

Okular mit Kompensation der chromatischen Längsabweichung des Auges

Markus Seeßelberg*, Christian Lücke*, Peter Reimer**, Rudolf Tannert*

*Carl Zeiss AG, D-73446 Oberkochen

**Carl Zeiss Surgical GmbH, D-73446 Oberkochen

<mailto:seesselberg@zeiss.de>

Ein Okular wurde gebaut, welches die chromatische Längsabweichung (CHL) des Auges vorhält, so daß das Bild auf der Retina keine CHL aufweist. Mit diesem Okular erhält man im Vergleich zum Serienokular eine um bis zu 15% höhere polychromatische Kontrastübertragungsfunktion (MTF). Sechs Testpersonen konnten jedoch keine Veränderung des Bildeindrucks feststellen.

1 Einführung

Es ist bekannt, daß das menschliche Auge eine chromatische Längsabweichung

$$\text{CHL} = f_{\text{Auge}}(643\text{nm}) - f_{\text{Auge}}(435\text{nm})$$

aufweist; dabei ist $f_{\text{Auge}}(\lambda)$ die Brennweite des Auges im Glaskörper bei Wellenlänge λ . Akkomodiert das Auge beispielsweise auf $\lambda=550\text{nm}$, so liegen das blaue bzw. rote Teilbild vor bzw. hinter der Retina und ist damit leicht unscharf. Damit stellt sich die Frage: Liefert eine Optik mit Kompensation der CHL des Auges einen subjektiv „besseren“ Bildeindruck? Diese physiologische Fragestellung kann rechnerisch nicht beantwortet werden, sondern muß in einem experimentellen Aufbau entschieden werden.

Zur Klärung dieser Frage wurde ein Okular mit Brennweite $f=25\text{mm}$ ausgelegt und gebaut, welches die CHL des Auges kompensiert und im Folgenden als „CHL-korrigiertes Okular“ bezeichnet wird. Der Pupillendurchmesser beträgt 2.3mm und ist damit typisch für viele optische Geräte.

2 Modellaugen

Als Modellauge wurde das Emsley-Auge verwendet. Es besteht aus einer asphärischen Fläche mit der Pfeilhöhe [1]

$$z(h) = \frac{rh^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)r^2h^2}}$$

mit $p=1/(5.55\text{mm})$ sowie $\kappa=-0.562781$. Der Raum hinter dieser Asphäre bis zur Retina ist mit Wasser angefüllt. Es weist eine CHL von 0.43mm auf. Eine vergleichbare CHL weisen auch andere Modellaugen auf [2]. Inzwischen gibt es allerdings neuere Veröffentlichungen, nach denen die CHL des Auges etwas größer ist [3].

3 Polychromatische MTF des Serienokulars

Abbildung 1 zeigt den Linsenschnitt eines Serienokulars mit Emsley-Modellauge sowie die zugehörige polychromatische MTF auf der Achse. Zur Berechnung der polychromatischen MTF wurden für die Wellenlängen $\lambda=643\text{nm}$, 546nm , 480nm und 435nm die Gewichte 205, 673, 113 und 9 verwendet. Aufgrund der CHL des Auges liegt die polychromatische MTF im Bereich der mittleren Ortsfrequenzen bis zu 14% unterhalb der idealen MTF. In der Bildzone bei entsprechend gedrehtem Modellauge spaltet die MTF je nach Orientierung der Teststruktur etwas auf und liegt einige Prozent niedriger als die MTF-Kurve auf der Achse.

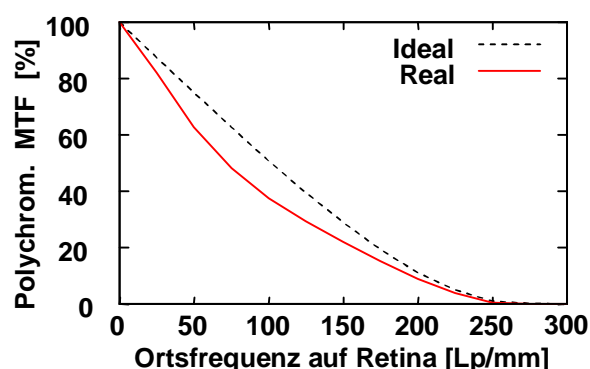
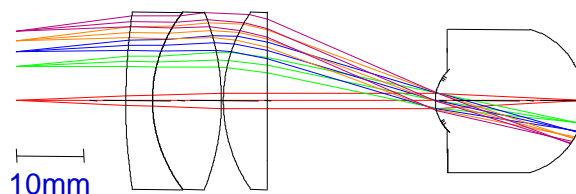


Abb. 1: Serienokular mit Emsley-Modellauge (oben) sowie zugehörige polychromatische MTF auf der Achse

4 Polychromatische MTF des CHL-korrigierten Okulars

Abbildung 2 zeigt den Linsenschnitt des CHL-korrigierten Okulars mit Emsley-Modellauge sowie die zugehörige polychromatische MTF auf der

Achse. Okular und Modellauge zusammen weisen keine CHL auf, so daß die polychromatische MTF ihren Idealwert erreicht. Bei entsprechend gedrehtem Modellauge nimmt die MTF in der Bildzone im Vergleich zur MTF auf der Achse wiederum um wenige Prozente ab (allerdings weniger als beim Serienokular).

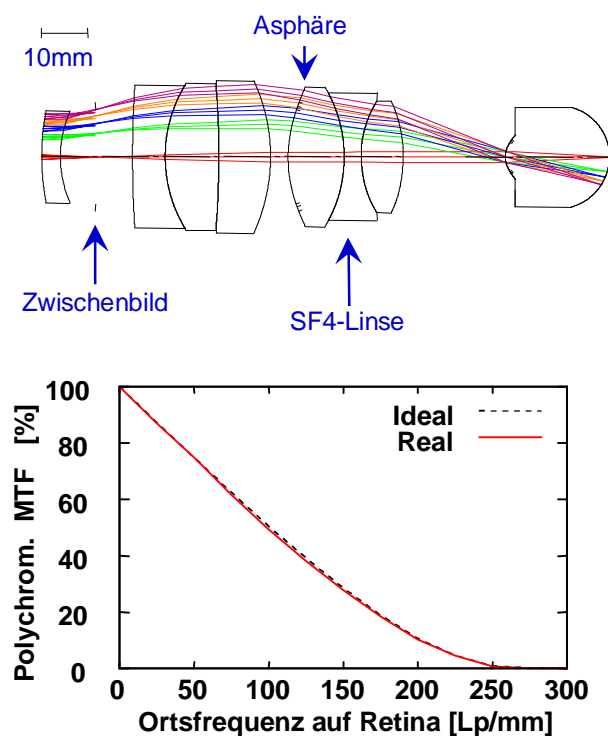


Abb. 2 : CHL-korrigiertes Okular mit Emsley-Modellauge (oben) sowie zugehörige polychromatische MTF auf der Achse.

Abbildung 2 zeigt, daß das Optikdesign des CHL-korrigierten Okulars sehr aufwendig ist. Zur Kompensation der CHL des Auges muß die CHL des Okulars selbst überkompensiert werden. Diese Überkompensation erfordert Kittflächen mit möglichst großem Bündelquerschnitt und erfolgt an der SF4-Linse im hinteren Dreierkittglied, die eine hohe Brechkraft aufweist. Daraus resultiert eine starke chromatische Vergrößerungsdifferenz sowie Astigmatismus, was im vorderen Dreierkittglied korrigiert wird. Zur weiteren Korrektur von Astigmatismus und Verzeichnung dient eine Asphäre. Die Negativlinse vor dem Zwischenbild sorgt für einen komfortablen Abstand der Augenpupille vom letzten Linsenscheitel des Okulars.

5 Prüfaufbau

Das CHL-korrigierte Okular ist vom Huygens-Typ, d.h. vor dem Zwischenbild befindet sich eine Linse. Daher kann das Okular nicht getestet werden, indem ein reales Objekt in der Zwischenbildebene betrachtet wird, sondern es muß ein reales Luftbild betrachtet werden. Dieses Luftbild wurde mit einem Contax-Fotoobjektiv 1:1.7/50mm erzeugt. Als

Testobjekt wurde ein weiß beleuchteter Auflösungsstest in 60cm Entfernung vor der Frontlinse des Fotoobjektivs verwendet. Damit Pupillendurchmesser und Pupillenlage des Luftbildes zum Okular passen, wurde dicht vor der Frontlinse eine zusätzliche Blende mit einem Durchmesser von 5mm angebracht. Die relativ kleine im Luftbild noch vorhandene CHL wurde mit einem NBK7-Glasblock der geometrischen Länge 36mm korrigiert.

6 Bewertung des subjektiven Bildeindrucks

Sechs Testpersonen blickten durch den in Abschnitt 5 beschriebenen Prüfaufbau. Fünf Testpersonen stellten weder eine Verbesserung noch eine Verschlechterung des subjektiven Bildeindrucks fest. Eine Testperson empfand das Bild des Serienokulars (!) als geringfügig kontrastreicher. Auf Tests mit einer größeren Zahl von Testpersonen wurde verzichtet, weil ein entsprechendes Okular sich nur dann sinnvoll vermarkten ließe, wenn die überwiegende Mehrzahl von Beobachtern einen Nutzen hat.

7 Fazit

Aufgrund der CHL des Auges liegt die polychromatische MTF beim Blick durch das Serienokular um bis zu 14% unterhalb der Idealwerte. Die CHL des Auges läßt sich im Okular kompensieren, was jedoch wesentlich mehr Linsen erfordert. Die polychromatische MTF auf der Retina erreicht so die Idealwerte. Die auf diese Weise verbesserte polychromatische MTF auf der Retina führte jedoch nicht zu einem verbesserten Bildeindruck.

Diese Beobachtung kann folgendermaßen erklärt werden [4]. Im Bereich der Fovea und damit im Bereich des schärfsten Sehens auf der Netzhaut gibt es meist nur wenige blau-sensitive Zapfen. Daher spielt lediglich die CHL zwischen rotem und grünem Licht eine Rolle, die aber wesentlich geringer ist als die zwischen rotem und blauem Licht. Außerdem hat ein reales Auge auf der Achse monochromatische Restfehler höherer Ordnung, so daß die CHL auf der Retina möglicherweise gar nicht begrenzend für das Bildempfinden ist.

Literatur

- [1] Larry N. Thibos et al: "The chromatic eye: a reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans". *Applied Optics* **31** (1992) 3594-3600.
- [2] Datensätze oraeye01, oraeye02 der Optikdesign-Software Code-V®
- [3] D. A. Atchison, G. Smith: „Chromatic dispersions of the ocular media of human eyes“. *J. Opt. Soc. Am. A.* **22** (2005) 29-37.
- [4] F. Schaeffel: „Chromatische Aberration (CA), Sehschärfe und Fehlsichtigkeitsentwicklung“, Vortrag H3 auf der 105. DGaO-Jahrestagung (2004)