



Priv.-Doz. Dr. W. Wesemann,  
Köln

## Die Grenzen der Sehschärfe, Teil 2:

### Einfluss von Pupillengröße und Beugung

**Wie hoch die Sehschärfe ist, die ein Mensch erreichen kann, hängt von vielen Faktoren ab. Im Folgenden wird der Einfluss der Pupillengröße beschrieben. An Beispielen wird gezeigt, dass bei sehr kleinen Pupillengrößen infolge der Lichtbeugung nur eine geringe Sehschärfe möglich ist.**

#### Einleitung: Die Wellen- und Teilchennatur des Lichts

Für die Lösung der meisten augenoptischen Probleme reicht die geometrische Optik vollkommen aus. Bei dieser Näherung wird das Licht durch **Lichtstrahlen** beschrieben.

Manchmal macht sich aber auch die Wellen- und Teilchennatur des Lichts bemerkbar.

Die **Wellennatur** des Lichts wurde bereits vor 230 Jahren von Christian Huygens (1678) erkannt. Das von ihm formulierte „Huygenssche Prinzip“ begründete die Gesetze der Lichtreflexion und -brechung. 125 Jahre später bewies Thomas Young die Wellennatur des Lichts im Experiment (1802) und erklärte die Newtonschen Ringe. Augustin Jean Fresnel lieferte eine exakte mathematische Theorie der Interferenz- und Beugungsphänomene (1815) und versuchte als erster, die Wellenlänge des Lichts zu messen. Infolge der Wellennatur wird Licht beim Durchgang durch einen Spalt oder eine Blende von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt und dringt auch in den eigentlich nicht beleuchteten Schattenraum vor. Durch die Interferenz können sich Lichtwellen gegenseitig auslöschen.

Die **Teilchennatur** des Lichts folgt aus experimentellen Beobachtungen zur Lichtabsorption und -emission. Ein Teilchenmodell wurde von Isaac Newton, einem Zeitgenossen von Huygens, um 1675 vorgeschlagen. Man sagt ihm nach, er habe seine „Emanations- oder Korpuskeltheorie“ nur aus reiner Böswilligkeit gegen Huygens entwickelt. Newton's Vorstellungen mussten aber zunächst der Wellenmechanik weichen, denn Fresnel konnte beweisen, dass die Annahme der wellenförmigen Natur des Lichts ausreicht, um alle damals beobachtbaren Erscheinungen des

Lichts in allen Einzelheiten zu erklären. Erst Albert Einstein ließ die Teilchenvorstellung 1905 wieder auferstehen. Er erkannte aus Experimenten zum photoelektrischen Effekt, dass Licht aus vielen einzelnen „lokalisierten Energiequanten“ besteht. Diese „Lichtquanten“ werden seit 1926 meist mit dem Wort „Photonen“ bezeichnet.

Auch den besten Naturwissenschaftlern ist bis heute nicht klar, wie man sich anschaulich vorstellen kann, dass das Licht gleichzeitig Wellen- und Teilcheneigenschaften besitzt, denn eigentlich sind diese zwei Vorstellungen prinzipiell unvereinbar. So bleibt auch den klügsten Köpfen nichts anderes übrig, als sich mit dem eigentlich unverständlichen „Welle-Teilchen-Dualismus“ abzufinden und je nach Anwendungsfall das eine oder das andere Modell heranzuziehen.

Im Folgenden werden grundlegende Beschränkungen der Sehschärfe des menschlichen Auges durch die Wellennatur des Lichts erläutert. Diese Beschränkungen kommen bei sehr kleinen Pupillendurchmessern besonders deutlich zum Tragen.

#### Beugung an der Kreisblende

Am einfachsten ist die Beschreibung des Beugungsbildes in einem großen Abstand hinter einer beugenden Öffnung. Dies nennt man die Fraunhofersche Beugungsnäherung. Das gleiche Beugungsbild findet man auch in der Bildebene einer fehlerfreien Linse, denn die Linse verschiebt das Fraunhofersche Beugungsbild in diese Ebene.

Wesentlich komplizierter ist die Berechnung von Beugungsbildern kurz hinter einem beugenden Hindernis. Diesen Bereich, der hier nicht betrachtet wird, nennt man die Fresnel-Kirchhoffsche Beugungsnäherung.

Nimmt man für die folgenden Betrachtungen an, dass ein paralleles Lichtbündel senkrecht auf das Auge oder auf eine kreisförmige Blende fällt, so entsteht auf der Netzhaut bzw. hinter der Blende ein kreisförmiges, unscharfes Beugungsbild, das von einem Ringsystem umgeben ist. Abb. 1 zeigt die Lichtamplitudenverteilung als Funktion des Ortes.

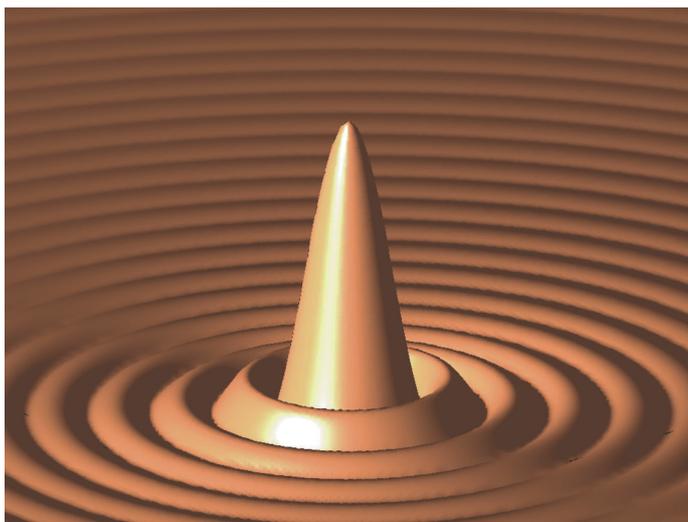


Abb. 1: Lichtverteilung hinter einer beugenden Kreisblende. Das zentrale Maximum ist von zahllosen Ringen umgeben, deren Intensität nach außen abnimmt. Diese Beugungsringe findet man auch im Punktbild einer fehlerfreien Abbildung. Um die Ringe deutlicher hervorzuheben, wurde in der Abbildung nicht die Lichtintensität, sondern die Lichtamplitude dargestellt ( $I = A^2$ ).

Der zentrale Lichtfleck des Beugungsbildes enthält insgesamt 84% der gesamten Lichtmenge und wird als „Airy-Scheibchen“ bezeichnet (nach Sir George Biddell Airy, 1801–1892). 16 Prozent des Lichts entfallen auf alle Beugungsringe. Für die weiteren Betrachtungen ist der Winkel, unter dem das erste Beugungsminimum auftritt, besonders wichtig. Auf das Auge bezogen, beschreibt dieser Winkelabstand  $\beta_{1,\text{Min}}$  den Sehwinkel zwischen dem zentralen Lichtmaximum und dem ersten dunklen Beugungsring (Abb.1). Man kann diesen Winkel  $\beta_{1,\text{Min}}$  mit der Formel

$$(1) \quad \beta_{1,\text{Min}} = 1,22 \arcsin \left( \frac{\lambda}{D} \right)$$

berechnen.  $\lambda$  bezeichnet die Wellenlänge des Lichts und  $D$  den Durchmesser der Blende. Diese Formel und auch die folgenden Formeln werden in dieser Arbeit nicht weiter hergeleitet, sondern als gegeben angenommen.

Wenn man Vorgänge im Auge beschreiben will, muss für  $D$  der Durchmesser der Augenpupille eingesetzt werden. Bei einer Kreisblende ist der Winkel, unter dem das erste Minimum erscheint, um den Faktor 1,22 größer als bei der Beugung an einem Spalt. Außerdem ist der Abstand der Beugungsminima und -maxima bei der Kreisblende nicht konstant, sondern er nimmt von innen nach außen langsam ab.

Wenn das Linsensystem zusätzliche geometrisch-optische Abbildungsfehler (Aberrationen) aufweist, ist das zentrale Airy-Scheibchen etwas dunkler als bei einer fehlerfreien Linse. Infolge der Aberrationen fließt Lichtenergie in die Nebenminima und -maxima. Die ausgeprägte Ringstruktur verschwindet.

## Auflösungsvermögen, Rayleigh-Kriterium und Zweipunktvisus

Zur Beschreibung der Abbildungsqualität eines optischen Systems kann man verschiedene Maße verwenden. Die klassische Beschreibungsgröße ist das Auflösungsvermögen.

Das Auflösungsvermögen eines Fernrohrs wird in der Astronomie traditionell für zwei Lichtpunkte (Sterne) auf schwarzem Grund bestimmt. Es gibt den kleinsten Winkelabstand an, unter dem die zwei Lichtpunkte gerade noch optisch getrennt werden können. Dieses Auflösungsvermögen kann man auch als „Zweipunktauflösungsvermögen“ bezeichnen.

Infolge von Abbildungsfehlern und Beugung werden punktförmige Objekte nie ideal punktförmig sondern immer mehr oder weniger „verschmiert“ abgebildet. Die mathematische Darstellung dieses verschmierten Punktbildes nennt man Verwaschungsfunktion. Bei einer fehlerfreien Linse mit kreisförmiger Blende ist die Verwaschungsfunktion das oben beschriebene Beugungsscheibchen.

Wenn man zwei Lichtpunkte mit einem optischen System abbildet, bei dem die Blende immer mehr zugezogen wird, so werden die Beugungsscheibchen immer größer. Die Lichtintensitäten überlagern sich. Wenn sie sich zu stark überlagern, verschmelzen die unscharfen Punktbilder zu einem einzigen diffusen Fleck und können optisch nicht mehr getrennt werden (Abb. 2).

In der klassischen Optik hat sich ein Kriterium eingebürgert, mit dessen Hilfe man ausrechnen kann, ob zwei nahe beieinander stehende Sterne am Himmel noch aufgelöst werden können. Dieses Kriterium wurde nach dem englischen Naturforscher Lord John William Rayleigh (1842-1919) benannt. Es lautet:

### Rayleigh-Kriterium:

Zwei punktförmige, gleich helle Objekte können gerade noch aufgelöst werden, wenn das Lichtmaximum des einen Punktbildes in das erste Beugungsminimum des anderen fällt.

Anders ausgedrückt besagt das Rayleigh-Kriterium, dass bei fehlerfreier Abbildung zwei Lichtpunkte nur dann optisch getrennt werden können, wenn der Winkelabstand  $\alpha_{\text{Rayleigh}}$ , unter dem sie erscheinen, mindestens so groß ist wie der Radius des zentralen Beugungsscheibchens (Airy-Scheibchens). Das Rayleigh-Kriterium fordert also einen Winkelabstand von mindestens

$$(2) \quad \alpha_{\text{Rayleigh}} \geq \beta_{1,\text{Min}} = 1,22 \arcsin \left( \frac{\lambda}{D} \right)$$

Eine anschauliche Darstellung des Rayleigh-Kriterium liefert Abb. 2. Sie zeigt die Lichtverteilung, die ein fehlerfreies Abbildungssystem von zwei hellen Objektpunkten erzeugt. Auf der linken Seite sieht man quasi die „photographierte“ Lichtverteilung. Rechts ist die Lichtverteilung perspektivisch dargestellt.

Für die graphischen Darstellungen wurde der Abstand der beiden Lichtpunkte konstant gehalten und der Durchmesser der Blende verkleinert. Das entspricht einer Situation, in der das Auge zwei Lichtpunkte, die einen konstanten Winkelabstand  $\alpha$  aufweisen, mit drei verschiedenen großen Pupillendurchmessern betrachtet.

In der obersten Reihe in Abb. 2 werden die zwei Punkte offensichtlich noch gut aufgelöst. Das Rayleigh-Kriterium ist erfüllt. Die Überlagerung der beiden Beugungsbilder ergibt zwei leicht zu erkennende Lichtmaxima. In der zweiten Reihe ist der Grenzwert nach dem Rayleigh-Kriterium dargestellt. Beide Maxima sind noch durch eine Einsattelung getrennt. In der Abbildung können die zwei Punkte eindeutig identifiziert werden. Im untersten Bild ist das Rayleigh-Kriterium nicht mehr erfüllt. Beide Punkte sind miteinander verschmolzen. Die Tatsache, dass es sich ursprünglich um zwei Objekte handelte, könnte man aber eventuell noch anhand der asymmetrischen Form des diffusen Flecks erahnen.

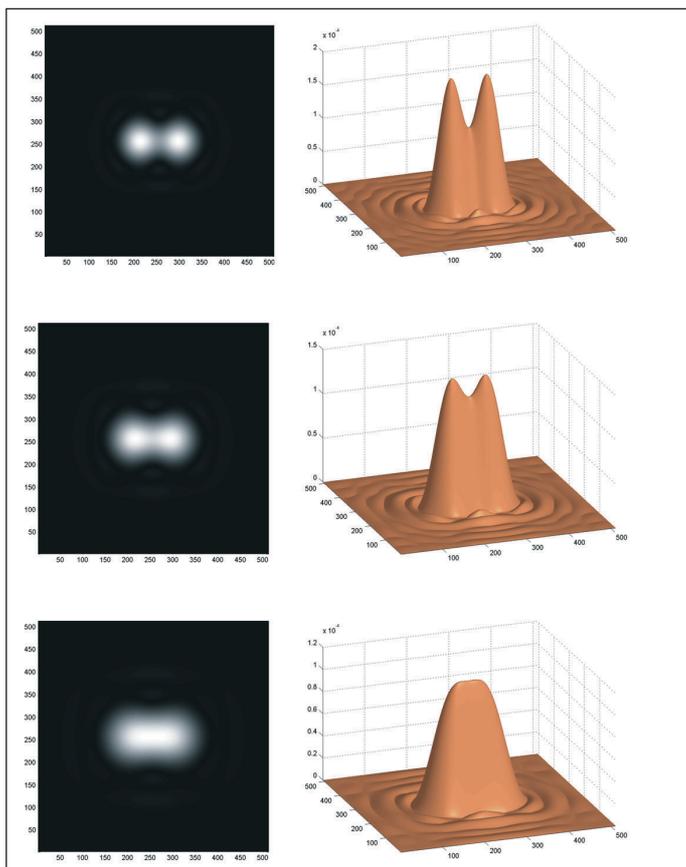


Abb. 2: Anschauliche Darstellung der Abbildung von zwei Lichtpunkten durch ein fehlerfreies Linsensystem. Linke Spalte: Intensitätsverteilung. Rechte Spalte: Perspektivische Darstellung der Intensitätsverteilung. Für die Berechnungen wurde der Abstand der beiden Lichtpunkte konstant gehalten und der Durchmesser der Blende verkleinert. Oberste Reihe: Der Blendendurchmesser ist groß. Die zwei Punkte werden gut aufgelöst. Das Rayleigh-Kriterium ist erfüllt. Zweite Reihe: Grenzwert nach Rayleigh-Kriterium. Beide Maxima sind noch durch eine Einsattelung, in der die Intensität auf 84 Prozent zurückgeht, getrennt. Untere Reihe: Rayleigh-Kriterium ist nicht mehr erfüllt. Beide Punkte sind miteinander verschmolzen.

### Das Dawes-Kriterium

Anhand Abbildung 2 wird deutlich, dass das Rayleigh-Kriterium nicht sehr streng ist, denn die Einsattelung zwischen den zwei Punkten ist am Grenzwert  $\alpha_{\text{Rayleigh}}$  noch relativ tief (Abb. 2, 2. Reihe). Es ist vorstellbar, dass das menschliche Auge auch eine Einsattelung bemerken kann, die weniger tief ist. Ein wesentlich schärferes Kriterium ist das sogenannte „Dawes-Kriterium“. Es besagt, dass es selbst dann noch eine kleine Einsattelung gibt, wenn die zwei Punkte um den Faktor 1,22 näher beieinander sind als beim Rayleigh-Kriterium.

$$(3) \quad \alpha_{\text{Dawes}} \geq \arcsin \left( \frac{\lambda}{D} \right)$$

Wenn zwei Lichtpunkte unter diesem Winkel  $\alpha_{\text{Dawes}}$  dargeboten werden, beträgt die Einsattelung in der Mitte zwischen den zwei Maxima nur noch 1,73 Prozent. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich die Helligkeitsmaxima nicht mehr dort

finden, wo sie nach der geometrischen Optik eigentlich sein müssten. Durch die Überlagerung der Lichtintensitäten der beiden Beugungsbilder verringert sich der Abstand der Lichtmaxima auf 65 Prozent ihres nach den Gesetzen der geometrischen Optik zu erwartenden Abstandes.

### Rayleigh- und Dawes-Kriterium liefern Schätzwerte für den Zweipunktvisus des Auges

Da zwei Punkte, die infolge der Lichtbeugung optisch nicht mehr aufgelöst werden, prinzipiell auch nicht mehr subjektiv als solche wahrgenommen werden können, lässt sich aus dem Rayleigh-Kriterium ein Schätzwert für die Sehschärfe ausrechnen, die man bei dieser Sehaufgabe erreichen kann. Zu diesem Zweck berechne ich den Kehrwert des Punktabstandes an der Auflösungsgrenze und bezeichne diesen Wert mit dem Wort „Zweipunktvisus“. Dieser Wert hängt bei einem fehlerfreien Abbildungssystem ausschließlich von der Wellenlänge und dem Pupillendurchmesser ab.

Dazu ein paar Zahlenbeispiele: Angenommen wird eine Wellenlänge von  $\lambda = 550 \text{ nm}$  und ein Pupillendurchmesser, dessen Wert in der ersten Spalte der Tabelle 1 angegeben ist.

In der zweiten Spalte steht das nach Formel 2 berechnete Auflösungsvermögen. In der dritten Spalte steht der Zweipunktvisus nach Rayleigh. In der vierten Spalte ist der Zweipunktvisus nach Dawes-Kriterium eingetragen.

Die in Spalte 3 und 4 eingetragenen Visuswerte sind sinnvolle theoretische Vorhersagen, die man aus dem Rayleigh- und dem Dawes-Kriterium für das menschliche Auge ableiten kann. Sie sind Schätzwerte für den Zweipunktvisus, den ein Mensch bei einer bestimmten Pupillengröße erreichen kann. Dies gilt aber nur, wenn

- a) die Optik des Auges keine nennenswerten Abbildungsfehler aufweist,
- b) die Photorezeptoren der Fovea hinreichend nahe beieinander liegen und
- c) die Kontrastempfindlichkeit des Auges so gut ist, dass die kleine Eindellung in der Lichtverteilung des Beugungsbildes auch wahrgenommen wird.

Aus der Tabelle kann man ablesen, dass das Auflösungsvermögen, das vom Rayleigh-Kriterium vorhergesagt wird, bei sehr

Pupillendurchmesser D (mm)	Auflösungsvermögen nach Rayleigh-Kriterium $\beta_{1.\text{Min}}$ (Minuten)	„Zweipunktvisus“ nach Rayleigh-Kriterium $V_z = 1/\beta_{1.\text{Min}}$	„Zweipunktvisus“ nach Dawes-Kriterium $V_z = 1,22/\beta_{1.\text{Min}}$
0,50	4,61'	0,22	0,26
1,00	2,31'	0,43	0,53
2,00	1,15'	0,87	1,06
4,00	0,58'	1,73	2,12
6,00	0,38'	2,60	3,17

Tabelle 1: Auflösungsvermögen und Zweipunktvisus nach Rayleigh- und Dawes-Kriterium

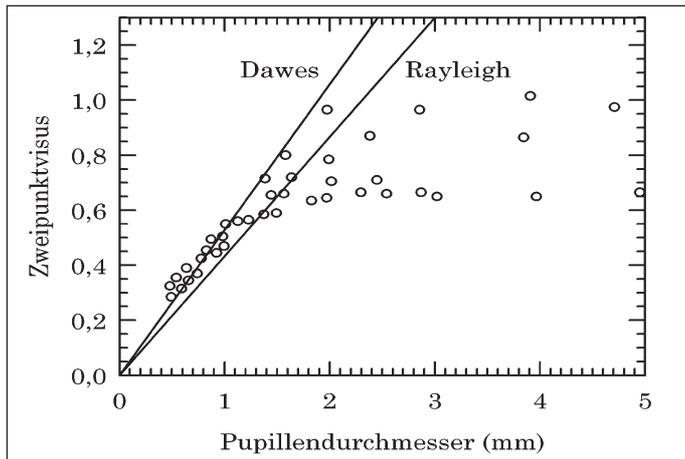


Abb. 3: Zweipunktvisus als Funktion der Pupillengröße. Die ansteigenden Linien zeigen die Vorhersagen nach Rayleigh- bzw. Dawes-Kriterium an. (Umgerechnet und neu gezeichnet nach Freeman, 1990)

kleinen Pupillendurchmessern äußerst schlecht ist. Bei einer Pupillengröße von 2 mm müssen die zwei Punkte mindestens 2,3 Winkelminuten von einander entfernt sein. Der als Kehrwert dieses Abstandes errechnete „Zweipunktvisus“ beträgt nur 0,87.

Das Ergebnis einer wissenschaftlichen Untersuchung hat Freeman in seinem Lehrbuch „Optics“ abgebildet. Leider ist dort das Zweipunktauflösungsvermögen in der sehr unüblichen Maßeinheit „Milliradian“ aufgetragen, so dass man sich die Ergebnisse nicht anschaulich vorstellen kann. Deshalb habe ich die Ergebnisse von Freeman in den „Zweipunktvisus“ umgerechnet und 3 dargestellt.

Man erkennt, dass die von Freeman gemessenen Visuswerte bis zu einem Pupillendurchmesser von 1,5 mm oberhalb der ansteigenden Geraden liegen, die die Vorhersage nach Rayleigh-Kriterium wiedergibt. Diese Messpunkte werden etwas besser vom Dawes-Kriterium beschrieben. Für die Beschreibung der Trennschärfe des menschlichen Auges ist das Rayleigh-Kriterium anscheinend ungenauer, denn dem Auge reicht offenbar eine Einsattelung zwischen den beiden Beugungsmaxima (Abb. 2) von weniger als 16 Prozent zur richtigen Identifizierung der zwei Punkte aus.

Bei Pupillendurchmessern >1,5 mm steigen die gemessenen Datenpunkte nicht mehr parallel zu den zwei ansteigenden Geraden weiter, sondern knicken nach unten ab. In diesem Bereich ist der tatsächlich erreichbare Visus deutlich kleiner als nach der Beugungstheorie möglich. Als Ursache kommen Abbildungsfehler, eine zu geringe Packungsdichte der foveolaren Zapfen oder die Unfähigkeit des visuellen Systems, die zwei kontrastarmen Punkte zu trennen, in Frage. Die Messpunkte nähern sich einem oberen Grenzwert, der bei den Versuchspersonen von Freeman zwischen Visus 0,7 und 1,0 lag.

## Gittervisus und Modulationsübertragungsfunktion

Zur Beschreibung der Abbildungsqualität eines optischen Systems wird in der modernen Optik die Modulationsübertragungsfunktion bevorzugt. Diese Funktion beschreibt, mit welchem Kontrastverlust Gittermuster mit sinusförmigem Intensitätsprofil und unterschiedlicher Ortsfrequenz abgebildet werden. Außerdem ergibt sich aus der Modulationsübertra-

gungsfunktion eine Grenzfrequenz  $R_g$ , oberhalb derer ein Gitter prinzipiell nicht mehr abgebildet werden kann. Die Grenzfrequenz ergibt sich bei einem optischen System mit dem Blendendurchmesser  $D$  aus der Formel

$$(4) \quad R_g = \frac{1}{\arctan\left(\frac{\lambda}{D}\right)}$$

$R_g$  hängt bei einer fehlerfreien Abbildung ebenfalls ausschließlich von der Pupillengröße und der Wellenlänge des Lichts ab. Bei einer Anwendung auf das menschliche Auge mit dem Pupillendurchmesser  $D$  kann aus der Grenzfrequenz  $R_g$  ein Wert für den „maximal möglichen Gittervisus“ über die Formel

$$(5) \quad \text{Grenzvisus} = R_g \text{ (Linien/Grad)} / 30$$

berechnet werden. Diesen Visus bezeichne ich als Grenzvisus, da er selbst bei einem vollkommen perfektem Auge prinzipiell nicht überschritten werden kann. Tabelle 2 gibt einige Beispiele für die Grenzfrequenz und den Grenzvisus für rotes Licht ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ).

Aus Tabelle 2 kann man ablesen, dass nach der Beugungstheorie bei sehr großen Pupillen ein sehr hoher Gittervisus möglich ist. So ergibt sich bei 6 mm Pupillendurchmesser ein maximal denkbarer Visus von 5,5. Solche extrem hohen Werte werden in der Praxis bekanntlich nicht erreicht, weil der Abstand der Photorezeptoren in der Netzhaut nicht klein genug und die Abbildungsqualität nicht gut genug ist.

Pupillendurchmesser D (mm)	Grenzfrequenz $R_g$ der Modulationsübertragungsfunktion (Linien/Grad)	Maximal möglicher Gittervisus (Grenzvisus) $V_g=R_g/30$
0,50	13,8	0,46
1,00	27,6	0,92
2,00	55,2	1,84
4,00	110	3,68
6,00	164	5,52

Tabelle 2: Vorhersagen für den maximal möglichen Gittervisus aus der Modulationsübertragungsfunktion

Ein Beispiel für den tatsächlichen Zusammenhang zwischen Gittervisus und Pupillengröße ist in Abbildung 4 wiedergegeben (Wesemann, 1983). In dieser experimentellen Untersuchung wurden rote Gittermuster mit sinusförmigem Intensitätsprofil verwendet. Die Gittermuster wurden in drei unterschiedlichen Orientierungen dargeboten. Die Liniendichte wurde zur Visusbestimmung kontinuierlich verändert. Zum Vergleich sind außerdem die oben angegebenen theoretischen Vorhersagen als ansteigende Geraden eingetragen.

In Abbildung 4 erkennt man, dass der Grenzvisus in der Praxis nicht erreicht wird. Alle Messpunkte liegen unterhalb dieser Geraden. Der gemessene Gittervisus ist aber bis zu einer Pupillengröße von 2 mm deutlich besser als nach dem Rayleigh- oder dem Dawes-Kriterium zu erwarten. Interessant ist auch die Tatsache, dass bei diesem Versuch unterschiedliche Ergebnisse herauskamen, wenn die Orientierung der Gitter geändert wurde. Dies kann zum Teil auf einen geringen unkorrigierten Restastigmatismus zurückgeführt werden. Man beachte aber, dass die senkrechten und waagerechten Linien besser gesehen wurden als die unter 45° geneigten Gitter. Dies kommt bei einer Bildunschärfe durch einen regulären Astigmatismus niemals vor. Deshalb ist die richtige Erklärung wahrscheinlich der in der physiologischen Optik bekannte „Oblique-Effekt“ (Mitchell et al., 1967;

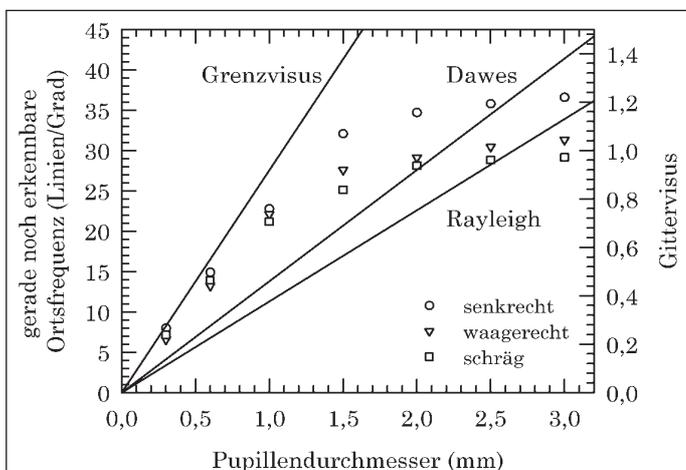


Abb. 4: Gittervisus als Funktion der Pupillengröße ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ). Die unterschiedlichen Symbole geben die Ergebnisse für unterschiedliche Orientierungen an. Die ansteigenden durchgezogenen Linien sind die Vorhersagen der drei im Text beschriebenen Kriterien (nach Wesemann, 1983).

Mayer, 1983). Mit diesem Namen bezeichnet man die Tatsache, dass die schrägen Orientierungen vom neuronalen Teil des visuellen System generell etwas schlechter erkannt werden als die horizontalen und vertikalen.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde dargelegt, dass die erreichbare Sehschärfe bei sehr kleinen Aperturdurchmessern hauptsächlich durch die Beugung des Lichts begrenzt wird. Wie die Experimente gezeigt haben, bekommt man mit einem Zweipunktvisustest und mit Gittermustern nicht die gleichen Visusergebnisse; in beiden Fällen steigt die Sehschärfe bei sehr kleinen Pupillen aber proportional zum Pupillendurchmesser an. Diese Beugungsbegrenzung der Sehschärfe ist prinzipieller Natur und folgt aus der Einschnürung des Lichtbündels. Diese Beschränkung der Abbildungsqualität gilt auch für eine vollkommen fehlerfreie Linse.

Die klassische Optik kennzeichnet das beugungsbegrenzte Auflösungsvermögen durch das Rayleigh-Kriterium. Wenn zwei Lichtpunkte so nahe beieinander stehen, wie vom Rayleigh-Kriterium erlaubt, so ergibt sich im Abbild der zwei Punkte eine Lichtverteilung mit zwei Lichtmaxima, die durch eine Einsattelung um 16 Prozent getrennt sind. Etwas schärfer ist das Dawes-Kriterium. Bei diesem Kriterium beträgt die Einsattelung zwischen den beiden Maxima nur noch 1,7 Prozent.

Der experimentell bestimmte Zweipunktvisus nach Freeman wird bei kleinen Pupillendurchmessern durch das Dawes-Kriterium besser beschrieben als durch das Rayleigh-Kriterium. Oberhalb von 1,5 mm ist der tatsächliche Visus aber immer schlechter als er nach der Beugungstheorie sein könnte.

Der Gittervisus lässt sich nicht durch das Rayleigh- oder das Dawes-Kriterium vorhersagen. Er ist bis zu einer Pupillengröße von 2 mm deutlich besser als nach den klassischen Kriterien erwartet. Der Gittervisus ist aber stets kleiner als der Grenzvisus, den man aus der Modulationsübertragungsfunktion berechnen kann.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass eine Mindestpupillengröße von etwa 2 mm nötig ist, um einen Zweipunktvisus von 1,0 oder mehr zu erreichen.

Die Tatsache, dass mit einer sehr kleinen Apertur nur eine schlechte Sehschärfe erzielt wird, behindert auch die Entwicklung bifokaler Kontaktlinsen vom simultanen Typ. Diese Linsen haben meist in einem kleinen kreisförmigen Zentrum und in einer ringförmigen Umgebung unterschiedliche brechende Wirkungen. Der Visus der durch eine solche enge Zone möglich ist, lässt sich analog zu den obigen Betrachtungen abschätzen.

(wird fortgesetzt)

**Autor: Priv.-Doz. Dr. W.Wesemann,  
Höhere Fachschule für Augenoptik Köln,  
Bayenthalgürtel 6-8, 50968 Köln**

### Literatur:

- [1] Freeman, M.H.: Optics. Butterworths, 10th Ed., 1990, Abb. 15.5.
- [2] Wesemann, W.: Zur Funktionsprüfung der zentralen Retina bei Trübungen des menschlichen Auges. Dissertation Universität Hamburg, 1983.
- [3] Mitchell, D.E.; Freeman, R.D.; Westheimer, G.: Effect of orientation on the modulation sensitivity for interference fringes on the retina. J.Opt.Soc.Am. 57, 246-249, 1967.
- [4] Mayer, M.J.: Practice improves adults sensitivity to diagonals. Vision Res. 23, 547-550, 1983.