Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung des Auges mit Brillengläsern – Möglichkeiten und Probleme

PD Dr. W. Wesemann
Höhere Fachschule
für Augenoptik Köln

Kann man die Aberrationen des Auges mit Brillengläsern korrigieren? Welche Möglichkeiten gibt es? Mit welchen optischen Problemen muss man rechnen? Der folgende Artikel gibt einen Überblick über wichtige optische Grundlagen und erläutert Probleme, die durch die Blickbewegungen des Auges hinter dem Brillenglas auftreten.

1 Vorbemerkungen

Seit mehr als 150 Jahren wird die Fehlsichtigkeit mit sphärozylindrischen Brillengläsern korrigiert. Nicht berücksichtigt wurde bislang, dass das menschliche Auge neben der sphärischen und astigmatischen Fehlsichtigkeit auch Abbildungsfehler (Aberrationen) höherer Ordnung aufweist.

Im letzten Jahr wurden in Deutschland iZon®-Brillengläser eingeführt, die von der Firma Ophthonix in Kalifornien hergestellt und von Fa. Oculus vertrieben werden. Diese Gläser korrigieren laut Firmenprospekt „neben Sphäre, Zylinder und Achse auch die Aberrationen höherer Ordnung (dreiachsiger Astigmatismus, Koma und sphärische Aberrationen bis zur 6. Ordnung)".

Der Hersteller bzw. die Augenoptiker, die die Gläser vertreiben, versprechen dem Kunden „Adlersicht", eine verbesserte Sehschärfe sowie ein verbessertes Kontrast- und Farbensehen. Glaubt man der Werbung, so lassen die Gläser Beugungsstrahlen um Lichtquellen verschwinden, gleichen die Nachtmyopie aus und vermindern die chromatische Aberration; außerdem braucht man bei einer iZon-Fernbrille angeblich nicht mehr auf die Ferne zu korrigieren, sondern auf eine Zwischendistanz, da die Bildschärfe für die Ferne über die höhere Abbildungstiefe erreicht wird.

Über die genauen Details der Funktionsweise dieser Gläser wurde bislang nur wenig mitgeteilt. Es sind aber einige optische Grundlagen und grundsätzliche Probleme bekannt, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.

2.1 Aberrationen höherer Ordnung

Das menschliche Auge ist kein ideales optisches System. Neben den sphärischen und astigmatischen Refraktionsfehlern gibt es die chromatische Aberration und die monochromatischen Aberrationen höherer Ordnung. Zu den Aberrationen höherer Ordnung zählen Koma, dreiachsiger Astigmatismus, sphärische Aberration, vierachsiger Astigmatismus und zahllose andere Komponenten. Alle Aberrationen höherer Ordnung zusammengenommen entsprechen bei 3 mm Pupillendurchmesser einer Nebelung von etwa +1/8 dpt. Bei größeren Pupillendurchmessern treten sie etwa doppelt so stark in Erscheinung. Diese Zahlen sind Durchschnittwerte. Einzelne Personen können auch größere Aberrationen aufweisen.

Die Stärke der Aberrationen wird normalerweise nicht in Dioptrien, sondern als Wellenfrontfehler angegeben. Der Wellenfrontfehler beschreibt die Abweichungen der tatsächlichen Lichtwelle von einer fehlerfreien „idealen" Lichtwelle für jeden Punkt innerhalb der Augenpupille. Ausführlichere Erläuterungen zu den Aberrationen des Auges, der Zerlegung in Zernike-Polynome und den zu erwartenden Sehverbesserungen wurden vom Autor bereits in der DOZ veröffentlicht (Wesemann, 2004, 2005, 2007).

Für das bessere Verständnis der unten folgenden Betrachtung soll an dieser Stelle die von mir gewählte 2-dimensionale farbige Darstellung der Aberrationen kurz in Erinnerung gerufen werden.

Die farbigen Kreise in Abb. 1 stellen jeweils eine Aufsicht auf die Pupille des Auges dar. Die Farben kennzeichnen die Stärke des Wellenfrontfehlers an jeder Stelle innerhalb der Pupille[1]. Bei dem in Abb. 1S oben links dargestellten sphärischen Fehler handelt es sich um eine Myopie[2]. In Abb. 1A sieht man die farbkodierte Darstellung eines Astigmatismus mixtus. Der drei-

1 Blau bedeutet, dass die Wellenfront an dieser Stelle gegenüber einer fehlerfreien Referenzwelle verzögert ist. Die Farbsättigung gibt die Stärke der Verzögerung an. Je dunkler das Blau desto größer die Verzögerung. Rot heißt, dass die Wellenfront an dieser Stelle innerhalb der Pupille früher als die Referenzwelle durchläuft. Grün bezeichnet Stellen, an denen kein Wellenfrontfehler vorliegt.

2 Die Lichtwelle in der Mitte der Pupille (blau) hinkt hinter der Lichtwelle am Pupillenrand (rot) hinterher. Dadurch ergibt sich eine Lichtwelle, die stärker konvergent ist als erwünscht. Das Licht wird deshalb vor der Netzhaut gebündelt. (siehe auch Wesemann, 2007, Teil 1 Abb. 4)

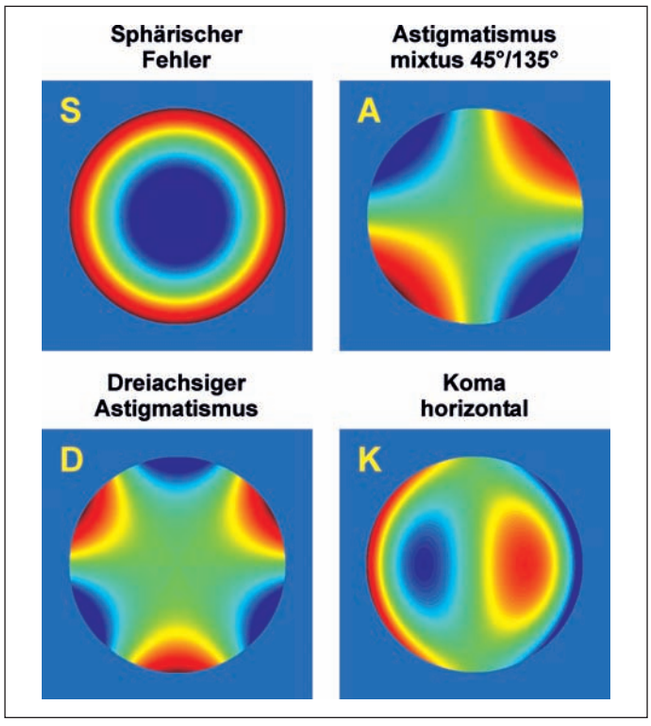

Abb. 1: Farbkodierte Darstellung des Wellenfrontfehlers innerhalb der Pupille des Auges bei vier verschiedenen elementaren Abbildungsfehlern.

achsige Astigmatismus (engl.: Trefoil, Abb. 1D) und die Koma (Abb. 1K) sind Beispiele für Aberrationen höherer Ordnung, die nach Firmenangaben durch die iZon-Gläser korrigiert werden. Beim dargestellten horizontalen Koma ist die Linse in der linken blauen Hälfte der Pupille myop und in der rechten rot-gelben Hälfte hyperop.

Seit einiger Zeit stehen praxistaugliche Aberrometer zur Verfügung, mit denen man zusätzlich zur sphärischen und astigmatischen Fehlsichtigkeit auch die Aberrationen höherer Ordnung messen kann. Als Ergebnis der Aberrometermessung erhält man den individuellen Wellenfrontfehler über den gesamten Pupillenquerschnitt (Abb. 2). Diesen Gesamtfehler kann man mit komplizierten mathematischen Verfahren in die darin enthaltenen Elementarfehler zerlegen.

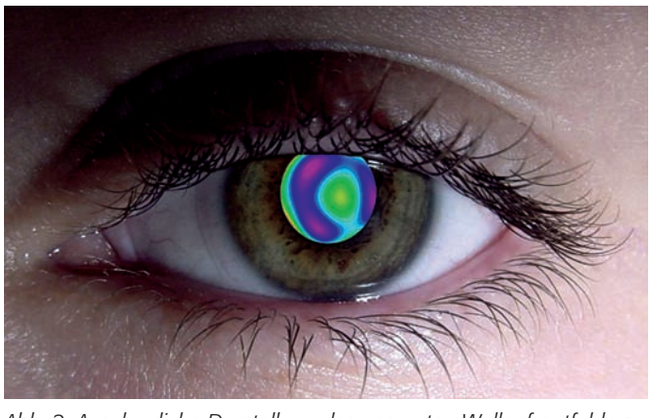

Abb. 2: Anschauliche Darstellung des gesamten Wellenfrontfehlers eines Auges. Der Gesamt-fehler kann mit mathematischen Methoden in die darin enthaltenen Elementarfehler zerlegt werden.

2.2 Das Grundprinzip der Wellenfrontkorrektion

Die Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung ist unter bestimmten Bedingungen möglich. Zuerst müssen die Fehlsichtigkeit und die Aberrationen höherer Ordnung mit einem Aberrometer gemessen werden. Dann muss ein Korrektionsmittel hergestellt werden, das nicht nur das sphäro-zylindrische Refraktionsdefizit, sondern auch die Aberrationen höherer Ordnung korrigiert. Vereinfacht gesagt, muss man die „Beulen" im optischen System des Auges durch „entgegengesetzte Beulen" des Korrektionsmittels ausgleichen[3].

2.3 Das US-Patent 6,840,619

Im Jahr 2005 veröffentlichte Dr. Andreas Dreher ein Patent, in dem ein Brillenglas mit variablem Brechungsindex und Methoden zur Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung geschützt wurden.

Ein Brillenglasmaterial mit variablem Brechungsindex hat sehr interessante und ungewöhnliche optische Eigenschaften, auf die im Anhang kurz eingegangen wird. In Zusammenhang mit der Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung ist hier zunächst nur wichtig, dass es mit dem patentierten Kunststoff möglich ist, den Brechungsindex eines Brillenglases an jedem Punkt innerhalb des Glases individuell zu verändern.

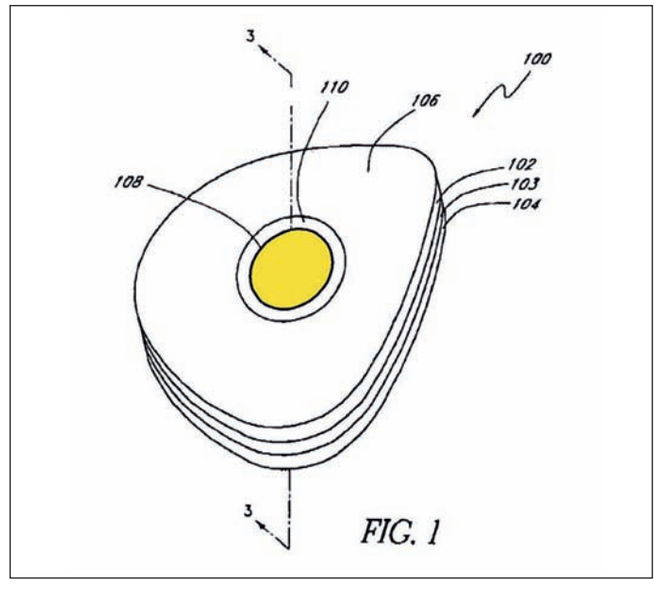

Abb. 3: Schematische Darstellung eines Brillenglases, das im Innern von zwei Deckgläsern (102, 104) eine Polymerschicht (103) enthält, deren Brechungsindex durch Bestrahlung mit Licht verändert werden kann. Durch den variablen Brechungsindex besteht die Möglichkeit, in einem abgegrenzten Bereich der sphäro-zylindrischen Linse (106) eine aberrationskorrigierte Zone (108, gelb markiert) zu schaffen (Fig.1 aus US Patent 6,840,619).

3 *Wenn man die Wellenfrontkorrektion nicht mit einer Kontaktlinse oder einer IOL sondern mit einem Brillenglas vornehmen will, muss natürlich noch der Scheitelabstand berücksichtigt werden, um die Wellenausbreitung vom Auge bis zum Brillenglas zu erfassen.*

Im Patent werden Möglichkeiten beschrieben, mit denen man die Aberrationen des Auges mit einem Brillenglas korrigieren kann. Abb. 3 zeigt das Prinzip. In der Mitte des Brillenglases wird laut Patentschrift eine kreisförmige „Supervision Zone" eingearbeitet, in der das Glas nicht nur den sphäro-zylindrischen Fehler korrigiert, sondern auch noch die Aberrationen höherer Ordnung[4].

2.4 Das Grundproblem der Aberrationskorrektion mit Brillengläsern

Zur Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung ist ein Brillenglas nicht so gut geeignet wie eine Kontaktlinse oder eine IOL. Das Grundproblem ergibt sich aus der Tatsache, dass ein Brillenglas für den allgemeinen Gebrauch immer für das blickende Auge konzipiert sein muss. Die Fehler höherer Ordnung können aber nur für eine bestimmte Blickrichtung korrigiert werden. Nur wenn das Auge exakt in diese Richtung blickt, wirkt die Korrektion. Dreher schreibt in seinem Patent wörtlich: „Um Supervision zu erreichen, müssen die Aberrationen höherer Ordnung korrigiert werden. Da diese Aberrationen höherer Ordnung, im Gegensatz zu den sphäro-zylindrischen Fehlern, aber in höchstem Maße unsymmetrisch sind, ist eine exakte Justierung der optischen Achse des Auges zur Supervision Zone im Brillenglas sehr wichtig[5]".

Warum ist das so? Warum kann man die „normale" sphärische oder astigmatische Ametropie in allen Blickrichtungen korrigieren, Aberrationen höherer Ordnung aber nur in einer Blickrichtung?

Betrachten wir zunächst die Korrektion einer einfachen sphärischen Fehlsichtigkeit mit einem sphärischen Brillenglas. Wenn das Auge exakt durch den optischen Mittelpunkt eines passenden sphärischen Glases blickt, wird das sphärische Refraktionsdefizit perfekt kompensiert. Wenn das Auge nicht genau durch die Mitte blickt, entsteht eine Situation, die jedem Augenoptiker geläufig ist: Infolge der Dezentration entsteht eine prismatische Nebenwirkung, die zu einer subjektiv wahrnehmbaren Bildver-

4 In den Abbildungen 3 bis 5 des US-Patents werden noch weitere Möglichkeiten vorgestellt. Abbildung 5a des Patents zeigt z.B. ein Brillenglas mit vielen „Supervision Inseln", bei denen die Aberrationen an mehreren Stellen im Brillenglas korrigiert werden. Zwischen diesen Inseln liegen Übergangsbereiche zum Grundglas und Stellen des Glases, an dem nur die normale sphäro-zylindrische Wirkung anzutreffen ist.

5 Dreher schreibt weiter sinngemäß: „Man kann das dadurch realisieren, dass man eine „Supervision Zone entlang der zentralen optischen Achse des Glases einbaut. Dadurch erreicht der Patient Supervision in einer Richtung. In den anderen Blickrichtungen hat das Brillenglas nur die normale sphäro-zylindrische Korrektion".

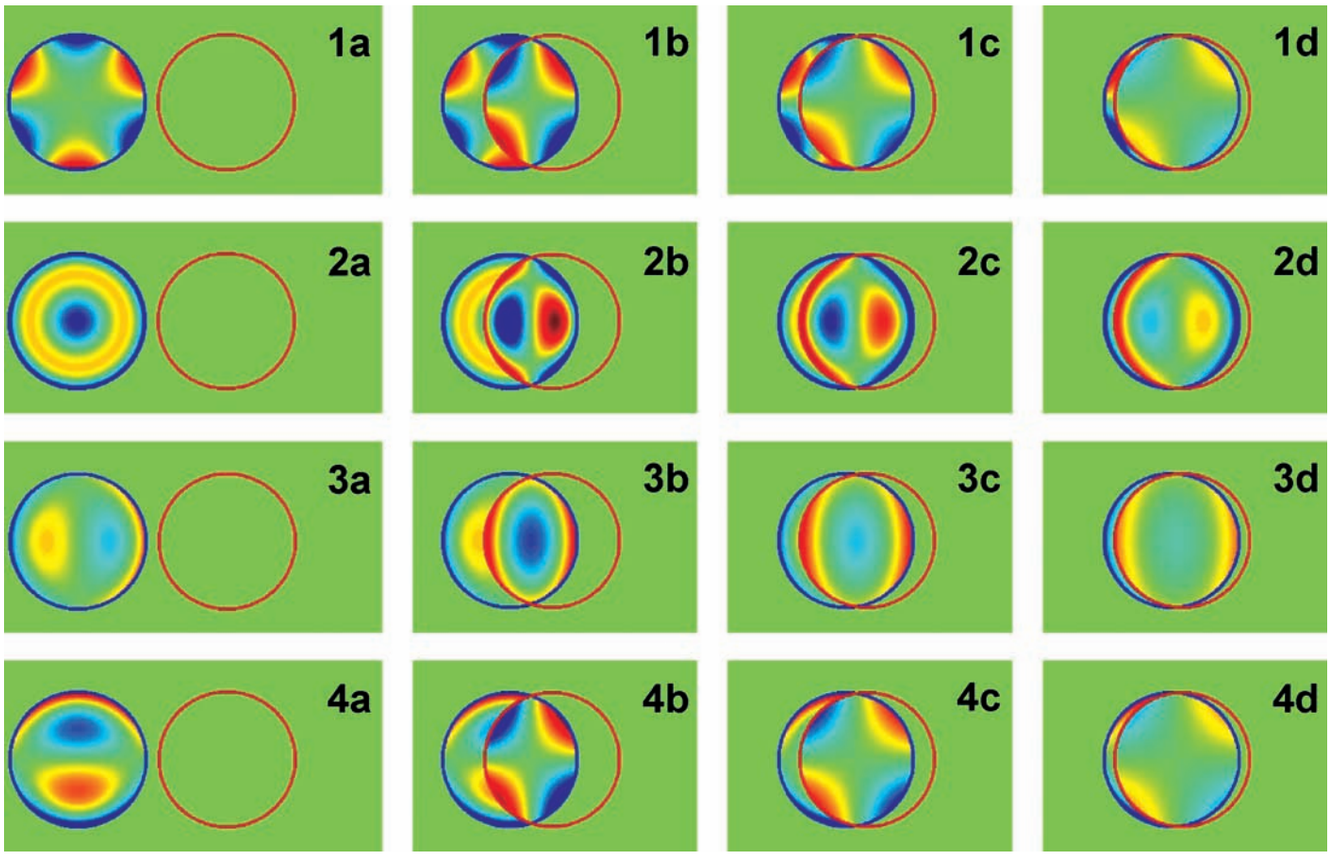

Abb. 4: Darstellung der Aberrationen, die bei dezentrierten Durchblick durch eine aberrationskorrigierende Zone entstehen. Roter Kreis mit gleichmäßig grüner Innenfärbung: Aberrationskorrigierte Zone im Brillenglas. Blauer Kreis mit farbiger Füllung: Aufsicht auf die Pupille des Auges. Die farbige Füllung zeigt die Wellenfrontfehler an, die ein Aberrometer bei der Überrefraktion über die aufgesetzte Brille messen würde. Die verschiedenen Reihen wurden für unterschiedliche Aberrationen des Auges berechnet.
(Reihe 1: Das Auge hat ausschließlich 3-achsigen Astigmatismus, Reihe 2: Das Auge hat ausschließlich sphärische Aberration, Reihe 3: ausschließlich horizontales Koma, Reihe 4: nur vertikales Koma).
In allen Fällen treten neue Aberrationen auf, wenn das Auge nicht genau mittig durch die aberrationskorrigierende Zone blickt.

schiebung führt. Das Wesentliche an dieser Tatsache ist, dass eine prismatische Nebenwirkung in einem normalen Brillenglas die Sehqualität nicht herabsetzt[6]. Deshalb können wir durch ein Einstärkenglas in alle Richtungen scharf sehen[7].

Das gleiche passiert bei einem Astigmatismus. Auch beim Blick durch ein dezentriertes Zylinderglas kommt es nur zu einer prismatischen Nebenwirkung, die das Sehen nicht verschlechtert.

Anders ist die Sachlage bei den Aberrationen höherer Ordnung. Wenn das Auge nicht exakt mittig durch die aberrationskorrigierende Zone blickt, entstehen neue Abbildungsfehler, die das Auge vorher gar nicht hatte. Diese neuen Fehler führen zu einer Verschlechterung der Sehleistung.

Dies soll anhand von Abbildung 4 erläutert werden. In jedem Teilbild von Abbildung 4 sieht man zwei Kreise, die sich mehr oder weniger überlappen. Der Kreis mit dem roten Rand und der gleichmäßig grünen Innenfärbung soll die aberrationskorrigierende Zone des Brillenglases darstellen. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird angenommen, dass die Mitte dieser Zone mit dem Zentrierpunkt zusammenfällt. Weiterhin wird angenommen, dass die Aberrationen des Auges bei mittigem Durchblick durch die Zone vollständig korrigiert werden. Der farbige Kreis mit dem blauen Rand soll eine Aufsicht auf die Pupille des Auges sein, die sich hinter dem Brillenglas frei bewegen kann. Der Durchmesser des blauen Kreises ist gleich der Pupillengröße.

Innerhalb der Pupille sieht man den Wellenfrontfehler des Auges so, wie ihn ein Aberrometer in den verschiedenen Blickrichtungen messen würde. Es ist also so, als ob wir eine Überrefraktion machen, während das Auge nacheinander durch verschiedene Stellen des Brillenglases blickt. Egal wohin das Auge blickt, dargestellt ist der vom Aberrometer erfasste Restfehler, der vom Brillenglas nicht korrigiert wurde.

In der obersten Reihe von Abbildung 4 wurde angenommen, dass das Auge ausschließlich einen dreiachsigen Astigmatismus hat und sonst keine andere Fehlsichtigkeit aufweist. In Teilbild 1a blickt das Auge links an der aberrationskorrigierenden Zone vorbei. Wenn man einen „normalen" Pupillendurchmesser von 3,5 mm annimmt, liegt der Durchblickpunkt 3,9 mm links vom Zentrierpunkt. Bei der „Überrefraktion" sehen wir den angenommenen dreiachsigen Astigmatismus (vgl. mit Abbildung 1D). In Teilbild 1d blickt das Auge durch einen Punkt, der 0,2 mm links von der Mitte der „Supervision Zone" liegt. Die Aberrationen sind nicht vollständig korrigiert, denn sonst wäre das Innere der Pupille gleichmäßig grün gefärbt. Man sieht aber keine dunkelblauen oder dunkelroten Anteile. Das zeigt, dass die Restfehler recht klein sind, und der dreiachsige Astigmatismus recht gut korrigiert ist.

Ganz anders sieht die Situation in Teilbild 1b aus. Hier blickt das Auge durch einen Punkt des Glases, der etwa 1 mm links von der Mitte der korrigierenden Zone liegt. Man sieht deutlich, dass die Aberrationen des Auges nicht richtig korrigiert werden. Im Gegenteil – die kräftigen Farben zeigen, dass durch den leicht dezentrierten Blick neue Abbildungsfehler entstehen,

6 Erst bei großen prismatischen Ablenkungen stören die Farbsäume.
7 Sieht man von den bekannten Problemen wie Ast. schiefer Bündel usw. ab.

die das Auge vorher nicht hatte. In dem Bereich, in dem sich Pupille und korrigierende Zone überlappen, sieht man eine Farbverteilung, die einem irregulären Astigmatismus mit zwei nicht senkrecht zueinander stehenden Achsen entspricht (Ast. biobliquus, Rassow, 1976). Etwas weniger schlimm sind die Restaberrationen in Teilbild 1c, das für einen Linksblick von 0,5 mm berechnet wurde (vgl. mit Abb. 1A).

In Reihe 2 wurde angenommen, dass das Auge ausschließlich sphärische Aberration hat. Die Blickrichtungen sind die gleichen wie in der ersten Reihe. In Teilbild 2a blickt es wieder links an der korrigierenden Zone vorbei. In Teilbild 1b und 1c blickt es dezentriert durch die korrigierende Zone. Aus der dezentrierten Überlagerung von sphärischer Aberration und der Korrektur für die sphärische Aberration entsteht im Überlappungsbereich sehr starkes Koma, das die Bildqualität herabsetzt (vgl. Abb. 1K).

In den Reihen 3 und 4 wurde angenommen, dass das Auge ausschließlich Koma hat. (Reihe 3 horizontales Koma, Reihe 4 vertikales Koma). In den Teilbildern 3b und 3c sieht man, dass bei nicht mittigem Durchblick durch die korrigierende Zone im Überlappungsbereich ein zusätzlicher Fehler entsteht, der einer sphärischen Nebelung ähnelt (vgl. Abb. 1S). In den Teilbildern 4b und 4c bildet sich, genau wie in 1b und 1c, ein irregulärer astigmatischer Fehler (vgl. Abb. 1A).

Die wesentliche Erkenntnis aus Abbildung 4 ist, dass schon minimale Blickwendungen ausreichen, um die Aberrationskorrektur zunichte zu machen. Blickt man neben der Mitte der aberrationskorrgierten Zone durch das Glas, ist die Sehqualität nicht besser sondern schlechter als bei einem herkömmlichen sphäro-zylindrischen Brillenglas.

3 Diskussion

Zusammenfassend kann man festhalten, dass es technisch möglich ist, ein Brillenglas herzustellen, das in einer bestimmten Blickrichtung aberrationskorrigiert ist. Um diese Blickrichtung herum entsteht konstruktionsbedingt eine unscharfe Randzone (Abb. 5). Außerhalb dieser Zone findet keine Korrektion der Aberrationen höherer Ordnung statt. Dort ist die Bildqualität nicht besser als bei einem herkömmlichen sphäro-zylindrischen Glas. Das Problem der unscharfen Abbildung in der Randzone ist ein prinzipielles optisches Problem. Es beruht auf optischen Gesetzen, die nicht überlistet werden können.

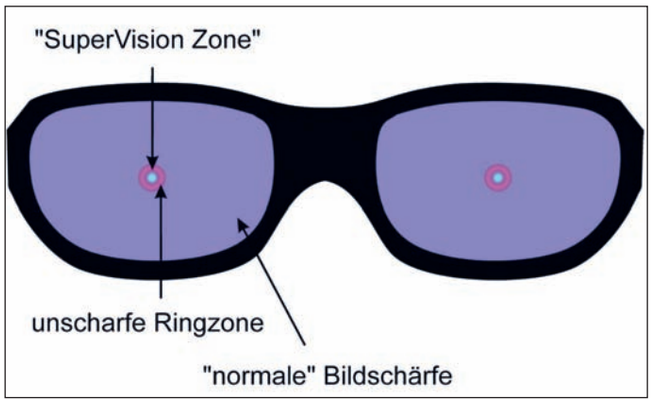

Abb. 5: Schema der optischen Eigenschaften einer aberrationskorrigierten Brille gemäß US Patent 6,840,619. In den beiden Hauptdurchblickpunkten ist eine aberrationskorrigierte Zone eingearbeitet, in der das Sehen ein klein wenig besser ist als mit einem herkömmlichen sphäro-zylindrischen Brillenglas, wenn der Brillenträger korrektionswürdige Aberrationen hat. Blickt man nicht exakt mittig durch diese Zonen, ist die Sehleistung schlechter als mit einem herkömmlichen sphäro-zylindrischen Brillenglas. Außerhalb dieser Ringzone ist das Brillenglas ein normales sphäro-zylindrisches Brillenglas.

Im Augenblick ist nicht bekannt, ob die iZon-Brillengläser der Fa. Ophthonix tatsächlich nach dem Patent von Dreher hergestellt werden. Diesbezügliche Anfragen wurden vom Hersteller bislang nicht beantwortet.

Blendowske hat iZon-Gläser mit einer sehr genauen Apparatur ausgemessen und erste Ergebnisse im Juni vorgestellt (DOZ, 6/2007). Er hat mit seinen objektiven Messungen nach den aberrationskorrigierenden Bereichen im Glas gesucht. Er fand aber nur eine normale sphäro-zylindrische Wirkung[8]. Die von ihm untersuchten Gläser korrigierten die Aberrationen des Auges weder in der Mitte noch in einem anderen Bereich des Glases.

Derzeit sieht es eher danach aus, als ob es sich bei den iZon-Gläsern im Wesentlichen um optimierte sphäro-zylindrische Brillengläser handelt. Wenn das tatsächlich so ist, müsste die in der Einleitung genannte Hauptaussage der Werbung noch einmal überdacht werden.

In einer Stellungnahme von Ophthonix (DOZ, 8/2007) schreibt Jethmalani, man müsse ja gar nicht 100% der Aberrationen korrigieren. Außerdem gäbe es „einige Aberrationen, die nützlich sind und beibehalten bzw. erhöht werden sollten". Die Bedeutung dieser Aussagen ist mir nicht vollständig klar. Richtig ist, dass die Fehler in der unscharfen Ringzone entsprechend kleiner werden, wenn man nur einen kleinen Teil der Aberrationen korrigiert. Man bedenke aber, dass alle Aberrationen höherer Ordnung zusammengenommen normalerweise weniger stören als eine Nebelung von 0,25dpt. Wenn jetzt nur ein kleiner Teil der Aberrationen korrigiert wird, bewegt man sich im Korrektionsbereich von wenigen Hundertstel Dioptrien. Ob das die versprochenen Sehverbesserungen bringen kann, ist die Frage.

Angesichts der in der Einleitung erwähnten, reißerischen Werbeargumente ist es verständlich, dass viele Augenoptiker bzw. viele Kunden erfahren wollen, inwieweit die in der Werbung getätigten Aussagen stimmen. Deshalb wäre eine wissenschaftlich fundierte, und durch objektive Messungen überprüfbare Stellungnahme der Herstellerfirma wünschenswert. Außerdem sind weitere Messungen an Gläsern aus der Serienproduktion durch unabhängige Institutionen sinnvoll.

Das Beste wäre, wenn man mit einem Aberrometer objektive Überrefraktionsmessungen über die aufgesetzte Brille machen würde. Dann könnte man direkt sehen, ob die Gläser die Aberrationen des Auges in den verschiedenen Blickrichtungen korrigieren oder nicht.

8 Im Rahmen der zulässigen Toleranzen

4 Anhang: Ein Beispiel zur Optik von Linsen mit variablem Brechungsindex

Beim iZon-Brillenglas handelt es sich um ein Sandwich-Glas. Zwei Deckgläser aus herkömmlichem Kunststoff schließen eine 0,5 mm dicke Schicht aus einem neuartigen Polymer ein. Der Brechungsindex der mittleren Schicht kann nach Angaben von Ophthonix durch einen UV-Laser von 1,56 bis 1,64 verändert werden.

Optische Materialien mit variablem Brechungsindex haben ungewöhnliche optische Eigenschaften. Im folgenden Beispiel soll hier erläutert werden, dass man mit einem solchen Material aus einer Planparallelplatte eine Sammellinse herstellen kann.

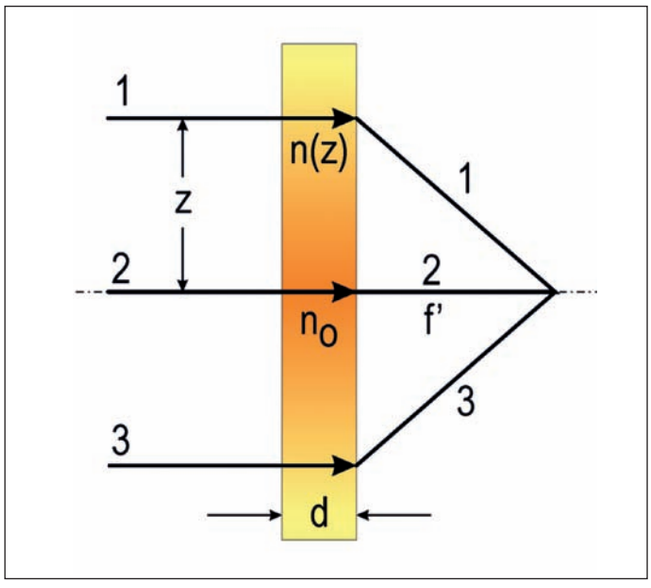

Abb. 6: Planparallelplatte mit Linsenwirkung. Wenn man möchte, dass die Planplatte die Lichtstrahlen in einem Brennpunkt sammelt, muss man erreichen, dass die optischen Lichtwege der Strahlen (1, 2 und 3) genau gleich lang sind. Dies kann man erreichen, indem man innerhalb der Planplatte einen geeigneten Brechungsindexverlauf erzeugt.

Aufgabe: Gegeben sei eine planparallele Schicht, die entlang der optischen Achse einen Brechungsindex n_o hat. Außerhalb der optischen Achse nimmt die Brechzahl kontinuierlich ab. Der Abstand des einfallenden Strahls von der optischen Achse sei z. Die Dicke der Schicht mit variablem Brechungsindex d. Der Optikdesigner soll die Abnahme des Brechungsindex gerade so gestalten, dass die Planparallelplatte eine sammelnde Wirkung mit Brennweite f' erhält (siehe Abb.6).

Fragen: Geht das? Welchen Verlauf muss der Brechungsindex haben?

Lösung: Das Fermat'sche Prinzip besagt, dass die optischen Weglängen der Abbildungsstrahlen 1, 2 und 3 in Abbildung 6 exakt gleich lang sein müssen.

Die optische Weglänge auf Weg 1 ist

$$n(z)d + \sqrt{f'^2 + z^2}$$

Die optische Weglänge auf Weg 2 ist

$$n_o d + f'$$

Ich setze die beiden Weglängen gleich und löse danach nach n(z) auf. Das ergibt

$$n(z) = n_o + \frac{f' - f'\sqrt{1 + \frac{z^2}{f'^2}}}{d},$$

$$n(z) = n_o - \frac{z^2}{2df'} = n_o - \frac{z^2}{2d} D,$$

wobei der Brechwert der gewünschten Sammellinse D für 1/f' eingesetzt wurde. Bei der Vereinfachung der Gleichung wurde außerdem die Reihenentwicklung der Wurzel benutzt.

Das heißt, man kann tatsächlich eine planparallele Platte mit sammelnder Wirkung D herstellen, wenn man dafür sorgt, dass sich der Brechungsindex n(z) außerhalb der optischen Achse proportional zu z^2 verringert.

Für die Mitwirkung bei der Ausarbeitung der Formeln möchte ich mich bei Dr. Tobias Breitenstein bedanken.

5 Literatur

Blendowske R., Klöß H. (2007) Brillengläser und die Korrektion der Abbildungsfehler höherer Ordnung. DOZ Heft 6/2007, 18-25.

Dreher A.W. (2005) Eyeglass Manufacturing Method Using Variable Index Layer. United States Patent US 6,840,619 B2 vom 11.01.2005.

Jethmalani J. (2007) Wellenfrontkorrektion mit iZon, DOZ Heft 8/2007, S. 10.

Rassow B. (1976) Zum Astigmatismus biobliquus. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, 200, S. 227-233.

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

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

Wesemann W., (2007) Wellenfrontkorrektion der Aberrationen höherer Ordnung mit Kontaktlinsen. Teil 1: DOZ Heft 6/2007, 70-76, Teil 2: DOZ Heft 7/2007, 84-88.

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

Anzeige

Seminare Visualtraining
4-Tage Seminar
18. - 21. Oktober 2007
15. - 18. November 2007
Tagungsort: Stuttgart
VISUS GmbH • 70173 Stuttgart
Calwer Str. 41 • Tel. +49-711-226 16 50 • Fax: 29 63 99
Info unter: www.visus.de