wie stark die Teleskopspiegel verformt werden müssen, um den Effekt zu kompensieren. Dank dieser adaptiven Optik können erdgebundene Fernrohre bei der Abbildungsqualität inzwischen mit Satellitenteleskopen konkurrieren.

Das Prinzip der Wellenfrontsensoren geht auf die beiden Astrophysiker Johannes Hartmann und Roland Shack zurück, weswegen man auch von Hartmann-Shack-Sensoren spricht. Sie bestehen aus einem Mikrolinsen-Array, in dessen Fokus sich ein Bildsensor befindet. Die Durchmesser der Linsen liegen in der Größenordnung von einigen hundert Mikrometern. Jede Mikrolinse erzeugt in der Brennebene ein Bild, das entsprechend der lokalen Neigung der einfallenden Wellenfront mehr oder minder stark gegenüber der Position ver-

schieben ist, die bei einer ebenen, senkrecht einfallenden Wellenfront zu erwarten wäre. Aus den linearen Verschiebungen, die der Bildsensor misst, lässt sich die tatsächliche Form der einfallenden Wellenfront ableiten. Die Größe der Mikrolinsen und ihre Brennweite sowie der Auswertalgorithmus müssen an die jeweilige Anwendung angepasst sein. Ist die einfallende Wellenfront nämlich zu stark deformiert, kommt es sonst zu einem Überschreiten des Bildsensors, weil die Abbildung der einen Mikrolinse in den Sensorbereich der benachbarten Mikrolinse fällt.

Bekanntlich ist das Auge kein perfektes optisches System. Wer sich einer LASIK-Behandlung unterziehen möchte, ist mit Sicherheit kurz- oder weitsichtig und hat oft einen Astigmatismus („Stäbchensehen“), weil die Hornhaut unterschiedliche Krümmungsradien aufweist. Diese Beeinträchtigungen ermitteln Augenarzt oder Augenoptiker gewöhnlich mit dem „Phoropter“ oder mit einer Messbrille: Sie variieren die Glasstärke so lange, bis der Patient das beste Sehergebnis hat. Die Korrektur von Astigmatismus, Kurz- und Weitsichtigkeit betrifft Abbildungsfehler niedriger Ordnung. Aber es treten



Abb. 1 Am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile erzeugt ein Laserstrahl einen künstlichen Stern am Himmel. Mit dessen Hilfe lassen sich Abbildungsfehler, die durch die Atmosphäre hervorgerufen werden, korrigieren.

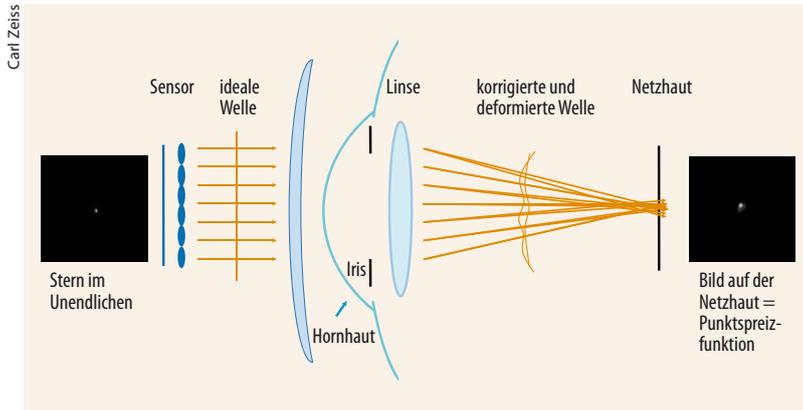


Abb. 2 Bei der Wellenfrontvermessung des Auges erzeugt ein Laserstrahl eine Referenzabbildung. Wenn die von der Netzhaut reflektierte Wellenfront wieder den Sensor erreicht, ist sie aufgrund der optischen Aberrationen in Linse und

Hornhaut verzerrt. Über die Mikrolinsen des Sensor-Arrays lassen sich die lokalen Abstrahlwinkel dieser verzerrten Wellenfront mit einem lichtempfindlichen Chip erfassen, der sich im Fokus hinter den Mikrolinsen befindet.

auch Abbildungsfehler höherer Ordnung auf. Zu ihnen gehören zum Beispiel Koma – ein Asymmetriefehler, der sich durch erhöhte Blendempfindlichkeit bemerkbar macht – und sphärische Aberration. Bei letzterer führt die vom Pupillendurchmesser abhängige Fokusslage der Lichtstrahlen zu verringertem Kontrastsehen.

Mit der Wellenfrontanalyse lassen sich solche Abbildungsfehler höherer Ordnung ermitteln. Wie in der Astronomie erzeugt ein Laserstrahl einen künstlichen Stern. Der Laserstrahl hat in diesem Fall eine Strahlentaille von weniger als einem Millimeter und eine Wellenlänge im tiefen Rot- oder Infrarotbereich. Er fällt entlang der Hauptachse des Auges auf die Netzhaut und erzeugt dort einen Fleck mit einem Durchmesser von einigen zehn Mikrometern. Eventuelle Streulichtanteile der Netzhaut sind für die

Messung vernachlässigbar, da jedes Streuzentrum wieder eine neue Wellenfront erzeugt, die sich von der reflektierten Wellenfront gut unterscheiden lässt. Die reflektierte Wellenfront fällt nach dem erneuten Durchgang durch Augenlinse und Hornhaut für die Messung der Aberrationen auf den Hartmann-Shack-Sensor (**Abb. 2**).

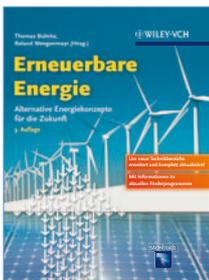
Die Auswertung einer Wellenfrontaberration erfolgt meistens mit Zernike-Polynomen, die in der technischen Optik breite Anwendung finden. Diese Polynome repräsentieren Wellenfronten, die jeweils spezifische Abbildungsfehler des Auges beschreiben. Ihre Überlagerung ergibt eine eindeutige Darstellung der Wellenfrontaberration. Um Abbildungsfehler höherer Ordnung zu beschreiben, dienen Zernike-Polynome höherer Ordnung. Aus empirischen Untersuchungen ist bekannt, dass selbst für eine sehr

genaue Beschreibung der Abbildungsfehler des menschlichen Auges Zernike-Polynome der siebten Ordnung meistens ausreichen.

Marktgängige Geräte zur Wellenfrontanalyse des Auges liefern Ergebnisse mit Polynomen bis zur 40. Ordnung. Sie erreichen eine Auflösung in der Pupillenebene von rund 150 Mikrometern über den gesamten Pupillendurchmesser. Dieser ist beim jungen Menschen in der Dunkelheit maximal acht Millimeter groß, bei älteren Menschen vier bis fünf Millimeter.

Die Zernike-Polynome beschreiben die optischen Flächen im idealen wie auch realen Auge. Aus der Differenz leitet sich ab, an welcher Stelle der Hornhaut der Arzt bei der LASIK wie viel Material abtragen muss. Hartmann-Shack-Sensoren finden in der Augenheilkunde weitere Anwendung: Zum einen können Ärzte mit ihrer Hilfe die Abbildungsqualität von Intra-Okularlinsen, also Implantaten, messen. Zum anderen bieten inzwischen erste Optiker die Wellenfrontanalyse an. Dahinter steckt die Idee, dass beim Sehen in Dämmerung und Nacht die Fehler höherer Ordnung stärker ins Gewicht fallen als am Tage. Daher optimiert der Optiker die mit dem Phoropter ermittelten klassischen Werte der Fehlsichtigkeit (Sphäre, Zylinder, Achse...) mithilfe der Wellenfrontmessung. Die resultierenden Brillengläser sind dann so optimiert, dass der Einfluss der Aberrationen höherer Ordnung auf die Sehleistung in der Dämmerung möglichst gering ausfällt.

Michael Vogel



T. Bürke, / R. Wengenmayr (Hrsg.)

Erneuerbare Energie

Alternative Energiekonzepte für die Zukunft

Führende Wissenschaftler erklären wie u. a. Photovoltaik, Solarthermie, Solare Klimatechnik, Wind- und Wasserkraft, Brennstoffzellen, energieeffizientes Bauen, Wasserstoffspeicher zur Netzstabilisierung funktionieren. Das hochaktuelle Thema jetzt in der 3. Auflage mit 20 % mehr Information!

Pressestimmen zur Voraufgabe:

„Herausragend ist die Aufbereitung des Bandes mit vielen Grafiken...“

„Mit diesem Buch stößt der Wiley-VCH Verlag eine neue Tür auf. ... das Lesen macht Spaß. Man wünscht sich mehr davon.“

Materials and Corrosion

„Allgemein verständlich und trotzdem fachlich korrekt bietet das Buch einen schnellen, kompakten Überblick zum Titelthema.“

VDI-Nachrichten

Die Rheinpfalz, Pirmasenser Zeitung

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, E-Mail: service@wiley-vch.de, www.wiley-vch.de

3., aktualis. u. erg. Aufl.
Dezember 2011 182 S. mit
130 Abb., davon 128 in Farbe,
und 9 Tab. Gebunden € 34,90
ISBN: 978-3-527-41108-5

