



Lars Mendel

i.Scription™ – Refraktion trifft High Tech

Eine neue Methode der Optimierung von Brillengläsern

■ Einleitung

Auf der SILMO 2006 in Paris präsentierte Carl Zeiss Vision erstmalig ein neues Konzept der Weltöffentlichkeit: i.Scription – eine innovative Methode zur Optimierung von Brillengläsern. Dabei werden die am Auge gemessenen Aberrationen niederer Ordnung korrigiert und die Aberrationen höherer Ordnung bei der Optimierung der Brillengläser berücksichtigt. Die auf diese Weise berechneten Brillengläser werden mit höchster Genauigkeit gefertigt und garantieren dem Träger damit einen bisher nicht erreichten Grad der Individualisierung bei Brillengläsern.

■ Was ist i.Scription?

Der Name i.Scription steht für einen Optimierungsalgorithmus, der auch die Aberrationen höherer Ordnung des Auges bei der Berechnung der Brillengläser berücksichtigt (Abb. 1). Diese Abweichungen sind die Ursache für reduziertes Kontrastsehen oder schlechte Sicht bei lichtschwacher Umgebung in der Dämmerung oder nachts.

Der Augenoptiker übersendet die Daten der subjektiven Refraktion an Carl Zeiss Vision zusammen mit den gemessenen Aberrationen des neuen Wellenfrontaberrometers von Carl Zeiss Vision.

Mit i.Scription von Carl Zeiss Vision ist es nun möglich, optimierte Brillenglas-Werte auf dieser Basis zu berechnen. In der Kombination mit eigens dafür entwickelten Fertigungsverfahren kann der Augenoptiker so optimierte Brillengläser seinen Kunden zur Verfügung stellen. Diese garantieren dem Brillenträger optimierte Sehleistung in allen Umgebungsbedingungen, besonders aber in der Dämmerung und bei Nacht.

■ Messung der Aberrationen des Auges mit i.Profiler

i.Profiler ist ein innovatives Messgerät, das menschliche Augen mit hoher Genauigkeit analysiert und daraus Fehlsichtigkeiten und insbesondere Wellenfrontaberrationen inklusive höherer Ordnungen ermittelt. Carl Zeiss hat bereits langjährige Erfahrung mit dieser Messmethodik. In der Augenheilkunde wird sie beispielsweise zur Vorbereitung und Unterstützung der refraktiven Hornhautchirurgie eingesetzt. Carl Zeiss Vision hat jetzt diese Technologie weiter entwickelt, um eine revolutionäre Methode der optischen Berechnung für die Anwendung an Brillengläsern zur Verfügung zu stellen.

Der i.Profiler wurde auf der SILMO 2006 in Paris vorgestellt (Abb. 2). Es ist der erste multifunktionale und vollautomatisierte Keratograph und Autorefraktometer von Carl Zeiss Vision, basierend auf Wellenfronttechnologie.

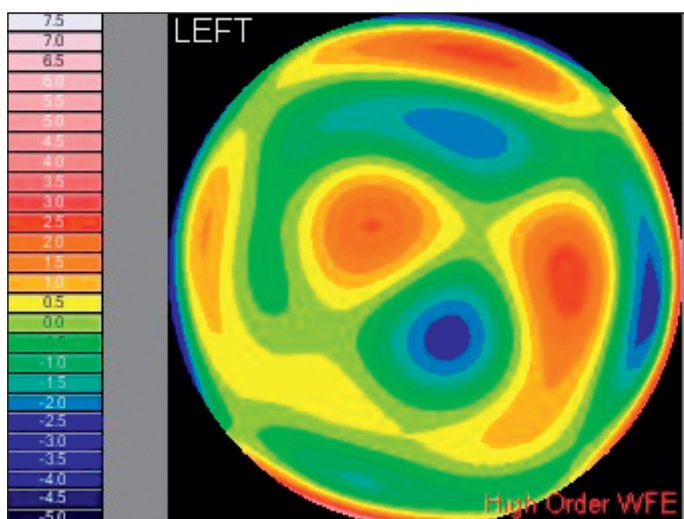


Abb. 1: Messergebnis des i.Profiler™. Unterschiedliche Farben stellen die Aberrationen höherer Ordnung als Fehlerfläche dar.

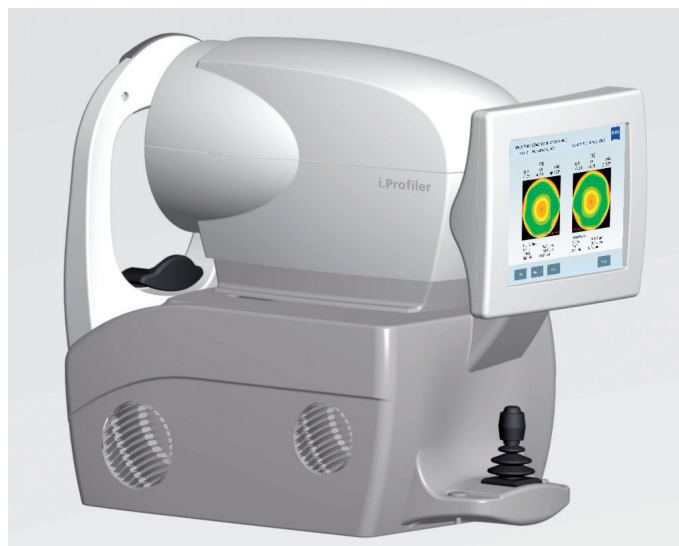


Abb. 2: Vollautomatischer i.Profiler™ von Carl Zeiss Vision.

Das Messergebnis herkömmlicher Autorefraktoren ist eine Standardrefraktion des Auges in der Konvention Sphäre, Zylinder und Achse. Diese Korrektur wird typischerweise für Pupillendurchmesser von 3,3 bis 3,5 mm ermittelt. i.Profiler erzeugt dagegen mit einem feinen Infrarotstrahl niedriger Intensität eine punktförmige Lichtquelle auf der Retina, die dort gestreut wird. Das davon zurückkommende Licht wird durch die Fehler des Auges moduliert. Diese Deformationen werden analysiert. Anders als herkömmliche Autorefraktometer misst der i.Profiler die Fehlsichtigkeit des Auges über die gesamte Pupillenöffnung. Diese gemessenen Werte ermöglichen die Berechnung der Refraktionsänderung in verschiedenen Situationen und die Darstellung von Aberrationen höherer Ordnung des Auges wie Koma, Dreiblattfehler oder sphärischer Aberration. Die Auswirkungen der Abbildungsfehler des Auges auf die Bildqualität haben Chen et al. 2005 simuliert (Abb.3).

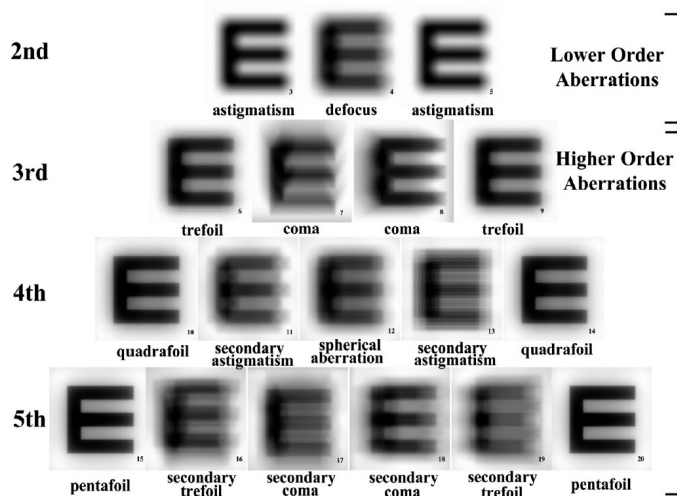


Abb. 3: Simulierte Abbildungen von Snellen-Haken bei unterschiedlichen Aberrationen mit gleichem RMS (Sphärisches Äquivalent). Die Auswirkung auf die Bildqualität in den verschiedenen Zernike Modi sind unterschiedlich [9].

Was ist eine Wellenfront?

Ein ideal abbildendes Auge formt eine ebene Wellenfront zu konzentrischen Kugelschalen, deren Mittelpunkte im Brennpunkt zusammenfallen. Jede Abweichung davon bewirkt einen bestimmten Fehler in der Abbildung. Unter einer Aberration versteht man die Abweichung einer analysierten Wellenfront in Bezug auf eine geometrisch perfekte Referenzwellenfront (meist eine ebene Welle). Die Aberrationen höherer Ordnung haben einen relativ großen Einfluss auf die Qualität des Nachtsehens (große Pupille). Daher ist es wichtig, neben den Aberrationen der 2. Ordnung (Defokus und Astigmatismus bzw. Sphäre und Zylinder) auch die Aberrationen höherer Ordnung zu bestimmen.

Die Aberrationen des Auges können anhand von Zernike Polynomen beschrieben werden. Zernike Polynome sind mathematische Funktionen, die dreidimensionale Flächen mit kreisförmigem Definitionsgebiet beliebig genau darstellen können. Mathematisch werden Zernike Polynome beschrieben durch eine Potenzreihe in radialer Richtung und eine fourierähnliche Reihe in Richtung des Winkels.

In der allgemeinen Form

$$Z_n^m$$

gibt n die Ordnungszahl des Polynoms in radialer Richtung an und m entspricht der Frequenz des Winkels. Polynome mit geradzahligem n und $m=0$ sind stets rotationsymmetrisch, alle übrigen sind winkelabhängig. Um die Abbildungsfehler des Auges hinreichend genau mit Hilfe von Zernike Polynomen darstellen zu können, ist die Angabe von mindestens vier, besser noch sechs Ordnungen erforderlich (Abb.4).

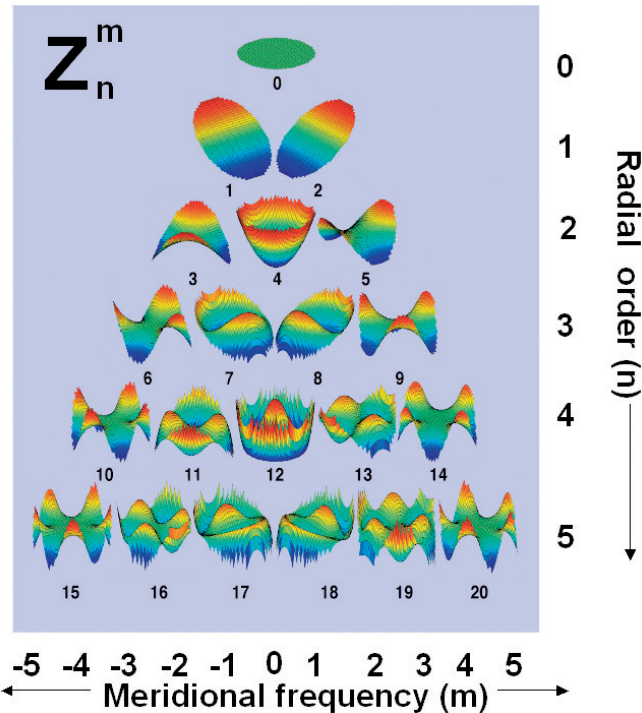


Abb. 4: Zernike-Polynome (Larry N. Thibos, PhD School of Optometry, Indiana University). v.l.n.r.: Versatz, Verkippung, Astigmatismus, Defokus, Astigmatismus, Dreiblatt, vertikale Koma, horizontale Koma, Dreiblatt, Vierblatt, Astigmatismus 2.Ordnung, Sphärische Aberration, Astigmatismus 2.Ordnung, Vierblatt, Fehler 5. Ordnung

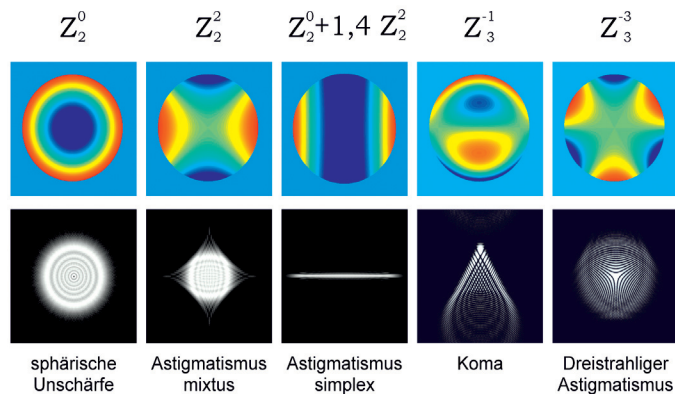


Abb. 5: Beispiele der Zernike-Polynome und der dazugehörigen Netzhautbilder. Die obere Reihe zeigt farbige Darstellungen der Zernike-Polynome über den Pupillenquerschnitt. Die untere Reihe zeigt, wie ein Lichtpunkt auf der Netzhaut abgebildet wird, wenn das optische System ausschließlich den darüber stehenden Bildfehler hätte [2].

Je mehr Ordnungen zur Beschreibung der Wellenfront herangezogen werden, desto genauer und detaillierter wird die Darstellung. Zernike Polynome sind in den letzten Jahren in zahlreichen augenoptischen Fachveröffentlichungen sowohl formelmäßig als auch graphisch in unterschiedlichster Art und Weise beschrieben worden. In Abb. 5 werden wichtige Abbildungsfehler als Zernike Polynom dargestellt. Zusätzlich wird gegenübergestellt, wie ein Lichtpunkt auf der Netzhaut abgebildet wird, wenn der entsprechende Abbildungsfehler isoliert von anderen Fehlern wirkt. So kann der Zusammenhang zwischen Abbildungsfehler und dessen Auswirkung besser betrachtet werden.

2003 wurden in einer internen Studie bei Carl Zeiss Vision 682 Augen gemessen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Augen eines großen Teils der Bevölkerung signifikante Aberrationen höherer Ordnung aufweisen (Abb.6). Diese Ergebnisse sind konsistent mit renommierten internationalen Studien z.B. von David R. Williams (Center Of Visual Science, University of Rochester^[6]) und Larry N. Thibos, School of Optometry, Indiana University^[7]).

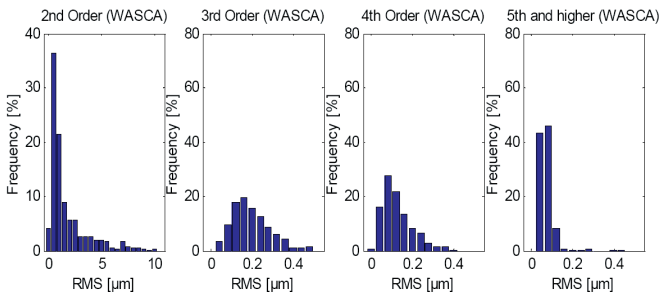


Abb. 6: Histogramme der Aberrationen höherer Ordnung gemessen an 341 Probanden.

Ein sphärischer Fehler - charakterisiert durch das Zernike Polynom 2.Ordnung

$$Z_2^0$$

verwandelt einen Lichtpunkt in einen rotationssymmetrischen, unscharfen Lichtfleck. Dieser Abbildungsfehler kann durch ein sphärisches Korrektionsmittel, wie zum Beispiel einem Brillenglas oder einer Kontaktlinse, korrigiert werden. Die Astigmatismus-Terme nach Zernike führen zu einem Astigmatismus mixtus mit betragsmäßig gleichen Hauptschnitten. Das zugehörige Punktbild ist ein fast kreisrunder Fleck, von dem zusätzliche Strahlen in zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen ausgehen. Bei der Kombination von Astigmatismus und sphärischem Fehler kann bei richtiger Dosierung ein Astigmatismus simplex entstehen. Die Korrektur des Astigmatismus erfolgt bekanntermaßen mit torischen Linsen.

Der „Koma“ genannte Abbildungsfehler liegt vor, wenn ein außermittiger Bereich des Linsensystems einen stärkeren Brechwert aufweist als der diametral gegenüberliegende andere. Die Koma (griechischen $\kappa\omicron\mu\eta$ = Haar) verwandelt einen Lichtpunkt in eine asymmetrische Lichtverteilung, die dem Schweif eines Kometen ähnelt. Die Koma ist mit den heutigen Brillengläsern für das blickende Auge nicht korrigierbar.

Ebenso wenig kann der dreiaxige Astigmatismus (engl.: „trefoil“, auch bekannt als Kleeblatt- oder Dreiblattfehler) mit Brillengläsern ausgeglichen werden. Durch diesen Abbildungsfehler wird ein Lichtpunkt zu einem unscharfen Fleck mit einer dreistrahligen Symmetrie verzerrt^[3]. In der Realität besitzt das menschliche Auge mehrere Abbildungsfehler gleichzeitig. Diese können durch Überlagerung verschiedener Zernike-Polynome dargestellt werden. Als Beispiel ist in Abb. 7 gezeigt, wie sich zwei Einzelfehler (sphärische Abberation und Koma) zu einem Gesamtfehler addieren.

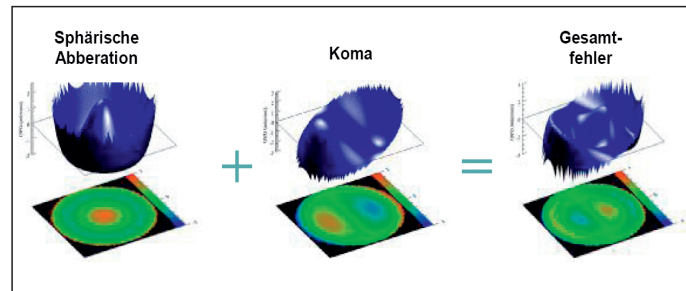


Abb. 7: Addition der Einzelfehler sphärische Abberation und Koma zu einem Gesamtfehler^[8].

■ Werden die Aberrationen höherer Ordnung des Auges durch Brillengläser korrigiert?

Nein. In der augenoptischen Fachwelt ist bekannt, dass Brillengläser die Fehler höherer Ordnung des Auges nicht zu korrigieren vermögen. Die Fehler höherer Ordnung können nämlich immer nur für eine Blickrichtung korrigiert werden. Dies bedeutet, dass z.B. nur ein zentraler Bereich im Brillenglas mit einem Durchmesser von 4 bis 5 mm mit einer Korrektur versehen werden kann. Die lokalen Krümmungen an dieser Stelle unterscheiden sich dann jedoch teilweise erheblich vom Rest des „Trägerglases“, das so etwa einem Lentikularglas mit Tragrand entsprechen würde, wobei dieser nur noch die Fehler 2. Ordnung korrigiert.

Ein solches Brillenglas wäre zum Beispiel für Sportschützen oder individuelle Okulare einsetzbar, weil sich die Hauptblickrichtung durch das Brillenglas nicht verändert. Ein Brillenglas für den allgemeinen Gebrauch ist jedoch immer für das blickende Auge konzipiert. Eine Korrektur der Fehler höherer Ordnung für viele Blickrichtungen ist also nicht möglich. In Vorstudien zu i.Scription wurde versucht, das Brillenglas gemäß der Hauptnutzung in verschieden gewichtete Zonen zu unterteilen, um in diesen Bereichen Fehler höherer Ordnung zu minimieren.

Erwartungsgemäß stellte sich in Trageversuchen schnell dar, dass die auf diese Weise entstandenen Brillengläser von Brillenträgern als unverträglich abgelehnt wurden. Blendowske et al. kamen zu dem Ergebnis, dass die Aberrationen höherer Ordnung (Koma und Dreiblatt) die dominierenden Abweichungen neben dem Astigmatismus sind. Der numerische Betrag von Aberrationen höherer Ordnung ist klein und kann lokal durch die Bestandteile der zweiten Ordnung mit Sphäre und Astigmatismus beschrieben werden^[4].

■ Klinische Studie

Der Carl Zeiss Vision Ansatz baut auf die Erkenntnisse der internen Vorstudien und Informationen aus internationalen Fachveröffentlichungen. Er berechnet auf Basis der Wellenfrontmessergebnisse und Analyse der Fehler höherer Ordnung eine neue sphärozyklindrische Kombination, die sich an den Vorgaben der klassischen subjektiven Refraktion orientiert. In einer klinischen Studie in Zusammenarbeit mit der Universitätsaugenklinik Jena unter der Leitung von Professor Dr. Strobel wurde dieser Ansatz im Doppelblindversuch erprobt. Untersuchungen im Rahmen der Studie zeigten, dass bei einem großen Teil des Probandenkollektivs die objektiv gemessene Kontrastsensitivität bei den nach diesem Verfahren entstandenen Brillengläsern verbessert wurde.

■ Zusammenfassung

Carl Zeiss Vision eröffnet eine neue Ära in der Geschichte der Brillengläser. Erstmals berücksichtigt Carl Zeiss Vision am menschlichen Auge gemessene Wellenfrontaberrationen höherer Ordnung bei der Optimierung der Brillengläser. Obwohl es nicht gelingen kann, Aberrationen höherer Ordnung mit Brillengläsern zu korrigieren, vermag der neue Ansatz jedoch in einem individuellerem Maß als bisher zur Verbesserung des Sehens beizutragen, dies insbesondere unter schlechten Lichtverhältnissen und in der Nacht. So werden viele Autofahrer von der neuen Methode profitieren. Wenn Sie mehr über i.Scription und i.Profiler erfahren möchten, besuchen Sie bitte den Carl Zeiss Vision Messestand auf der OPTI 2007 in München in Halle C3, Stand Nr.315/516 + Nr.514.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle den Herren Timo Kratzer, Jesus Cabeza und Dr. Erich Hofmann für deren Mitarbeit und fachliche Unterstützung.

■ Literatur

- [01] Wesemann, W.: Optische und physiologische Grenzen der wellenfrontgesteuerten Hornhautchirurgie; Der Ophthalmologe (2004) H. 101; S.521-537
- [02] Kohnen, T.; Bühren, J.: Derzeitiger Stand der wellenfrontgeführten Hornhautchirurgie zur Korrektur von Refraktionsfehlern; Der Ophthalmologe (2004) H. 6; S.631-647
- [03] Blendowske, R., Eloy, A., Villegas, OD and Artal, P.: An Analytical Model Describing Aberrations in the Progression Corridor of Progressive Addition Lenses, Optometry and Vision Science, Vol. 83, NO. 9, PP. 666–671
- [04] Chen et al. in: Optometry and Vision Science, Vol. 82, No. 5, May 2005, P. 365
- [05] J. Porter, A. Guirao, I. G. Cox, and D. R. Williams: Monochromatic aberrations of the human eye in a large population, J. Opt. Soc. Am. (2001) A 18, 1793-1803
- [06] L. N. Thibos, X. Hong, A. Bradley, and X. Cheng: Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes, J. Opt. Soc. Am. (2002) A 19, 2329-2348
- [07] <http://www.maximalsehen.de/neu/swf/wavefront.htm>, 08.11.2006

Anschrift des Autors:

Lars Mendel

Dipl.-Ing. (FH) Augenoptik

Carl Zeiss Vision – Produktentwicklung

Phone: +07361 - 591 302, Fax.: +07361 - 591 495

mailto:lars.mendel@vision.zeiss.com

http://www.carlzeissvision.com/

http://www.vision.zeiss.de