

Einleitung

Die Qualität der Brillenversorgung hat sich in den letzten Jahrzehnten stetig verbessert. Durch die hohen Sehanforderungen im Straßenverkehr und im Beruf gibt es heute nur noch sehr wenig Fehlsichtige, die nicht wissen, daß sie eine Brille brauchen.

Bei Kindern und Heranwachsenden ist das rechtzeitige Erkennen von Refraktionsfehlern aber noch nicht optimal gewährleistet. Dieses Problem kann nicht dem Augenarzt oder dem Augenoptiker angelastet werden, denn diese jungen Fehlsichtigen sind häufig nicht auffällig.

einer augenärztlichen Untersuchung zugeführt werden.

Als objektive Refraktionsverfahren bieten sich im Prinzip alle bekannten Methoden an.

Die Skiaskopie ist aber schwierig in der Durchführung, verlangt viel Übung und wird deshalb von den Kinderärzten nicht gut beherrscht. Automatische Refraktometer sind zwar einfacher zu bedienen, sie versagen aber, wenn der Prüfling sehr unruhig oder zu jung ist.

Die Photorefraktion ist eine noch in der Entwicklung befindliche Methode. Dieses Verfahren ist extrem einfach in der Durchführung und bietet den außerordentlich

Dr. W. Wesemann und
H. I. Wesemann, Köln

Die Photorefraktion ist ein objektives Refraktionsverfahren, das mit der Skiaskopie und dem Focaultschen Schneidverfahren verwandt ist. Bei der Photorefraktion erscheint bei einer Ametropie ein halbmondförmiger Lichtreflex in der Pupille des Prüflings. Bei einem emmetropen Auge bleibt die Pupille dunkel. Im Gegensatz zur Skiaskopie, bei der die Ametropie durch Vorschaltgläser neutralisiert wird, begnügt sich die Photorefraktion mit einem Photo des Lichtreflexes in der Pupille. Aus der Größe und Lage dieses Lichtreflexes kann der Refraktionszustand mit einer mathematischen Formel errechnet werden. Im Gegensatz zur Skiaskopie erfordert die Photorefraktion keine besonderen Vorkenntnisse. Da das Verfahren beide Augen gleichzeitig refraktiert, ist es besonders zur Aufdeckung von Anisometropien geeignet. Der nachfolgende Artikel gibt eine Übersicht über die Funktionsweise und den derzeitigen Entwicklungsstand der Geräte.

Photorefraktion – Ein objektives Screening- Verfahren zur Refraktionsbestimmung

Wie häufig solche kindlichen Sehfehler sind, ist in Abb. 1 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse einer Screening-Studie, die in Bristol und Cambridge durchgeführt wurde. Von den 4144 unkorrigierten Kleinkindern wiesen 4,9% eine Hypermetropie von mehr als 3,5 dpt auf. 1,5% hatten eine Myopie von mehr als -2,0 dpt. Hochgerechnet auf die Bevölkerung ergibt dies eine erhebliche Anzahl. Eine Anisometropie von mehr als 1,0 dpt, die in diesem Alter besonders gefährlich für die weitere Sehentwicklung ist, hatten 1,6% aller Kinder.

Zur Früherkennung von Refraktionsfehlern bei Kindern wäre ein objektives Refraktionsverfahren, mit dem zum Beispiel der Kinderarzt den Refraktionszustand überprüfen kann, sehr hilfreich.

Durch eine solche Untersuchung könnten die Problemkinder früher als bisher

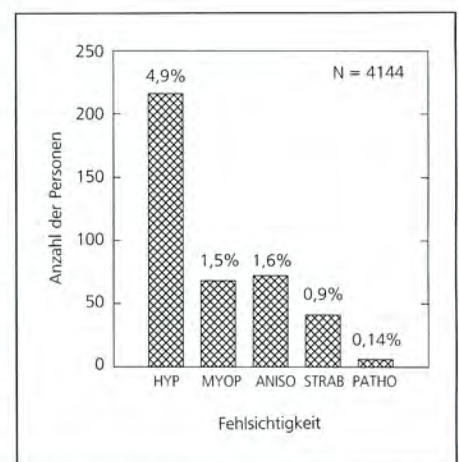


Abb. 1 Ergebnis einer Reihenuntersuchung bei Kleinkindern in Bristol und Cambridge: (HYP = Hypermetropie > 3,5 dpt; MYOP = Myopie > -2 dpt; ANISO = Anisometropie > 1 dpt; STRAB = Schielfehler; PATHO = Augenerkrankung)

großen Vorteil, daß stets beide Augen gleichzeitig untersucht werden. Auf diese Weise macht sich eine eventuelle Akkommodation auf beiden Augen gleichartig bemerkbar.

Bei der Photorefraktion unterscheidet man zwei physikalisch-optisch vollkommen unterschiedliche Verfahren: 1. Die von Howland und Howland (1974) entwickelte „isotrope“ Photorefraktion und 2. die von Kaakinen (1979) vorgestellte „exzentrische“ Photorefraktion. Dieser Artikel beschränkt sich auf die exzentrische Photorefraktion. Diese Methode wird von anderen Autoren auch als „statische Photoskiaskopie“ (Howland, 1980), „paraxiale Photorefraktion“ (Tyler und Norcia, 1985) und „Photoretinoskopie“ (Schaefel et al., 1987; Howland, 1985) bezeichnet.

Aufbau und Funktionsweise der Photorefraktometer

Das erste exzentrische Photorefraktometer, das von Kaakinen (1979) gebaut wurde, sowie auch die meisten nachfolgenden Geräte (Hay et al., 1983; Molteno et al., 1983; Bobier und Braddick 1985; Day und Norcia, 1986; Norcia et al., 1986) bestanden aus einer Spiegelreflexkamera mit langbrennweitigem Objektiv und einem Blitzgerät. Im Unterschied zu einer

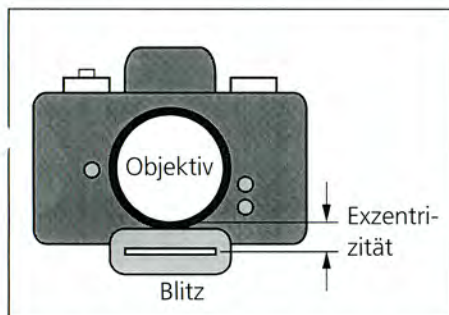


Abb. 2 Aufbau eines Photorefraktors; der Blitz ist sehr nahe unterhalb der Eintrittspupille befestigt

normalen Kamera ist der Blitz bei der Photorefraktion aber extrem nah bei dem Kameraobjektiv befestigt (siehe Abb. 2). Den Abstand der Blitzröhre von der Eintrittspupille der Kamera bezeichnet man dabei als die Exzentrizität der Lichtquelle.

Wenn man mit einem so nahe bei der Kameralinse montierten Blitz ein emmetropes Auge photographiert, so erhält man auf dem Bild rot aufleuchtende Augen (Abb. 3). Wenn man ein fehlsichtiges



Abb. 3 Pupillenreflexe bei einer Emmetropie (bezogen auf den Abstand der Kamera)



Abb. 4 Bei einer Hypermetropie erscheinen helle Reflexe auf der dem Blitzlicht gegenüberliegenden Seite ($RA = +2,0$ dpt, $LA = +3,5$ dpt)

Auge photographiert, so erscheint zusätzlich ein halbmondförmiger Lichtreflex in der Pupille, aus dessen Lage und Größe sich die Fehlsichtigkeit ableiten läßt (Abb. 4).

Um zu verstehen, wie dieser halbmondförmige Lichtreflex zustandekommt, betrachten wir zunächst den Beleuchtungsstrahlengang bei einem myopen Auge (Abb. 5). Die Lichtquelle sei exzentrisch unterhalb der optischen Achse angeordnet.

Das vom Blitz ausgesandte Licht wird infolge der Myopie vor der Netzhaut fokussiert, läuft hinter dem Brennpunkt divergent weiter und erzeugt einen diffusen Lichtfleck auf der Netzhaut, der sich vom Punkt A bis zum Punkt B erstreckt.

Der Strahlenverlauf des aus dem Auge zurückreflektierten Lichts ist in Abb. 6 dargestellt. Abb. 6 beschränkt sich dabei auf das von dem unteren Rand des diffusen Flecks (Punkt A in Abb. 5) ausgehende Licht, da sich zeigen läßt, daß dieser Punkt für die Grenzlinie des halbmondförmigen Lichtreflexes verantwortlich ist (Wesemann et al., 1991). Licht, das von diesem Punkt ausgeht, wird im Fernpunkt R fokussiert und läuft hinter R wieder divergent auseinander. Entscheidend für die Entstehung des halbmondförmigen Lichtreflexes ist die Tatsache, daß nur ein Teil dieses divergenten Strahlenbündels in die Kameralinse eintreten kann. Dieser in

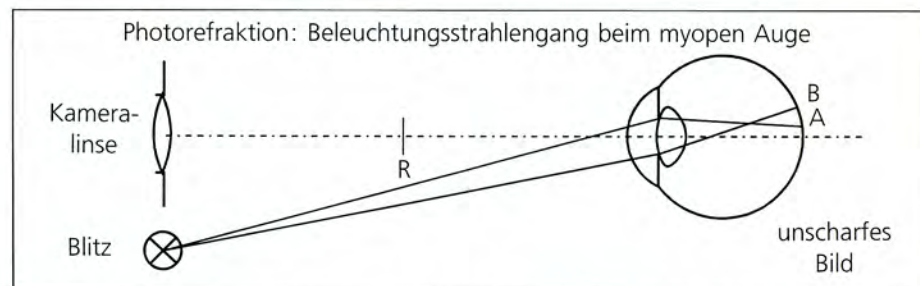


Abb. 5 Beleuchtungsstrahlengang bei der exzentrischen Photorefraktion; beim Vorliegen einer Ametropie entsteht ein unscharfes Abbild der Beleuchtung auf der Netzhaut

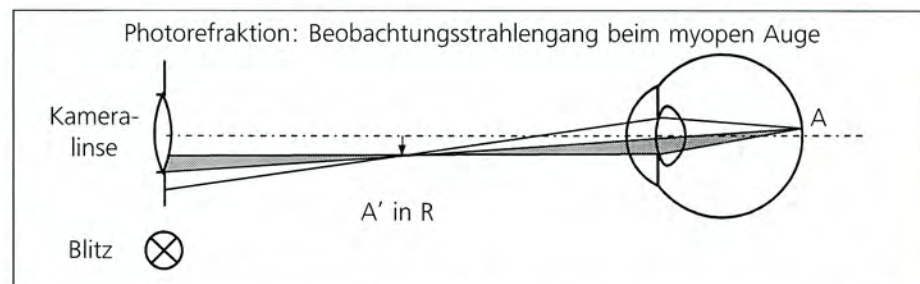


Abb. 6 Beobachtungsstrahlengang bei der exzentrischen Photorefraktion; nur der schraffiert gezeichnete Teil des aus dem Auge austretenden Lichtbündels kann in die Kameralinse eintreten; in diesem Bild leuchtet also der untere Teil der Pupille auf

Abb. 6 schraffiert gezeichnete Bereich erscheint hell in der Pupille. Der andere Teil der Pupille bleibt dunkel.

Aus Abb. 6 wird also deutlich, daß bei einer Myopie der helle Reflex auf der Seite der Pupille aufleuchtet, auf der sich die Lichtquelle befindet – in dieser Anordnung also unten.

Umgekehrt entsteht bei einer Hypermetropie der Lichtreflex immer auf der der Lichtquelle abgewandten Seite – bei dieser Anordnung also oben.

Sphärische Fehlsichtigkeiten

Die geometrisch-optische Analyse der Bildentstehung ist bei einer sphärischen Fehlsichtigkeit einfach (Wesemann et al., 1991). Die Größe des hellen Lichtreflexes erhält man aus der Formel

$$r = d_p - \frac{e}{d_c A_R - 1}$$

Aus dieser Formel geht hervor, daß die Größe des hell aufleuchtenden Teils der Pupille in der paraxialen Näherung nur von vier Faktoren abhängt: 1. dem Durchmesser der Pupille d_p , 2. der Exzentrizität der Lichtquelle e , 3. dem Abstand der Kamera vom Prüfling d_c und 4. der Fehlsichtigkeit des Auges A_R . Wenn man die Gleichung nach der Fehlsichtigkeit A_R umstellt, so kann man aus der Größe des Lichtreflexes die Stärke der sphärischen Fehlsichtigkeit berechnen.

Berechnet man die Größe des Reflexes als Funktion der Ametropie, so ergibt sich das in Abb. 7 schematisch dargestellte Verhalten. Ein stark myopes Auge ergibt einen großen hellen Reflex im unteren Teil der Pupille. Mit abnehmender Myopie wird der hell aufleuchtende Bereich immer kleiner, bis die Pupille schließlich ganz dunkel bleibt. Bei einer schwachen Hypermetropie erscheint ein kleiner heller Reflex im oberen Teil der Pupille. Eine starke Hypermetropie zeigt einen großen hellen Reflex im oberen Teil der Pupille.

Im mittleren Bereich bleibt die Pupille vollständig dunkel. Der Photorefraktor ist für diese Ametropien nicht empfindlich. Die Lage und Ausdehnung dieser „toten Zone“ hängt dabei von zwei Parametern ab.

- Der Mittelpunkt der toten Zone liegt bei einer Ametropie, die dem Reziprokwert des Kameraabstandes entspricht.
- Die Ausdehnung der unempfindlichen

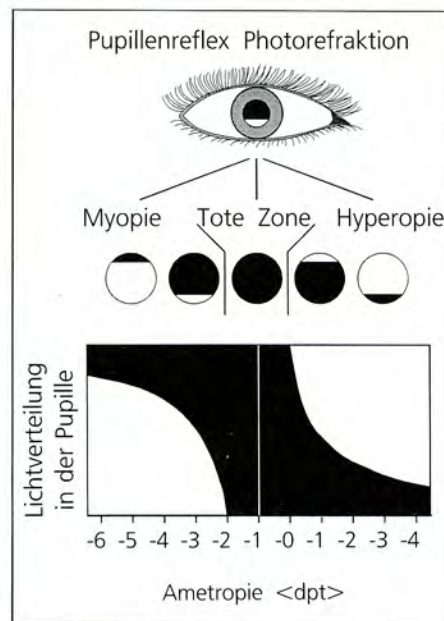


Abb. 7 Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Lichtreflexes in der Pupille von der Fehlsichtigkeit; die Breite der „toten Zone“ kann durch eine Veränderung der Exzentrizität des Blitzes je nach den Erfordernissen eingestellt werden



Astigmatismus

Beim Vorliegen eines regulären Astigmatismus sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Der Photorefraktor sieht nämlich nur die Fehlsichtigkeit in einem Meridian (siehe Abb. 8). Deshalb sind bei astigmatischen Augen stets zwei Photos in unterschiedlichen Kameraausrichtungen notwendig.

Sehr kompliziert wird es bei einem Astigmatismus mit schiefen Achsen. Als Konsequenz des schiefen Astigmatismus findet man verdrehte Halbmonde, deren Drehwinkel von der Art und Stärke des Astigmatismus abhängen. Eine detaillierte Untersuchung dieses Falles findet sich bei Wesemann et al. (1991).

Weiterentwicklungen des Photorefraktionsprinzips

Ein Nachteil des seit 1979 angewandten photographischen Verfahrens, der gerade für einen Screening-Test sehr hinderlich



Abb. 8a und 8b Bei einem Astigmatismus müssen immer mindestens zwei Aufnahmen gemacht werden, da vom Photorefraktor nur ein Meridian vermessen wird; bei diesem Prüfling ist das Auge im vertikalen Meridian nahezu emmetrop; in Abb. 8a (links) treten deshalb keine halbmondförmigen Reflexe auf; mit der um 90 Grad gedrehten Kamera (Abb. 8b) erkennt man eine Fehlsichtigkeit von -4 dpt im horizontalen Meridian

chen Zone ist eine Funktion der Exzentrizität des Blitzes und des Pupillendurchmessers.

Die Lage und Breite der toten Zone kann durch eine Variation von Kameraabstand und Exzentrizität verändert werden. Wird der Blitz zum Beispiel näher an die Linse herangeführt, so verringert man die Breite der toten Zone und steigert die Empfindlichkeit des Photorefraktors für kleine Ametropien.

ist, liegt in der Verwendung von normalem Dia-Filmmaterial. Nach der Aufnahme ist das Bild nicht sofort verfügbar. Der Film muß erst entwickelt werden und kann erst beurteilt werden, wenn der Prüfling bereits zu Hause ist. Wenn der Prüfling genau in dem Moment der Aufnahme geblinzelt hat, war die Untersuchung nutzlos. Deshalb ist in der zweiten Entwicklungsstufe versucht worden, das Prinzip der Photorefraktion zu modifizieren.



Abb. 9 Infrarot-Video-Photorefraktor nach Angi und Cocchiglia (1990); das System ist als kompakte Funktionseinheit aufgebaut; alle Teile – Kamera, Beleuchtung und Auswertecomputer – sind in der Art eines Autorefraktometers zusammengebaut und justierbar auf einem Tisch montiert; der Prüfling sitzt etwa 1,5 m vor dem Gerät; durch die Verwendung von Infrarotlicht erhält man nur ein Schwarzweißbild; dies ist aber für die Auswertung nicht hinderlich

Janette Atkinson von der Universität Cambridge, Howard Howland und Dr. Frank Schaeffel von der Cornell Universität und der Augenarzt Dr. Mario Angi von der Universität Padua bauten zum Beispiel Photorefraktometer auf der Basis einer infrarotempfindlichen Videoanlage (Abb. 9). Mit dieser Videotechnik können die Augen des Prüflings ständig auf dem Monitor überwacht werden. Man kann dynamische Akkommodationsänderungen an der Änderung der Größe des Lichtreflexes erkennen und abwarten, bis die Akkommodation maximal entspannt ist.

Die Videotechnik bietet einige zusätzliche Vorteile: So ist zur Zeit bereits eine halbautomatische Auswertung möglich, bei der ein Computer die Lage der Augen selbsttätig bestimmt und die Messung der Größe und Orientierung des Halbmondes unterstützt. Ein erstes vollautomatisches Auswerteverfahren wurde kürzlich vorgestellt.

Von Dr. Schaeffel stammt der Vorschlag, die Exzentrizität der Lichtquelle während der Untersuchung zu verändern (Schaeffel et al., 1987). Dazu verwandte er eine Reihe von IR-Leuchtdioden, die in unterschiedlichem Abstand zum Kameraobjektiv angebracht sind. Für jede dieser Exzentrizitäten erhält man einen unterschiedlich großen Reflex. Die mit verschiedenen Exzentrizitäten erzielten Aufnahmen werden in einem Zeitabstand von 1/50 Sek. aufgenommen und gespeichert. Mit dieser Vorgehensweise kann die Empfindlichkeit des Systems der Fehlsichtigkeit optimal angepaßt werden.



Abb. 10 Erster Prototyp eines Polaroid-Photorefraktors

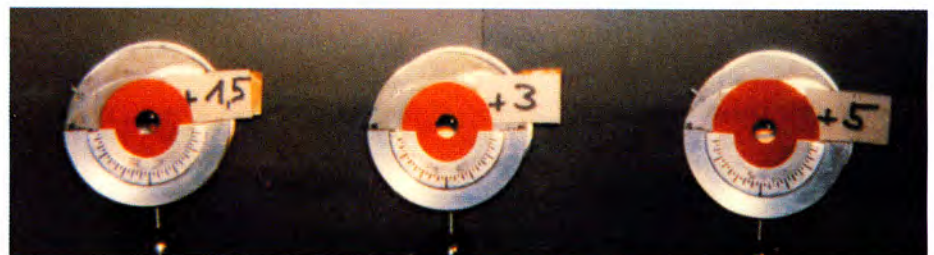


Abb. 11 Polaroid-Aufnahme von drei Modellaugen, die auf die angegebenen Fehlsichtigkeiten eingestellt waren; (bei dieser Aufnahme war der Blitz oben angeordnet; deshalb erscheinen die hypermetropen Reflexe im unteren Teil der Pupille)

Da die computergesteuerten Videogeräte aufwendig und teuer sind, haben Anthony Norcia vom Smith-Kettlewell Eye Research Institute und die beiden Autoren 1986 eine einfache Alternative gesucht. Wir haben eine normale Polaroid-Kamera umgebaut und den in der Kamera eingebauten Blitz durch ein Spiegelsystem näher an das Objektiv herangeführt (Abb. 10). Diese Kamera kann Refraktionsfehler im Sofortbildverfahren aufspüren. Abb. 11 zeigt drei Modellaugen, die auf unterschiedliche Fehlsichtigkeiten eingestellt waren.

Im Prinzip könnte man mit der Photorefraktion eine ganze Schulklasse auf einmal refraktionieren. In der Praxis ist dies aber derzeit noch nicht praktikabel, da der Abbildungsmaßstab jedes einzelnen Auges zu klein wird und das Auflösungsvermögen des verwendeten Filmmaterials nicht gut genug ist.

Kinderrefraktometer PR1100

Die Firma Topcon hat den Prototyp eines Kinderrefraktometers vorgestellt (Abb. 12), das in unserem Labor geprüft wurde. Dieses Gerät ist frei beweglich auf einem Tisch montiert. Der Prüfling sitzt in ca. 1,5 m Abstand. Mit den Steuerknüpfeln kann das Gerät auf das Auge ausgerichtet werden. Der gelbe Knopf dient zur Auslösung der Messung.

Das Verfahren von Topcon ist eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Technik. Im Unterschied zu den oben beschriebenen Verfahren wird im Kinderrefraktometer keine einzelne punktförmige Lichtquelle in einer fest vorgegebenen Exzentrizität verwendet, sondern eine ausgedehnte Flächenleuchtquelle. Diese Flächenleuchtquelle wirkt so, als würde das Photorefraktometer gleichzeitig mit sehr vielen Exzentrizitäten arbeiten. Das Reflexbild in der Pupille ergibt sich damit sozusagen



Abb. 12 Kinderrefraktometer PR1100

gen als eine Überlagerung unendlich vieler Halbmonde. Als Resultat erhält man einen stetigen Anstieg der Lichtintensität über die Pupille. Dieses Verhalten ist in Abb. 13 dargestellt. Bei einer starken Ametropie ändert sich die Helligkeit sehr stark und die Steigung der Geraden ist groß. Bei einer schwachen Ametropie ist die Steigung gering. Bei einem emmetropen Auge ist die Helligkeit über die gesamte Pupille konstant. Obwohl es sich bei dem geprüften Labormodell nur um einen Prototyp handelte, war die Funktionssicherheit hoch. Von 164 getesteten Augen konnten nur zwei nicht vermessen werden.

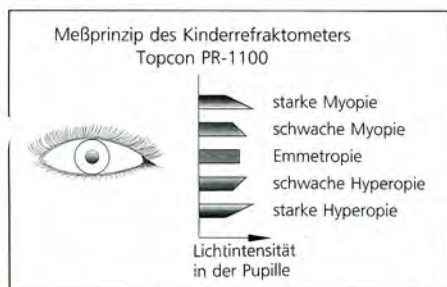


Abb. 13 Lichtverteilung in der Pupille beim Kinderrefraktometer PR1100; entscheidend ist nicht mehr die Größe eines Halbmondes, sondern die Steigung der Helligkeitsänderung über die Pupille

Diese kontinuierliche Lichtverteilung hat für eine computerisierte Auswertung einen großen Vorteil. Bei der herkömmlichen Technik besteht nämlich ein Problem darin, die Größe des Halbmondes exakt zu bestimmen. Dadurch können sich Meßfehler ergeben, die das Ergebnis verfälschen. Bei dem Kinderrefraktometer PR1100 ist es hingegen nicht mehr nötig, die Größe des Lichtreflexes auszumessen. Die Fehlsichtigkeit ergibt sich aus der Helligkeitsänderung, die durch eine Regressionsgerade auch bei ungünstigen Verhältnissen errechnet werden kann.

Meßgenauigkeit

Auf dem derzeitigen Entwicklungsstand ist die Meßgenauigkeit der Photorefraktometer noch deutlich schlechter als bei einem automatischen Augenrefraktometer (Rassow und Wesemann, 1987) oder bei der Skiaskopie (Littmann, 1949). Im Mittel ist bei schwachen Myopien mit einem Fehler von ca. $\pm 0,75$ dpt zu rechnen, bei stärkeren Ametropien noch mehr. Auch ist das Problem der Akkommodationsentspannung noch nicht hinrei-

chend gelöst, so daß insbesondere bei hypermetropen Prüflingen, die zumeist auf die Kamera akkommodieren, fehlerhafte Ergebnisse erzielt werden können.

Trotz des Meßfehlers in der Sphäre werden die Anisometropien aber meist recht zuverlässig erkannt.

In verschiedenen Laboratorien wird derzeit an der Weiterentwicklung dieses Verfahrens gearbeitet. Einerseits betrifft dies auf der technologischen Seite zum Beispiel die Verbesserung der vollautomatischen Auswertungsmethoden. Andererseits wird mit theoretisch-optischen Methoden versucht, die Einflüsse der Aberrationen des menschlichen Auges mit einzubeziehen (Hodgkinson et al., 1991; Bobier et al., 1992). Man kann davon ausgehen, daß es gelingt, die erreichbare Meßgenauigkeit weiter zu steigern. Die heute erreichbare Genauigkeit erscheint aber für einen Screening-Test schon fast ausreichend.

Zusammenfassung

1. Die Photorefraktion ist ein sehr einfach zu handhabendes objektives Refraktionsverfahren, mit dem man sowohl sphärische als auch astigmatische Fehlsichtigkeiten bestimmen kann.

2. Die derzeitige Meßgenauigkeit ohne Cycloplegie ist nur bei mittleren Myopien und Anisometropien recht gut. Hypermetropie, die auf die Kamera akkommodieren, werden ohne akkommodationslähmende Tropfen weniger gut erkannt, da bislang keine geeignete Methode zur Akkommodationsentspannung gefunden worden ist.

3. Im Gegensatz zu allen bisher bekannten objektiven Verfahren werden immer beide Augen gleichzeitig refraktiert. Dies ist besonders für die Früherkennung amblyopiegefährdeter Kinder wichtig.

Danksagung: Die Abbildungen 3, 4, 8 und 9 wurden uns von Herrn Dr. Angi überlassen, dem wir an dieser Stelle herzlich dafür danken.

Literaturhinweise

- M. R. Angi, A. Cocchiola: „Il videorefrattometro binoculare infrarosso: uno strumento per lo screening dei difetti ambliogenici e lo studio dinamico della capacità accomodativa“, Boll Oculist. 69, Suppl. 4, 305–320 (1990)
- W. R. Bobier, O. J. Braddick: „Eccentric photorefractive: optical analysis and empirical measures“, Am. J. Optom. Physiol. Opt. 62, 614–620 (1985)
- W. R. Bobier, A. Roorda, M. C. W. Campbell:

„Photorefractive equations for chromatic and spherical aberrations“, Invest. Ophthalmol. (ARVO Abstracts) Nr. 85, p. 709 (1992)

S. H. Day, A. M. Norcia: „Photographic detection of embryogenic factors“, Ophthalmology 93, 25–28 (1986)

S. H. Day, J. H. Kerr, R. R. Jayroe, J. C. White and M. Funke: „Retinal reflex photometry as a screening device for amblyopia and pre-amblyopic states in children“, South J. Med. 76, 309–312 (1983)

I. J. Hodgkinson, K. M. Chong, A. C. B. Molteno: „Photorefractive of the living eye: a model for linear knife edge photoscreening“, Applied Optics 30, 2263–2269 (1991)

H. C. Howland: „The optics of static photographic skiascopy“, Acta Ophthalmol. (Kbl) 58, 221–227 (1980)

H. C. Howland, B. Howland: „Photorefractive: a technique for study of refractive state at a distance“, J. Opt. Soc. Amer. 64, 240–249 (1974)

H. C. Howland, O. J. Braddick, J. Atkinson and B. Howland: „Optics of photorefractive: orthogonal and isotropic methods“, J. Opt. Soc. Amer. 73, 1701–1708 (1983)

H. C. Howland: „The optics of photoretinoscopy: results from ray tracing“, Am. J. Optom. Physiol. Opt. 62, 621–625 (1985)

H. C. Howland, N. Sayles, C. Cacciotti, M. Howland: „Simple pointspread retinoscope suitable for visual screening“, Am. J. Optom. Physiol. Opt. 64, 114–122 (1987)

C. Hsu-Winges, R. D. Hamer, A. M. Norcia, H. I. Wesemann, C. Chan: „Polaroid photorefractive screening of infants“, J. Pediatric Ophthalmology & Strabismus, 254–260 (1989)

K. Kaakinen: „A simple method for screening of children with strabismus, anisometropia or ametropia by simultaneous photography of the corneal and fundus reflexes“, Acta Ophthalmol. 57, 161–171 (1979)

K. Kaakinen: „Simultaneous two flash static photostereography“, Acta Ophthalmol. 59, 378–385 (1980)

K. Kaakinen: „Procedure and means for establishing and recording errors of the eye“, US patent # 4, 523, 820 (1985)

H. Littmann: „Foveale Praezisionsskiaskopie“, v. Graefe's Arch. Klin. Ophthalmol. 149 (1949)

A. C. B. Molteno, J. Hoare-Nairne, J. C. Parr, I. J. Hodgkinson, N. E. O'Brien and S. D. Watts: „The Otago Photoscreener, a method for the mass screening of infants to detect squint and refractive errors“, Trans. Ophthalm. Soc. N. Z. 35, 43–49 (1983)

A. M. Norcia, K. Zadnik and S. H. Day: „Photorefractive with a catadioptric lens“, Acta Ophthalmol. 64, 379–385 (1986)

B. Rassow, W. Wesemann: „Automatische Augenrefraktometer“, in B. Rassow (Ed.), Ophthalmologisch-optische Instrumente, Bücherei des Augenarztes, Band 111, Enke Verlag (1987)

F. Schaeffel, L. Farkas and H. C. Howland: „Infrared photoretinoscope“, Appl. Optics, 26, 1505–1509 (1987)

C. W. Tyler, A. M. Norcia: „Ray-tracing analysis of the optics of paraxial photorefractive“, Noninvasive Assessment of visual function, Technical digest, Opt. Soc. Am., Washington D. C., Wa3–1 (1985)

W. Wesemann, A. M. Norcia, D. Allen: „Theory of eccentric photorefractive (photoretinoscopy): astigmatic eyes“, J. Opt. Soc. Am. A 8, 2038–2047 (1991)