PD Dr. W. Wesemann
Höhere Fachschule
für Augenoptik Köln

Wellenfrontkorrektion der Aberrationen höherer Ordnung mit Kontaktlinsen, Teil 1

Kann man die Aberrationen des Auges korrigieren? Wie viel besser könnte man danach sehen? Mit welchen technischen und optischen Problemen muss man rechnen? Der folgende Artikel stellt wichtige Aspekte vor, die man im Zusammenhang mit der Wellenfrontkorrektion kennen sollte.
Nach den derzeit vorliegenden wissenschaftlichen Ergebnissen wird der Gewinn an Sehqualität bei normalen, augengesunden Personen relativ gering ausfallen. Ob sich der extrem hohe Herstellungsaufwand und Anpassaufwand lohnen werden, erscheint bislang zweifelhaft.

Seit mehr als 150 Jahren wird die Fehlsichtigkeit mit sphärozylindrischen Brillengläsern korrigiert. Auch bei der Kontaktlinsenanpassung geht es in erster Linie um die Bestimmung der passenden sphäro-zylindrischen Korrektion, die dem Kunden zu optimaler Sehschärfe verhilft. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass das menschliche Auge neben der sphärischen und astigmatischen Fehlsichtigkeit auch Abbildungsfehler (Aberrationen) höherer Ordnung aufweist.

In letzter Zeit wird nun intensiv darüber diskutiert, ob in Zukunft auch die Aberrationen höherer Ordnung mit Brillengläsern oder Kontaktlinsen korrigiert werden können. Die DOZ bezeichnete die Opti München 2007 als „Messe der Wellenfronten" und schrieb weiter: „In diesem Jahr gibt es nur den alles überstrahlenden Trend der Aberrationskorrektur." Ein Brillenglashersteller wirbt mit dem „Aufbruch in eine perfekte Welt". Auf der Homepage eines Augenoptikers liest man „Adlersicht durch wellenfrontkorrigierte Brillengläser." Obwohl im Bereich der Brillengläser derzeit die lautesten Werbesprüche ertönen, ist das Brillenglas für die Korrektion der Aberrationen des Auges denkbar schlecht geeignet. Mit Kontaktlinsen könnte das im Prinzip wesentlich besser gelingen, da sie sich bei Blickbewegungen mit dem Auge mitbewegen.

Abbildungsfehler des Auges

Nach den Vorstellungen der geometrischen Optik fokussiert ein ideales Auge eine einlaufende ebene Welle in einem Brennpunkt. Im emmetropen Auge liegt dieser Brennpunkt im akkommodationslosen Zustand exakt auf der Netzhaut. Tatsächlich ist das menschliche Auge kein ideales optisches System (Wesemann, 2004). Im Wesentlichen sind folgende Abbildungsfehler für eine Verschlechterung der Bildqualität verantwortlich:

- Abbildungsfehler des Auges
- Beugung des Lichts
- Chromatische Aberration
- sphärischer Fehler
- Astigmatismus
- monochromatische Aberrationen höherer Ordnung

Beugung

Die Beugung begrenzt bei Pupillendurchmessern kleiner als 2,5mm das Auflösungsvermögen des Auges (Wesemann, 2001). Die Beugung ist aber auch verantwortlich für die Beugungsstrahlen, die viele Menschen um helle punktförmige Lichtquellen wahrnehmen (Abb. 1a). Diese Strahlen entstehen durch Beugung an der Lidspalte, den Wimpern, der Iris und an den Nahtstellen in der zwiebelschalenförmig aufgebauten Augenlinse (Abb.1b aus Navarro und Losada, 1977). Dieser Abbildungsfehler des Auges kann mit wellenfrontkorrigierenden Korrektionsmitteln prinzipiell nicht korrigiert werden.

Abb. 1a: Abendlicher Blick über den Neckar auf

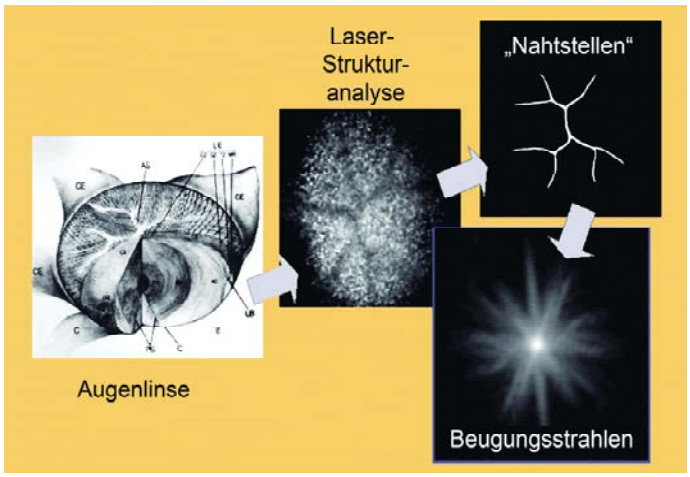

Abb. 1b: Lichtbeugung erzeugt auch im Auge Strahlen um helle Lichtquellen. Ursache ist die Beugung an den Wimpern, der Augenpupille und den inneren Strukturen der Augenlinse (nach Navarro und Losada, 1997)

Chromatische Aberration

Das Auge ist für blaues Licht myop und für rotes Licht hyperop. Von 400 bis 700 nm beträgt der Brechwertunterschied über 2 dpt (Abb. 2). Dieser Brechwertunterschied wird bekanntlich beim Rot/Grün-Test der Refraktionsbestimmung ausgenutzt. Infolge des Farbfehlers kann man das Auge bestenfalls für eine einzige Wellenlänge korrigieren. Auch die chromatische Aberration kann mit Wellenfrontkorrektion prinzipiell nicht korrigiert werden. Dazu bräuchte man ein Korrektionslinsensystem, das wie ein Achromat aufgebaut ist.

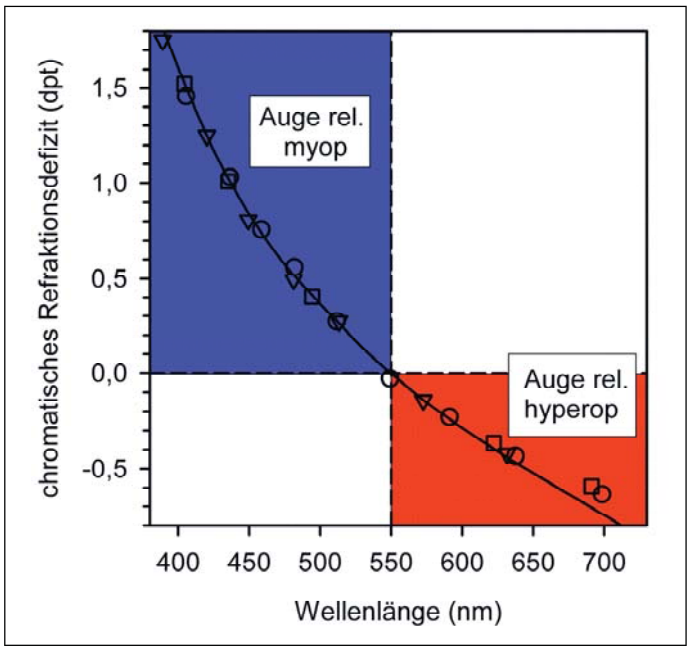

Abb. 2: Chromatische Aberration. Dargestellt ist die sphärische Fehlsichtigkeit des Auges relativ zur Wellenlänge 550 nm. Bei kurzwelligem Licht von 400 nm ist das Auge ca. -1,5 dpt kurzsichtig. Bei rotem Licht von 700 nm ist es ca. 0,7 dpt hyperop. Mit einer Brille oder einer Kontaktlinse kann das Auge immer nur für eine Wellenlänge richtig korrigiert werden. Für alle anderen Wellenlängen ist die Abbildung nicht optimal. Die Stärke der chromatischen Aberration ist bei allen Menschen gleich groß.

Lichtstreuung und Fluoreszenz

Durch Hornhautnarben, Ödeme oder eine beginnende Linsentrübung wird ein Teil des einfallenden Lichts vom richtigen Wege abgelenkt. Blaues und UV-Licht rufen in der Augenlinse außerdem störendes Fluoreszenzlicht hervor. Dieses Streulicht überlagert sich dem Netzhautbild wie ein Nebelschleier und reduziert den Bildkontrast. Auch diese Verschlechterung der Abbildung lässt sich nicht mit Wellenfrontkorrektion vermindern.

Monochromatische Aberrationen höherer Ordnung

Neben den oben genannten Abbildungsfehlern hat das Auge zahlreiche andere Aberrationen. Dazu zählen die Aberrationen niedriger Ordnung wie sphärische Fehlsichtigkeit und Astigmatismus sowie die Aberration höherer Ordnung Koma, dreiachsiger Astigmatismus, sphärische Aberration, vierachsiger Astigmatismus, usw. Diese Fehler treten auch im monochromatischen Licht auf. Sie sind umso störender, je größer der Pupillendurchmesser ist.

AZ
Swiss Lens
1/4 hoch

Zernike-Polynome

In der Optometrie werden die monochromatischen Aberrationen höherer Ordnung des Auges derzeit meistens mit Hilfe der Zernike-Polynome beschrieben. Das geschieht, weil diese Art der Beschreibung besonders anschaulich ist. Die Zernike-Polynome sind Gleichungen, die die Abweichungen der tatsächlichen Lichtwelle von einer gedachten, idealen Lichtwelle an jedem Punkt innerhalb der Augenpupille mathematisch elegant beschreiben. Mit den Zernike-Polynomen kann man den Gesamtfehler des Auges als Summe aus unendlich vielen Elementarfehlern darstellen (Wesemann, 2005b).

Gesamtfehler = Sphäre + Asti. + Koma + dreiachs. Asti.
+ sphär. Aberration + vierachs. Asti.
+ Koma 2. Ordnung
… + … +

Als Beispiel für die Beschreibung der Fehlsichtigkeit mit Zernike-Polynomen zeigt Abb. 3 die mathematische Darstellung der Wellenfrontfehler meines rechten Auges.

$$
\begin{aligned}
&0.118\sqrt{6}\,r^2\sin(2t)\\
&\quad+2.7045\sqrt{3}\,(2r^2-1)-0.025\sqrt{6}\,r^2\cos(2t)\\
&\quad-0.92\sqrt{2}\,r^3\sin(3t)\\
&\quad+0.26\sqrt{2}\,(3r^3-2r)\sin(t)\\
&\quad-0.134\sqrt{2}\,(3r^3-2r)\cos(t)-0.022\sqrt{2}\,r^3\cos(3t)\\
&\quad+0.063\sqrt{10}\,r^4\sin(4t)+0.17\sqrt{5}\,(6r^4-6r^2+1)\\
&\quad+0.036\sqrt{10}\,(4r^4-3r^2)\cos(2t)\\
&\quad+0.003\sqrt{10}\,r^4\cos(4t)+0.044\sqrt{3}\,r^5\sin(5t)\\
&\quad+0.156\sqrt{3}\,(5r^5-4r^3)\sin(3t)\\
&\quad-0.030\sqrt{3}\,(10r^5-12r^3\\
&\quad+3r)\sin(t)-0.0048\sqrt{3}\,(10r^5-12r^3\\
&\quad+3r)\cos(t)-0.0156\sqrt{3}\,(5r^5-4r^3)\cos(3t)\\
&\quad-0.024\sqrt{3}\,r^5\cos(5t)
\end{aligned}
$$

Abb. 3: Mathematische Darstellung des Wellenfrontfehlers an allen Stellen innerhalb der Pupille des rechten Auges des Autors bei 6mm Pupillendurchmesser. Die Variable r kennzeichnet den Abstand des betrachteten Punktes von der Pupillenmitte. t bezeichnet den Polarwinkel. Die Formel liefert im Ergebnis die Abweichung der tatsächlichen Wellenfront von der idealen Wellenfront in Mikrometern.

Sehr viel anschaulicher als die komplizierten Gleichungen ist eine 2-dimensionale farbige Darstellung, mit der man die Zernike-Polynome visualisieren kann.

Der farbige Kreis in Abbildung 4 stellt eine Aufsicht auf die Pupille dar. Durch die Farbe wird die Art des Wellenfrontfehlers veranschaulicht. Blau heißt: Die Wellenfront ist an dieser Stelle gegenüber der idealen ebenen Referenzwelle verzögert. Die Farbsättigung gibt die Stärke des Fehlers an. Je dunkler das Blau desto größer ist die Verzögerung. Rot heißt: Die Wellenfront erreicht diese Stelle früher als die ebene Referenzwelle. Grün bezeichnet Stellen, an denen kein Wellenfrontfehler vorliegt.

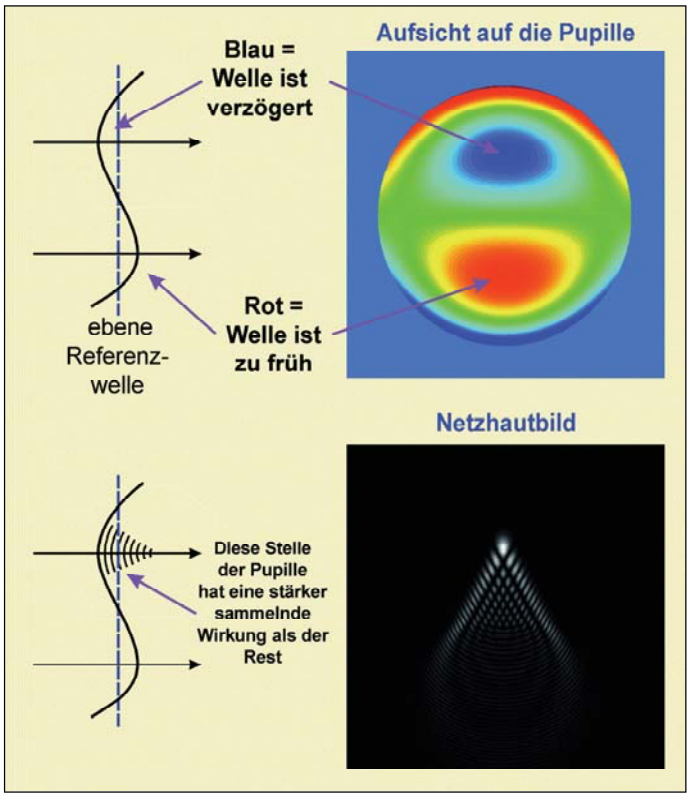

Abb. 4: Oben rechts: Farbige Illustration von vertikaler Koma. Dargestellt ist der Wellenfrontfehler an allen Punkten innerhalb der Pupille des Auges.
Blau heißt: Die Wellenfront ist im Vergleich zu einer idealen fehlerfreien Referenzwelle verzögert.
Rot bedeutet: Die Wellenfront läuft vor der Referenzwelle.
Grün: kein Wellenfrontfehler.
Links: Senkrechter Schnitt durch die Pupille.
Unten rechts: Punktbild, das entsteht, wenn ein Lichtpunkt von einem Auge mit diesem Abbildungsfehler auf der Netzhaut abgebildet wird.

In Abb. 4 ist exemplarisch das Zernike-Polynom Z(3,-1) dargestellt, das vertikales Koma beschreibt. Bei diesem Abbildungsfehler hat das Auge im oberen Teil eine stärker sammelnde Wirkung als im unteren. Diese sammelnde Wirkung ist in dem senkrechten Schnitt durch die Pupille (unten links in Abb.4) angedeutet. Im unteren Teil der Pupille ist die Wellenfront divergent, also stärker zerstreuend als die ebene Referenzwelle.

Wenn man durch eine derartige Linse einen Lichtpunkt abbildet, so erhält man keinen Lichtpunkt, sondern einen unscharfen Fleck, der an einen Kometenschweif erinnert. Daher auch der Name Koma. Abb. 5 zeigt die ersten 15 Zernike-Polynome in einer pyramidenförmigen Anordnung.

Messung der Aberrationen

Die Aberrationen des Auges konnten bis vor wenigen Jahren nur in aufwendigen Laborversuchen gemessen werden. Seit einiger Zeit stehen aber eine Reihe praxistauglicher Aberrometer zur Verfügung. Diese Geräte sehen im Wesentlichen so aus wie ein konventionelles Autorefraktometer. Sie messen aber zusätzlich zur sphärischen und astigmatischen Fehlsichtigkeit auch die Aberrationen höherer Ordnung.

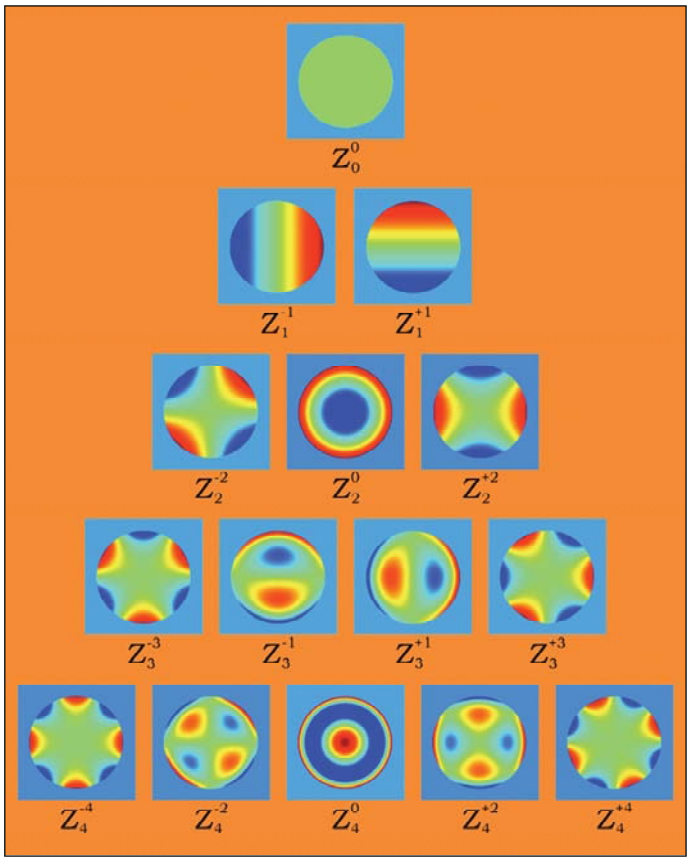

Abb. 5: Farbkodierte Darstellung der ersten 15 Zernike-Polynome. Der Komplexitätsgrad der Abbildungsfehler nimmt von oben nach unten zu. 2. Reihe: Prismatische Ablenkung Z(1,-1) und Z(1,1). 3. Reihe: Astigmatismus Z(2,-2) und Z(2,2) und sphärischer Fehler (2,0). 4. Reihe: dreistrahliger Astigmatismus Z(3,-3) und Z(3,3) und Koma Z(3,-1) und Z(3,1). 5. Reihe: Vierstrahliger Astigmatismus Z(4,-4) und Z(4,4), Koma 2. Ordnung Z(4,-2) und Z(4,2) und sphärische Aberration Z(4,0).

Als Ergebnis einer Aberrometermessung erhält man sozusagen einen individuellen Fingerabdruck der Brechkraftverteilung über den gesamten Pupillenquerschnitt (Abb. 6). Diesen Fingerabdruck kann man mit komplizierten Verfahren in Zernike-Polynome umrechnen.

Abb. 6: Als Ergebnis der Messung mit einem Wellenfrontaberrometer erhält man die Fehlsichtigkeit an jedem Punkt innerhalb der Pupille. Diesen „Fingerabdruck" der Abbildungsfehler des Auges kann man in die elementaren Zernike-Polynome zerlegen.

AZ
Hecht
1/2 hoch

Diesen Fingerabdruck darf man aber nicht mit dem Messergebnis eines Hornhauttopometers verwechseln, denn das Aberrometer misst die Fehler des gesamten Augensystems bestehend aus Hornhaut, Kammerwasser, Linse und Glaskörper.

Wie groß sind die Aberrationen des menschlichen Auges?

Die Aberrationen höherer Ordnung sind normalerweise sehr klein. Bei augengesunden Menschen sind die maximalen Abweichungen von der idealen Wellenfront deutlich kleiner als 1 Mikrometer. Bei pathologischen Veränderungen können sie aber größer werden. Bei Keratokonus findet man Aberrationen bis zu 10 Mikrometern. Das heißt, Patienten mit Keratokonus haben nicht nur eine hohe sphäro-zylindrische Fehlsichtigkeit, sondern auch sehr große irreguläre Anteile.

Durchschnittliche Größe der Aberrationen bei Augengesunden.

In den letzten Jahren sind in verschiedenen wissenschaftlichen Laboren Reihenuntersuchungen zur Stärke der Aberrationen des menschlichen Auges durchgeführt worden (Porter et al., 2001, Thibos et al., 2002, Cheng et al., 2004). Einige Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Die x-Achse listet die jeweilige Nummer der Zernike-Polynome auf (Z(3,-3) bis Z(5,-5) sind die Polynome 6. bis 20. Ordnung). Die Aberrationen niedriger Ordnung (Prisma, Sphäre und Astigmatismus) wurden weggelassen. Die y-Achse gibt an, wie stark die jeweilige Aberration vorkam (RMS Fehler). Die obere Grafik zeigt die Aberrationen meines eigenen rechten Auges. Deutlich sieht man einen ungewöhnlich starken dreistrahligen Astigmatismus Z(3,-3). Auch die sphärische Aberration Z(4,0) und der dreistrahlige Astigmatismus 2. Ordnung Z(5,-3) sind deutlich zu erkennen.

Die mittlere und die untere Grafik zeigen die mittlere Stärke der Aberrationen bei 109 Patienten nach Porter et al. (2001). Für die mittlere Abbildung wurde vor der Mittelung das Vorzeichen gestrichen (Mittelung des Betrages). Für die untere Abbildung wurde der Mittelwert unter Beachtung der Vorzeichen errechnet. Die Mittelung unter Beachtung der Vorzeichen ergibt interessanterweise, dass der durchschnittliche Wert aller Aberrationen nahezu Null ist. Das mittlere Standardauge hat offenbar keine wesentlichen Aberrationen[1]. Es gibt allerdings eine Ausnahme: die sphärische Aberration, Sie lässt sich bei allen Menschen nachweisen. Allerdings zeigen die Fehlerbalken,

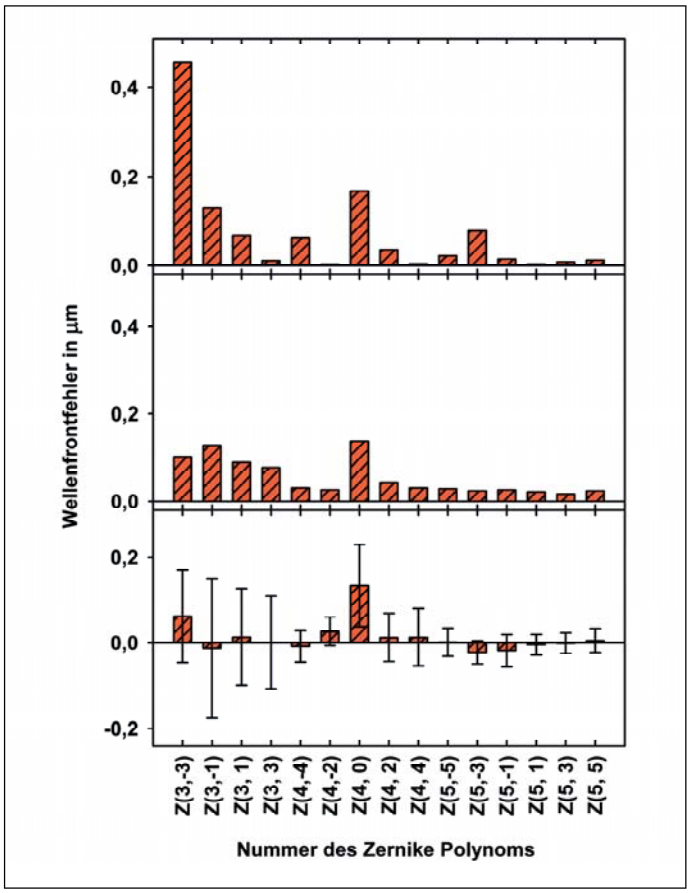

Abb. 7: Stärke der Aberrationen höherer Ordnung.
X-Achse: Nummer des Zernike-Polynoms.
Y-Achse: Stärke der Aberrationen.
Oberes Histogramm: Aberrationen des rechten Auges des Autors.
Mittleres und unteres Histogramm: Mittlere Stärke der Aberrationen bei 109 Patienten nach Porter et al. (2001).
In allen drei Histogrammen tritt die sphärische Aberration Z(4,0) deutlich hervor. In der oberen Abbildung sieht man zusätzlich einen außergewöhnlich starken dreiachsigen Astigmatismus 1. Ordnung Z(3,-3) und den dazu passenden dreiachsigen Astigmatismus 2. Ordnung Z(5,-3) (siehe auch Abb. 5)

dass auch die sphärische Aberration starke interindividuelle Schwankungen aufweist. Der Gedanke, eine asphärische Standardgeometrie würde zur KL-Korrektion der sphärischen Aberration der meisten Augen ausreichen, erweist sich deshalb als Illusion.

Die Aberrationen höherer Ordnung sind in der Summe viel kleiner als die normale Ametropie. Nach Angaben von Williams et al. (2001) machen die gewöhnlichen sphärischen und astigmatischen Fehler im Durchschnitt 93% des gesamten Fehlers aus. Nur etwa 7% des gesamten Fehlers betreffen die Aberrationen höherer Ordnung. Von den Aberrationen höherer Ordnung sind Koma und sphärische Aberration die wichtigsten (Charman, 2006). Es gibt allerdings auch augengesunde Personen mit wesentlich geringeren oder größeren Aberrationen als der Durchschnitt.

Interessanterweise sind die Wellenfrontaberrationen des gesamten Auges im Normalfall wesentlich kleiner als die Aberrationen der Hornhaut allein. Die Aberrationen der Augenlinse kompensieren nämlich einen Teil der Aberrationen der Cornea. So wird die positive sphärische Aberration der Hornhaut zu einem großen Teil von der negativen sphärischen Aberration

[1] *Im Zusammenhang mit der Wellenfrontkorrektion wird immer wieder gern Helmholtz zitiert. Helmholtz sagte bekanntlich: „Würde mir jemand ein optisches Gerät mit solchen Fehlern (wie sie das Auge hat) anbieten, würde ich es in aller Deutlichkeit zurück weisen." (Hermann v. Helmholtz, S.137-147). Wenn man sich aber klar macht, dass es der Natur offenbar gelungen ist, das einfache optische System des Auges so perfekt zu bauen, dass praktisch alle Aberrationen höherer Ordnung im Mittel gleich Null sind, wächst die Ehrfurcht vor den Fähigkeiten der Natur doch beträchtlich. Deshalb urteilte Helmholtz - nach meiner Meinung - zumindest an dieser einen Stelle ungerecht.*

der Linse neutralisiert. Übrig bleibt ein positiver Rest an sphärischer Aberration.

Eine Kontaktlinse, die die sphärische Aberration der Cornea perfekt ausgleicht, wäre demnach unbrauchbar, da ein Teil der sphärischen Aberration der Cornea bereits durch die Augenlinse korrigiert wird. Auch die Koma der Hornhaut wird zum Teil durch eine entgegengesetzte Koma der Linse ausgeglichen (Artal et al., 2006). Artal vermutet, dass diese Kompensation – wie bei der Emmetropisierung des Auges im Wachstumsalter – durch einen aktiven Prozess gesteuert wird.

Dietze und Cox (2003) fanden, dass sphärische weiche Kontaktlinsen mit negativer Wirkung eine negative sphärische Aberration induzieren, während sphärische weiche Kontaktlinsen mit positiver Wirkung eher eine positive sphärische Aberration hervorrufen. Da die meisten Augen von sich aus eine positive sphärische Aberration aufweisen, profitiert ein Myoper von der induzierten sphärischen Aberration, während sich das Sehen eines Hyperopen eher verschlechtert.

Wie stark stören die Aberrationen das Sehen?

In der Praxis sind die Auswirkungen der Aberrationen höherer Ordnung auf die Sehqualität bei weitem nicht so groß, wie man vielleicht meinen könnte. Dies ergaben Untersuchungen, die Larry Thibos (2002) von der Indiana University durchgeführt hat. Er bestimmte die Stärke der Aberrationen und die Bildqualität bei 200 gesunden, sphäro-zylindrisch korrigierten Augen. Bei 49% aller Augen war die Bildverschlechterung durch alle Aberrationen höherer Ordnung zusammengenommen kleiner als der astigmatische Restfehler, der durch die sphäro-zylindrische Korrektion mit üblichen Glasabstufung von 0,25 dpt nicht korrigiert werden konnte. Thibos ermittelte außerdem, welche sphärische Nebelung die Sehqualität genauso stark herabsetzt, wie die Aberrationen höherer Ordnung. Er fand, dass alle Aberrationen höherer Ordnung zusammengenommen die Sehqualität im Mittel genauso stark verschlechtern wie eine Nebelung mit einem sphärischen Plusglas von 1/8 Dioptrie. Das ist nicht viel! Dieser Wert gilt für augengesunde Personen mit 3 mm Pupillendurchmesser. Bei einem Pupillendurchmesser von 7,5 mm wirkten die Aberrationen höherer Ordnung zusammengenommen wie eine Nebelung mit sphärisch +0,25 dpt. Der Einfluss der Aberrationen höherer Ordnung auf die Bildqualität ist bei den meisten Augengesunden demzufolge nicht besonders groß.

Wie kann man die Aberrationen höherer Ordnung korrigieren?

Die Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung nennt man meistens „Wellenfrontkorrektion", weil mit diesen Techniken die verbogene Wellenfront wieder in eine ideale Wellenfront verwandelt werden soll.

Die Wellenfrontkorrektion kann im Prinzip mit einem mehrstufigen Verfahren durchgeführt werden. Im ersten Schritt werden die Fehlsichtigkeit und die Aberrationen höherer Ordnung über den gesamten Pupillenquerschnitt mit einem Aberrometer gemessen. Im zweiten Schritt wird aus den Messdaten eine kundenbezogene Korrektion berechnet. Im dritten Schritt muss diese Korrektion in ein geeignetes Korrektionsmittel eingearbeitet werden. Diese maßgeschneiderte Korrektion soll dann sowohl die Fehlsichtigkeit als auch die Aberrationen höherer Ordnung vollständig kompensieren.

Vereinfacht gesagt, muss man die „Beulen" im optischen System des Auges durch „entgegengesetzte Beulen" im Korrektionsmittel ausgleichen. Theoretisch geht das mit Kontaktlinsen, intraokularen Linsen, Hornhautchirurgie und in eingeschränktem Maße mit Brillengläsern. Bei allen 4 Korrektionsmethoden treten aber in der Praxis Probleme auf, die bis heute nur ansatzweise gelöst sind.

Kontaktlinsen

Bei einer Wellenfrontkorrektion mit Kontaktlinsen hat man mit den Problemen der Rotation und Dezentration zu kämpfen, denn die wellenfrontkorrigierende Kontaktlinse erfüllt ihre Funktion nur dann, wenn sie exakt an der vorausberechneten Stelle auf der Hornhaut sitzt und sich möglichst wenig bewegt. Nur so kann sie die Aberrationen höherer Ordnung vollständig ausgleichen. Bei einer Bewegung oder Drehung der Kontaktlinse werden die Wellenfrontfehler des Auges nicht mehr perfekt durch die wellenfrontkorrigierende Kontaktlinse kompensiert. Im Gegenteil, bei einem dezentrierten Sitz können neue Abbildungsfehler induziert werden, die vorher gar nicht da waren. Die Industrie versucht deshalb zunächst, die rotationssymmetrischen Aberrationen, wie z.B. die sphärische Aberration, zu korrigieren.

Intraokulare Linsen

Intraokulare Linsen sind von allen Korrektionsmitteln – zumindest theoretisch – am besten für die Wellenfrontkorrektion geeignet. Sie sitzen fest an einer Stelle im Auge und bewegen sich bei Blickbewegungen mit. In der Praxis gelingt es aber nicht hundertprozentig, die IOL exakt in die beabsichtigte Lage und Drehrichtung einzusetzen. Außerdem trifft man bei der Implantation einer IOL die Emmetropie bis heute nicht perfekt. Meist bleibt eine kleine Restfehlsichtigkeit übrig. Durch die modernen Kleinschnitttechniken ist der postoperative Astigmatismus heute allerdings sehr viel geringer als früher.

Die Forscher träumen derzeit von einer durch langwelliges UV-Licht programmierbaren IOL (z.B. LAL Calhoun Vision: Silikon IOL mit photosensitiven Zusatzstoffen), die man zunächst ohne Wellenfrontkorrektion ins Auge einsetzt. Nach abgeschlossener Heilung sollen dann im zweiten Schritt der restliche Refraktionsfehler und die Aberrationen höherer Ordnung gemessen werden. Im dritten Schritt will man die Form und den Brechwert der IOL postoperativ durch Bestrahlung mit UV-Licht in der gewünschten Weise verändern. Danach soll die Linse durch Licht fixiert werden, so dass sie ihren Brechwert nicht mehr verändern kann. Bei dieser Technik könnte man die Fehler also postoperativ messen und ausgleichen. Alle diese Ideen sind aber noch Zukunftsmusik.

Hornhautchirurgie

Auch durch Hornhautchirurgie mit dem Excimer-Laser können die Aberrationen höherer Ordnung im Prinzip korrigiert

werden. Ähnlich wie bei der IOL könnte man theoretisch eine Korrektion schaffen, die fest mit dem Auge verbunden ist und sich bei Blickbewegungen mitbewegt. In den letzten Jahren flossen besonders in den USA ungeheure Geldmittel in die Erforschung dieser Art der Wellenfrontkorrektion. Das Ziel ist, mit dem Laser ein individuelles Oberflächenprofil in die Hornhaut hineinzuschneiden, das die Aberrationen des Auges kompensiert. Diese Technik wird in der Augenheilkunde als „wellenfrontgeführte" Hornhautchirurgie bezeichnet.

Die wellenfrontgeführte Laserchirurgie wird seit mehreren Jahren heftig beworben. Auch in der augenoptischen Fachpresse konnte man lesen, dass sie angeblich bereits Stand der Technik ist. Tatsächlich klappt die wellenfrontkorrigierende Hornhautchirurgie derzeit aber noch nicht. Im Gegenteil, selbst mit modernster Lasertechnik, werden die Aberrationen höherer Ordnung durch die Laser-Op in der Mehrzahl der Fälle nicht korrigiert, sondern verschlimmert.

Abbildung 8 zeigt Ergebnisse, die Dr. Schallhorn auf einem Kongress vorgetragen hat. Er berichtete über Ergebnisse von wellenfrontgeführter LASIK bei 266 amerikanischen Piloten. Die x-Achse der Abbildung zeigt die Stärke der Aberrationen vor der LASIK. Die y-Achse zeigt die Veränderung der Stärke der Aberrationen durch die LASIK. Bei allen Personen oberhalb der Null-Linie (rote Punkte) waren die Aberrationen nach der OP stärker als vorher. Dies waren weit über 60% aller Patienten. In vielen Fällen waren die Aberrationen postoperativ sogar doppelt bis dreimal so stark wie vorher. Die wellenfrontgeführte LASIK ist zwar deutlich besser als die konventionelle LASIK. Sie hat aber noch einen weiten Weg vor sich, bis der in der Werbung lautstark erhobene Anspruch tatsächlich erfüllt wird.

Brillengläser

Brillengläser sind zur Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung nicht gut geeignet. Das Problem sind die Blickbewegungen des Auges. Die Wellenfrontkorrektion kann nämlich nur dann funktionieren, wenn das Auge und die aberrationskorrigierte Zone im Brillenglas exakt zueinander zentriert sind.

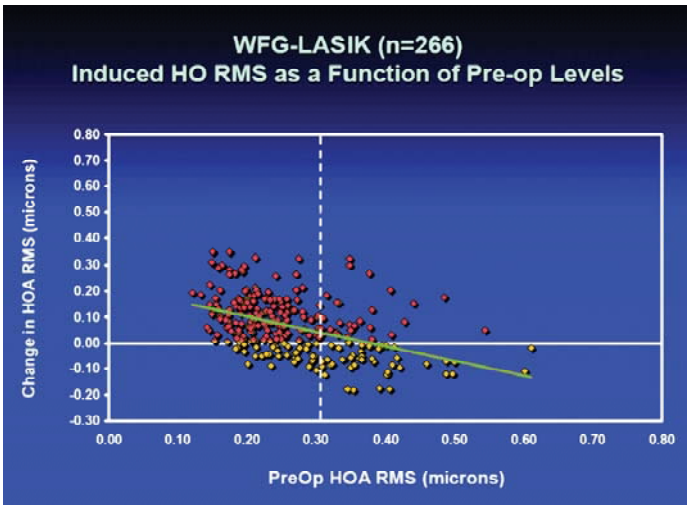

Abb. 8: Veränderungen der Aberrationen höherer Ordnung nach wellenfrontgeführter LASIK bei 266 Piloten. X-Achse: Präoperative Stärke der Aberrationen. Y-Achse: Postoperative Veränderung. Ein positiver y-Wert (rote Symbole) bedeutet eine post-operative Verschlimmerung der Aberrationen. Bei weit über 50% der Patienten waren die Aberrationen postoperativ größer als vorher. (nach Schallhorn, 2006)

Diese aberrationskorrigierte Zone im Brillenglas muss in etwa den Durchmesser der Pupille haben. Sobald das Auge seine Blickrichtung minimal verändert und nicht mehr exakt mittig durch diese Zone blickt, funktioniert die Wellenfrontkorrektion aus theoretisch optischen Gründen prinzipiell nicht mehr. Derzeit gibt es nur die amerikanische Firma Ophthronix, die ihren Kunden suggeriert, sie könne die Aberrationen des Auges mit ihren „iZon"-Brillengläsern korrigieren.

Kontaktadresse des Autors:
E-Mail: wesemann@hfak.de

Ein ausführliches Literaturverzeichnis befindet sich im Anhang des zweiten Teiles dieses Artikels, der in der nächsten Ausgabe der DOZ erscheinen wird.

PD Dr. W. Wesemann
Höhere Fachschule
für Augenoptik Köln

Wellenfrontkorrektion der Aberrationen höherer Ordnung mit Kontaktlinsen, Teil 2 – Schluss

Optische und physiologische Aspekte, die die Wirksamkeit einer Wellenfrontkorrektion beeinflussen

a) Der Pupillendurchmesser ist bei Tageslicht zu klein

Bei Tageslicht beträgt der Pupillendurchmesser in Innenräumen etwa 3,5 mm. Im Freien ist er meist noch geringer (Abb. 9 nach Farell und Booth, 1984). Nach Angaben von Wilson (2002) und Howland (2002) sind die Aberrationen des Auges bei kleinen Pupillendurchmessern aber sehr gering (siehe Abb. 10). Charman meint in seinem hochinteressanten Übersichtsartikel von 2006, dass die Aberrationen höherer Ordnung bei einem Durchmesser < 2,5mm vollkommen unerheblich für die Sehqualität sind.

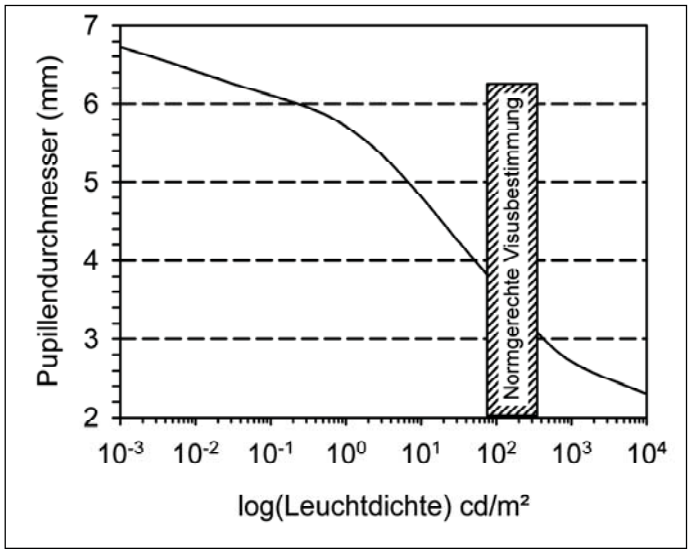

Abb. 9: Pupillendurchmesser als Funktion der Leuchtdichte. Das schraffierte Rechteck kennzeichnet den von der DIN 8596 zugelassenen Leuchtdichtebereich für normgerechte Optotypentafeln (nach Farrel und Booth, 1984).

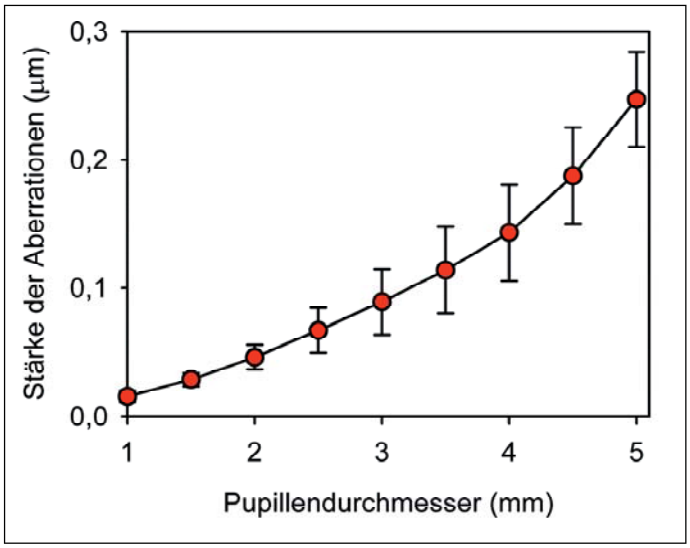

Abb. 10: Stärke der Aberrationen höherer Ordnung als Funktion des Pupillendurchmessers (nach Wilson, 2002).

b) Aberrationen bei weiter Pupille

Erst ab ca. 5 mm Pupillendurchmesser nehmen die Aberrationen korrektionswürdige Werte an (Abb. 10). Deshalb glauben einige Wissenschaftler, dass sich die Vorteile der Wellenfrontkorrektion eher im Bereich des Dämmerungssehens bemerkbar machen müssten. Der Bildkontrast auf der Netzhaut könnte durch eine perfekte Wellenfrontkorrektion bei weiter Pupille in der Tat deutlich gesteigert werden. Dadurch könnte sich das Kontrastsehen und die Kontrastempfindlichkeit bei Dämmerung verbessern.

Bei reduzierter Helligkeit arbeitet die Akkommodation allerdings sehr ungenau. Wenn es gelingen sollte, die Aberrationen höherer Ordnung bei weiter Pupille zu korrigieren, muss die in der Praxis erzielbare Netzhautbildschärfe dadurch nicht unbedingt wesentlich besser werden, denn das Auge kann sich bei reduzierter Helligkeit nicht mehr so gut scharf stellen wie bei Tageslicht („lag of accommodation", Abb. 11). Darüber hinaus

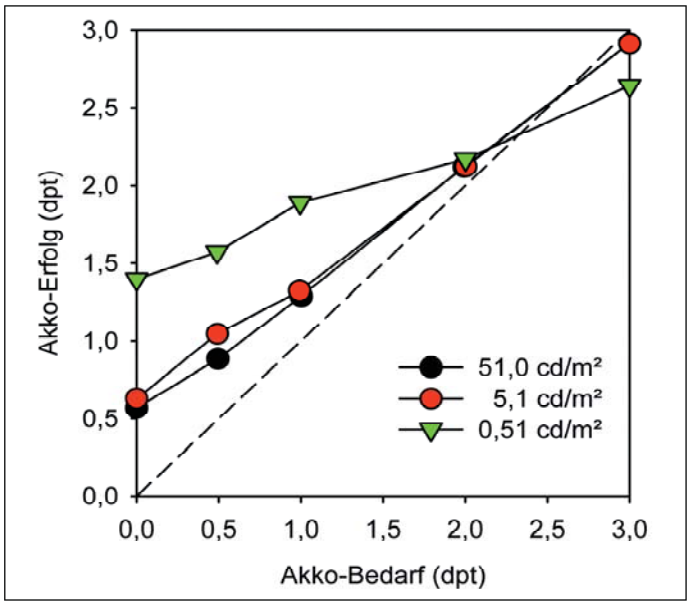

Abb. 11: Akkommodationserfolg für verschiedene Leuchtdichten. Wenn das Auge ein betrachtetes Objekt tatsächlich scharf auf die Netzhaut abbilden würde, müssten alle Messpunkte auf der gestrichelten Linie liegen. In Wirklichkeit unterscheidet sich der tatsächliche Akkommodationserfolg deutlich vom eigentlich notwendigen Akkommodationsbedarf. Die Fehler in der Scharfstellung sind bei reduzierter Leuchtdichte (0,51 cd/m?, grüne Dreiecke) besonders groß (nach Johnson, 1976).

reduziert der Stiles-Crawford-Effekt bei weiter Pupille die Auswirkungen der optischen Aberrationen auf die visuelle Wahrnehmung. Um wie viel sich das Kontrastsehen und die Sehqualität bei niedriger Leuchtdichte und weiter Pupille tatsächlich steigern läßt, kann man letztlich nur durch eine praktische Erprobung herausfinden.

c. Einfluss der Akkommodation

In Versuchen von Williams (2004) wurden die Aberrationen von Patienten gemessen, während Sie in unterschiedliche Entfernungen akkommodierten. Dabei ergaben sich sehr starke Veränderungen mit der Akkommodation (Abb. 12).

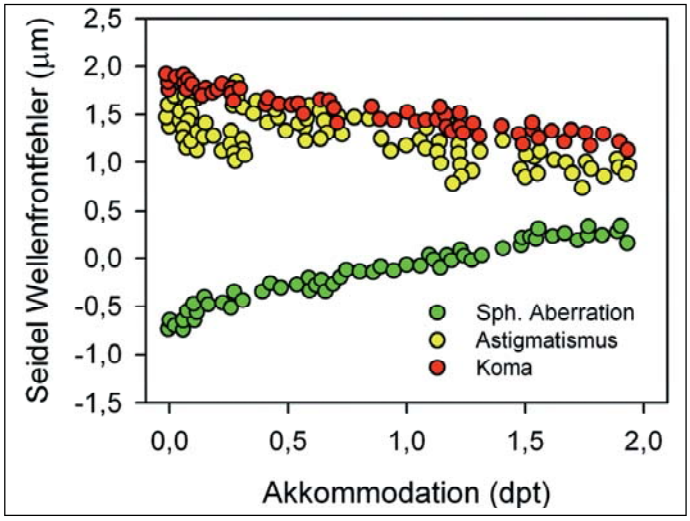

Abb. 12: Veränderungen von drei Aberrationen als Funktion der Akkommodation. (nach Williams et al., 2001)

Für die Ferne und für die Nähe braucht man also eigentlich verschiedene Wellenfrontkorrektionen. Williams kommentierte seine Ergebnisse damals sinngemäß mit den Worten: „Eine für einen bestimmten Akkommodationszustand „ideale" Aberrationskorrektur ist nicht mehr ideal, wenn sich die Akkommodation ändert. Bei einer Änderung der Akkommodation kann die „maßgeschneiderte" Korrektion sogar schlechter sein als gar keine Korrektion." Diese Ergebnisse wurden 2005 von Plainis et al. von der Univ. Kreta bestätigt. Sie zeigten u.a., dass eine optimale Korrektion der sphärischen Aberration für die Ferne dazu führen kann, dass sich die Bildqualität im Nahblick deutlich verschlechtert.

Schwankungen und Veränderungen der Aberrationen

Hofer et al. (2001) haben nachgewiesen, dass die Aberrationen nicht konstant sind, sondern sich ständig verändern. Diese kurzzeitigen Änderungen sind nicht sehr groß, aber zweifellos vorhanden. Auch tageszeitliche Veränderungen der Aberrationen und Langzeitveränderungen der Aberrationen sind mittlerweile bekannt. Jahnke et al. berichteten z.B. 2006, dass die Koma bei ihren älteren Patienten 10 Mal so groß war wie bei den jüngeren. Mit einer Kontaktlinse kann man aber natürlich nur einen bestimmten Refraktionszustand korrigieren.

Einfluss einer Dezentration und Rotation

Wenn man exakt durch die optische Mitte einer sphäro-zylindrischen Kontaktlinse blickt, hat die Kontaktlinse ihre Sollwirkung. Wenn die Kontaktlinse leicht dezentriert sitzt, kommt eine prismatische Nebenwirkung hinzu. Diese prismatische Nebenwirkung führt zu einer Verschiebung des wahrgenommenen Bildes. Die Bildschärfe wird dadurch aber nicht wesentlich herabgesetzt.

Bei der Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung ist die Situation vollkommen anders. Hier führt eine Dezentration zur Entstehung von zusätzlichen Abbildungsfehlern, die zuvor gar nicht da waren. Dies kann man anhand von Abbildung 13 nachvollziehen.

Um die graphische Darstellung zu vereinfachen, habe ich angenommen, dass das Auge ausschließlich sphärische Aberration aufweist. Der mit „Pupille" gekennzeichnete runde Kreis zeigt eine Aufsicht auf die Pupille des Auges. In der Pupille sieht man den „Fingerabdruck" der sphärischen Aberration, so wie ihn ein Wellenfrontaberrometer messen würde.

Für die Computersimulationen wurde angenommen, dass eine individuelle Kontaktlinse auf das Auge gesetzt wird, die die sphärische Aberration des Auges exakt ausgleicht.

Die sechs Teilbilder zeigen, wie sich die optische Zone der Kontaktlinse von oben vor die Pupille schiebt. In Teilbild 1 sieht man die unkorrigierte sphärische Aberration in der Pupille. In den Teilbildern 2 bis 5 entsteht durch die dezentrierte Überlagerung der Aberration des Auges und der entgegengesetzten Aberration der Kontaktlinse ein neuer Abbildungsfehler, nämlich Koma (vgl. auch Abb. 3). In Teilbild 6 ist die Wellenfrontkorrektion perfekt. Die optische Zone sitzt genau mittig zur Pu-

pille. Die Pupille erscheint gleichmäßig grün. Der Wellenfrontfehler ist gleich Null. Nimmt man einen Durchmesser der Pupille von 4 mm an, so entsprechen die Teilbilder 3 bis 5 einer Dezentration von 1,8 mm, 1,1 mm und 0,4 mm.

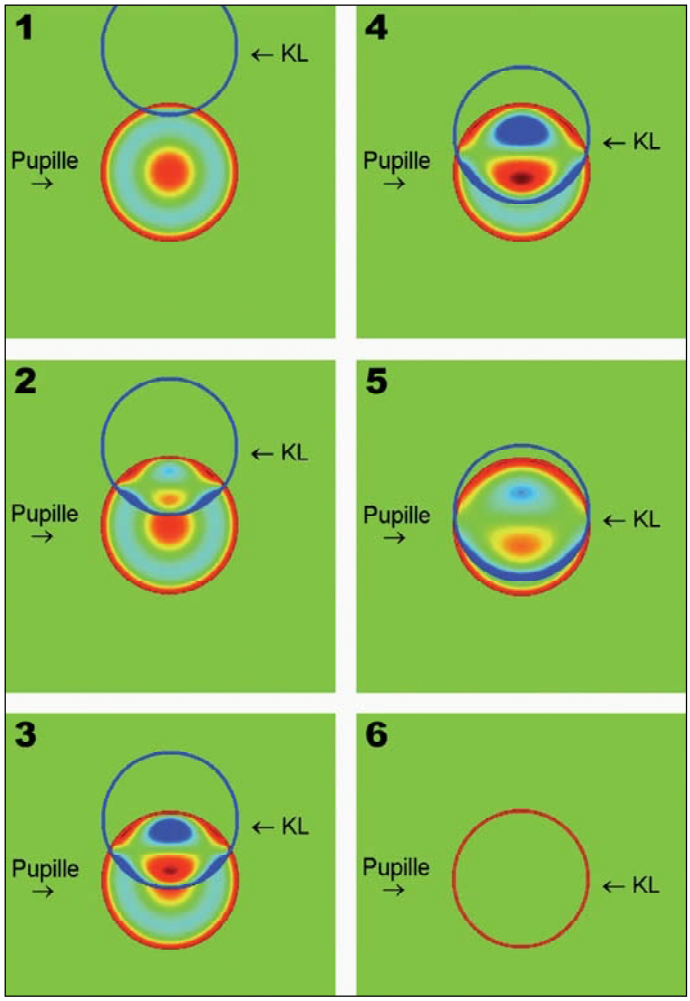

Abb. 13: Graphische Veranschaulichung der Korrektion eines Auges mit sphärischer Aberration durch eine Kontaktlinse mit entgegengesetzter sphärischer Aberration. Pupille: Aufsicht auf die Pupille des Auges. Zusätzlich sieht man den Wellenfrontfehler, so wie ihn ein Aberrometer messen würde. KL: optische Zone einer individuell angefertigten Kontaktlinse, die die sphärische Aberration des Auges perfekt korrigiert.
Von 1 bis 6 schiebt sich die optische Zone der KL immer mehr vor die Pupille. Bei einer Dezentration (Teilbild 2 bis 5) entsteht Koma. In Teilbild 6 klappt die Wellenfrontkorrektion perfekt, da die korrigierende KL richtig zentriert vor der Pupille sitzt. Die Wellenfrontkorrektion funktioniert also nur, wenn die Kontaktlinse exakt vor dem Auge sitzt.

Die stärkste Koma entsteht in dieser Bildfolge in Bild 4 – also bei einer Dezentration von 1/4 Pupillendurchmesser. Diese künstlich erzeugte Koma verschlechtert das Netzhautbild stärker als die eigentlich zu korrigierende sphärische Aberration.

Aus der Praxis der Kontaktlinsenanpassung ist dieser Effekt bekannt: Bei dezentriertem Sitz einer Kontaktlinse bewährt sich eine sphärische Kontaktlinse oft besser als eine asphärische.

Coletta (2005) schreibt z.B., dass formstabile sphärische Kontaktlinsen eigentlich die positive sphärische Aberration des Auges vergrößern müssten. Studien hätten jedoch gezeigt, dass die Sehqualität mit sphärischen GP-KL als besser empfunden wurde als mit asphärischen GP-KL. Ein Grund könnte die hohe Anfälligkeit der Bildschärfe der asphärischen Linsen bezüglich einer Dezentration sein. Ein zweiter Grund könnte in dem bis heute noch nicht richtig verstandenen Einfluss der Aberrationen von Linsenrückfläche und Tränenlinse auf die gesamten Aberrationen des Auges liegen.

Ganz allgemein gilt, dass die Wellenfrontkorrektion nur dann richtig funktionieren kann, wenn das Korrektionsmittel exakt zur Pupille zentriert ist. Sobald ein Versatz auftritt, entstehen neue Abbildungsfehler, die vorher gar nicht da waren.

Ähnliche Überlegungen gelten für eine Verdrehung von Kontaktlinsen auf dem Auge. Die Korrektion von Aberrationen, die nicht rotationssymmetrisch sind, wie z.B. der dreiachsige Astigmatismus oder Koma, klappt nur dann, wenn sich die Kontaktlinse nicht dreht.

Nach meinen Computersimulationen erscheint eine Dezentration der Kontaktlinse von ca. 0,2 bis 0,3 mm und eine Verdrehung um ca. 2 bis 3 Grad tolerabel.

Wo stehen wir heute?

Technische Probleme

Wenn man die Aberrationen mit einer Kontaktlinse ausgleichen will, muss man die „Beulen" im optischen System des Auges durch eine „entgegengesetzt verbeulte" Kontaktlinse ausgleichen. Da die Beulen bei augengesunden Personen deutlich kleiner als 1 µm sind, ist eine Maschinenpräzision im Nanometer- bzw. Submikrometerbereich erforderlich. Dies ist mit herkömmlichen Schleif- und Poliertechniken nicht zu erreichen. Krüsi (2007) berichtete auf der WVAO Jahrestagung 2007 von hochinteressanten Versuchen, bei denen Kontaktlinsen nach Aberrometermessungen mit einem Excimer-Laser nachgearbeitet wurden. Mit diesen individuell angefertigten Kontaktlinsen gelang es, die Aberrationen des Auges zu verringern. Die Sehschärfe war anschließend aber nur geringfügig besser, so dass Krüsi im Vortrag die Frage stellte, ob sich der enorm hohe technische Aufwand lohnt.

Visusverbesserung durch Wellenfrontkorrektion

Yoon und Williams (2002) haben im Laborversuch gemessen, um wie viel sich der Visus durch eine perfekte Wellenfrontkorrektion steigern lässt. Bei seinen Versuchen wurden die Aberrationen nicht mit Linsen, sondern mit einer computergesteuerten adaptiven Optik ausgeglichen (Wesemann, 2001). Das zentrale Bauelement in seiner Apparatur war ein elektrisch verbiegbarer Spiegel, der durch eine Computersteuerung so verbeult werden konnte, dass die Aberrationen ausgeglichen wurden. Durch diese perfekte Wellenfrontkorrektion verbesserte sich die Sehschärfe, wie man in Abbildung 14 sehen kann, bei Personen mit $Visus_{cc} > 0{,}9$ im Mittel z.B. um etwa eine halbe Visusstufe. Joeng et al. (2003) fanden eine Visusverbesserung von 0,4 Visusstufen. Das ist eine messbare, allerdings nicht gerade umwerfend große Visusverbesserung.

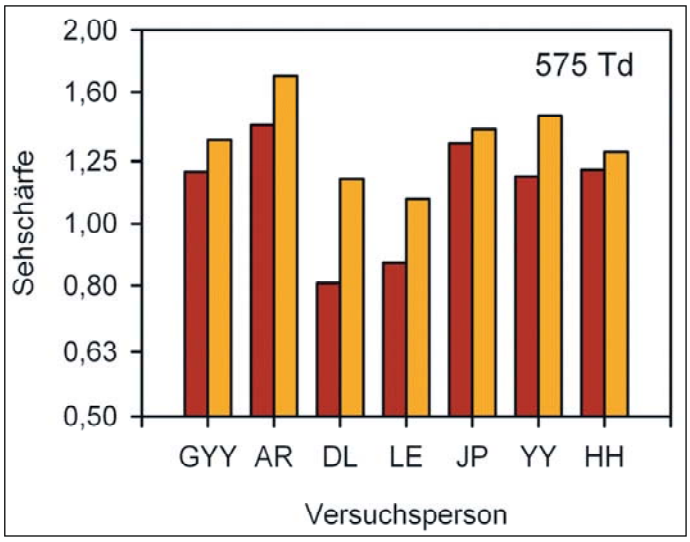

Abb. 14: Visussteigerung nach Wellenfrontkorrektion. Braun: Visus ohne, orange: Visus mit Wellenfrontkorrektion. Bei den Personen mit Visuscc > 0,9 verbesserte sich der Visus etwa um eine halbe Visusstufe (nach Yoon et al., 2002).

Angesichts dieser Zahlen erscheint mir der Begriff „Adlerblick" stark übertrieben! Eine etwas bessere Visussteigerung kann möglicherweise bei Optotypen mit niedrigem Kontrast erzielt werden.

Visussteigerung bei Keratokonus

Joeng et al. haben auch untersucht, ob sich der Visus bei einem Patienten mit Keratokonus steigern läßt. Für dieses Experiment wurde in Zusammenarbeit mit einem amerikanischen Kontaktlinsen-Hersteller eine spezielle Kontaktlinse angefertigt, die perfekt auf die Aberrationen des Patienten abgestimmt war. Mit dieser Linse fand Yoon eine faszinierende Visussteigerung um 4 Visusstufen. Ob sich das auch bei anderen Patienten wiederholen lässt, muss man abwarten.

Kontaktlinsen, die nur die sphärische Aberration korrigieren

In Anbetracht der enormen Schwierigkeiten, die einer wirklichen Wellenfrontkorrektion der Aberrationen des Auges entgegenstehen, versuchen einige Hersteller das Problem zu entschärfen.

Bei der „Wellenfrontkorrektion light" verzichtet man auf die Korrektion der tatsächlichen Wellenfrontfehler des Auges. Stattdessen versucht man die sphärische Aberration zu korrigieren. Dies hat zwei wesentliche Vorteile. Zum einen brauchen solche asphärischen Kontaktlinsen nicht rotationsstabilisiert zu sein, da die sphärische Aberration ein rotationssymmetrischer Abbildungsfehler ist. Zum anderen kann man davon ausgehen, dass alle Menschen beim Blick in die Ferne eine zumindest ähnliche sphärische Aberration aufweisen (siehe Abb. 7).

Derartige Kontaktlinsen können ihr Potential aber natürlich nur dann entfalten, wenn sie so zentriert vor der Pupille sitzen, wie sich der Hersteller das vorgestellt hat. Anderenfalls entstehen die in Abb. 13 beschriebenen komaartigen Bildfehler.

Dietze und Cox (2004) führten eine praktische Erprobung verschiedener individuell gefertigter weicher Kontaktlinsen durch. Mit diesen Linsen konnte die sphärische Aberration verringert werden. Ein Anstieg der Sehschärfe war aber nicht zu verzeichnen.

Zusammenfassung

Aus optischen Gründen ist eine perfekte Korrektion aller Abbildungsfehler des Auges mit Wellenfrontkorrektion nicht möglich. Schwerwiegende Abbildungsfehler, wie Lichtbeugung, chromatische Aberration und Lichtstreuung können prinzipiell nicht korrigiert werden.

Schwer zu lösende physiologische und mechanische Probleme bereiten die Akkommodation des Auges sowie die Dezentration und Rotation der Kontaktlinsen.

Die Korrektion der monochromatischen Aberrationen mit Kontaktlinsen ist theoretisch denkbar. Die Herstellung derartiger Kontaktlinsen erfordert allerdings neue, hochpräzise Mess- und Fertigungsverfahren.

Die zu erwartende Visussteigerung mit wellenfrontkorrigierenden Kontaktlinsen ist nach allem, was man bisher weiß, gering. Bei Augengesunden dürfte die Visussteigerung für Optotypen mit hohem Kontrast in der Größenordnung von einer halben Visusstufe liegen. Bei Optotypen mit niedrigem Kontrast könnte die Steigerung aber möglicherweise etwas größer ausfallen. Am ehesten ist eine Verbesserung des Kontrastsehens bei großen Pupillendurchmessern zu erwarten.

Eine Korrektion der Abbildungsfehler höherer Ordnung mit Kontaktlinsen könnte sich aber bei augengesunden Personen mit ungewöhnlich starken Aberrationen oder bei Patienten mit pathologischen Veränderungen (z.B. Keratokonus) durchaus lohnen.

Insgesamt gesehen ist die Wellenfrontkorrektion eine faszinierende Herausforderung, die Physiker und Hersteller gleichermaßen begeistert. Viele Wissenschaftler hoffen, dass durch die Wellenfrontkorrektion in Zukunft eine Steigerung der Sehqualität möglich wird.

Die technischen Schwierigkeiten sind allerdings immens und werden derzeit von keinem Hersteller beherrscht.

Wie könnte ein Anpassvorgang aussehen?

Sollte die individuelle Herstellung und Anpassung von aberrationskorrigierenden Kontaktlinsen in Zukunft gelingen, könnte man sich aus heutiger Sicht folgenden Anpassvorgang vorstellen:

1. Anamnese, Refraktionsbestimmung, Hornhauttopometrie, Aberrometermessung usw.
2. Auswahl und Einsetzen der ersten Messlinsen.
3. Auswahl und Anpassung von "rotations-stabilisierten Kontaktlinsen mit „idealer Rückflächengeometrie", die die sphärische und astigmatische Fehlsichtigkeit voll korrigieren. Zur Messung der Verdrehung sollten diese Linsen mit Lasergravuren versehen sein.
4. Bestimmung und Photodokumentation des tatsächlichen Sitzes und des Zentrierverhaltens der Kontaktlinse. Prüfung, wie stark sich die Linse in der Praxis vor der Pupille dreht. Prüfung um wie viel Zehntel die Pupillenmitte vom Mittelpunkt der Kontaktlinse abweicht. Erneute Messung der Aberrationen.

5. Übertragung aller Daten per Internet an Hersteller
6. Der Hersteller produziert maßgeschneiderte wellenfront-korrigierende Kontaktlinsen, deren optische Zonen entsprechend des gemessenen Sitzverhaltens dezentriert liegen.
7. Der Augenoptiker passt die neuen Kontaktlinsen an.
8. Nach einigen Tagen erneute Messung der Aberrationen über die Kontaktlinsen.
9. Bei Bedarf: Erneute Berechnung und erneute Anfertigung von verbesserten wellenfrontkorrigierenden Kontaktlinsen.

Ob die erreichbare Verbesserung der Sehqualität den enormen Herstellungs- und Anpassaufwand lohnt, muss sich erst noch erweisen. Fest steht, dass die Entwicklung und Erforschung der Wellenfrontkorrektion weitergehen wird.

Literatur:

Artal P, Benito A, Tabernero J, (2006) The human eye is an example of robust optical design. Journal of Vision 6, 1-7.

Bach PJ, (2006) Wellenfronttechnologie und Kontaktlinsen. Die Kontaktlinse 9, 2-3.

Charman WN, (2006) Optics of the Human Eye: Progress and Problems. Optom Vis Sci. 83, 335 -345.

Cheng H et al., (2004) A population study on changes in wave aberrations with accommodation. Journal of Vision 4, 272-280.

Coletta NJ, (2005) Correcting higher order aberrations: Implications for clinical practice. Contact Lens Spectrum, 42 - 47.

Dietze HH, Cox MJ, (2003) On- and off-eye spherical aberration of soft contact lenses and consequent changes of effective lens power. Optom Vis Sci. 80, 126 - 134.

Dietze HH, Cox MJ, (2004) Correcting ocular spherical aberration with soft contact lenses. J Opt Soc Am A 21, 473 - 485.

Farrel RJ, Booth JM, (1984) Design handbook for imagery interpretation equipment. Boeing Aerospace, Seattle.

Hofer H, Artal P, Singer B, Aragon JL, Williams DR, (2001) Dynamics of the eye´s wave aberration. J Opt Soc Am A18: 497 – 506.

Howland HC, (2002) High order wave aberration of eyes. Ophthalmic Physiol Opt 22(5), 434-439.

Jahnke M, Wirbelauer C, Pham DT, (2006) Einfluss des Alters auf die optischen Aberrationen des menschlichen Auges. Der Ophthalmologe 103, 596-604.

Jeong TM, Yoon GY, Cox IG, (2003) Vision improvement with customized optics in normal and abnormal human eyes. Poster vom Fall Vision Meeting, siehe http://www.cvs.rochester.edu/yoonlab/pdf/tmj_fallvis2003.pdf

Johnson CA, (1976) Effects of luminance and stimulus distance on accommodation an visual resolution. J Opt Soc Am 66, 138 -142.

Krüsi, (2007) Wavefront-Korrektur mit weichen Kontaktlinsen. Vortrag auf der WVAO Jahrestagung in Stuttgart Fellbach.

Navarro R, Losada MA, (1997) Shape of stars and optical quality of the human eye. J Opt Soc Am A14: 353 - 360.

Plainis S, Ginis HS, Pallikaris A, (2005) The effects of ocular aberrations on steady-state errors of accommodative response. Journal of Vision 5, 466-477.

Porter J, (2001) Monochromatic aberrations of the human eye in a large population. J. Opt. Soc. Am. A 18, 1793 - 1803.

Schallhorn SC, (2006) Is wavefront guided ablation necessary in patients with low pre-operative higher-order aberrations? Vortrag auf dem Symposium der ASCRS in San Francisco.

Thibos LN, Hong X, Bradley A, Cheng X, (2002) Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. J. Opt. Soc. Am. A 19, 2329-2348.

Wesemann W, (2001) Die Grenzen der Sehschärfe, Teil 2: Einfluss von Pupillengröße und Beugung. DOZ 9, 28-32.

Wesemann W (2002) Spektakuläre Verbesserung der Sehschärfe astronomischer Fernrohre durch adaptive Optik. DOZ, Heft 10: 32 - 37.

Wesemann W, (2004a) Optische und physiologische Grenzen der wellenfrontgesteuerten Hornhautchirurgie. Der Ophthalmologe, 101, 5, 521-536.

Wesemann W, (2004b + 2005a) Wellenfrontgeführte Hornhautchirurgie, Teil 1: DOZ Heft 12/2004, 48-55, Teil 2: DOZ Heft 1/2005, 42-51.

Wesemann W, (2005b) Mathematische Anmerkung. Welche Beziehung besteht zwischen der der normalen sphäro-zylindrischen Schreibweise von Korrektionsgläsern und den Zernike-Polynomen? DOZ Heft 3/2005, 40-44.

Williams DR, Yoon GY, Guirao A, Hofer H, Porter J, (2001) How far can we extend the limits of human vision? In Customized Corneal Ablation: the Quest for Supervision. Hrsg.: MacRae SM, Krueger RR, Applegate RA. Slack Inc. Thorofare NJ.

Wilson BJ, Decker KE, Roorda A, (2002) Monochromatic aberrations provide an odd-error cue to focus direction. J. Opt. Soc. Am. A 19, 833 - 839.

Yoon GY, Williams DR, (2002) Visual performance after correcting the mono-chromatic and chromatic aberrations of the eye. J Opt Soc Am A19: 266 - 275.

Die Literaturstellen 3) und 5) enthalten zahlreiche weitere hochinteressante Hinweise und Literaturstellen. Alle hier genannten Literaturstellen von Wesemann können auch über die Webseite „http://www.hfak.de/dozenten/Wesema.htm“ herunter geladen werden. Auch die Artikel des Journal of Vision sind frei über das Internet zugänglich (http://journalofvision.org).

Kontaktadresse des Autors:
E-Mail: wesemann@hfak.de