

Optische Untersuchungen an der Cornea der Mehlmotte *Ephesia kühniella*

Klaus Vogt

Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen

Eingegangen am 6. August 1973

Interferometric Investigations on the Cornea of the Meal Moth *Ephesia kühniella*

Summary. The optical properties of fresh corneal lenses of *Ephesia kühniella* were investigated. The refractive index distribution in slices about $3\ \mu\text{m}$ thick was measured with the interference microscope. An axial and radial variation was found, the radial distribution being symmetric to the lens axis. The lowest values (approx. 1.43) of the refractive index occur in the paraxial proximal region of the cone, while the highest values (approx. 1.54) are found at the distal boundary and the peripheral zone of the lens. This refractive index distribution is equivalent to that of a dispersive lens, whereas the convex corneal surface is a collecting lens of higher power.

This result is confirmed by experiments with the intact lens. The proximal distance between cornea and focal plane is $+37.5\ \mu\text{m}$ (Image medium $n = 1.335$). This value and the geometrical properties of the lens give an effective lens refractive index of 1.40; this is lower than any value found in the cornea slices. If the convex curvature of the lens is optically compensated, the lens forms virtual erect images of an object.

Measurements of the central diffraction disc showed that the quality of imaging of the corneal lens is limited only by the lens aperture, and not by the refractive index distribution.

Zusammenfassung. Die optischen Eigenschaften unfixierter Cornealinsen von *Ephesia kühniella* wurden untersucht. Die Brechungsindexverteilung wurde interferenzmikroskopisch an ca. $3\ \mu\text{m}$ dicken Schnitten gemessen. In der Cornealinse wurde eine kontinuierliche axiale und radiale Variation des Brechungsindex gefunden, die radiärsymmetrisch zur Linsenachse ist. Minima des Brechungsindex von ca. 1,43 liegen proximal im Achsenbereich der Linse, Maxima von ca. 1,54 an der distalen Linsenbegrenzung und im Randbereich. Diese Brechungsindexverteilung ist einer Zerstreuungslinse äquivalent, welche die sammelnde Wirkung der convexen Corneaoberfläche abschwächt.

In Übereinstimmung mit diesem Befund stehen Experimente, die an der intakten Linse durchgeführt wurden. Die proximale Brennpunktschnittweite der planconvexen Cornealinse beträgt $+37,5\ \mu\text{m}$ (Bildraum, $n = 1,335$). Daraus ergibt sich ein effektiver Brechungsindex der Linse von 1,40. Dieser ist niedriger als alle in Cornealchnitten gemessenen Werte. Ist die konvexe Außenfläche der Linse optisch kompensiert, entwirft die Cornealinse aufrechte, virtuelle Bilder eines Objektes.

Messungen der Größe des zentralen Beugungsscheibchens ergaben, daß die Abbildungsgüte der Cornealinse nur durch die Beugung am Linsenrand und nicht durch ihre Brechungsindexverteilung begrenzt ist.

1. Einleitung

Die Superpositionstheorie von S. Exner (1891) war in jüngster Zeit Gegenstand zahlreicher Arbeiten. Im Gegensatz zu Horridge (1971, 1972) fand Kunze (1969, 1970, 1971, 1972) durch verhaltensphysiologische und am intakten Auge durchgeführte optische Untersuchungen Evidenz für die Verwirklichung eines Superpositionsstrahlengangs im Auge von *Ephestia kühniella*. Voraussetzung für eine quantitative Analyse der Bildentstehung im Ephestiaauge ist eine genaue Kenntnis des dioptrischen Apparates, der bei *Ephestia* aus einer Cornealinse und einem Kristallkegel vom eukonen Typ besteht. Die Brechungsindexverteilung im Kristallkegel wurde bereits durch Hausen (1973) untersucht. Dabei wurden die Vorstellungen S. Exners hinsichtlich einer inhomogenen Brechungsindex-Verteilung bestätigt. Zu einer vollständigen Beschreibung des dioptrischen Apparates von *Ephestia kühniella* fehlten bisher immer noch genaue Angaben über die Cornea. Diese ist daher Gegenstand der folgenden Untersuchung, in der Brechungsindices der Cornea interferometrisch gemessen und ihre geometrisch optischen Eigenschaften bestimmt werden.

Herrn Prof. Dr. P. Kunze bin ich für die Anregung zu dieser Arbeit und zahlreiche Diskussionen dankbar. Herrn E. Freiberg danke ich für die Anfertigung der Zeichnungen.

2. Methoden

a) Herstellung von Corneaschnitten

Untersucht wurden Augen der *Ephestia*-Mutante transparent (Kühn, 1932). Frische isolierte Cornea wurde mit einer Rasierklinge in 100–150 μm breite Streifen geschnitten, sofort mit einer dünnen Schicht Marabu-Klarlack überzogen und auf einem Halter befestigt. Nach zwölf Stunden war der Lack völlig getrocknet und änderte seinen Brechungsindex nicht mehr. Mit einem Schlittenmikrotom wurden 3 μm dicke Corneanschnitte hergestellt und zusammen mit ihrer Lackumrandung auf Objektträger in Aqua dest. gebracht. Ihr Interferenzbild (Abb. 1) blieb über mehr als 1 Woche konstant.

Die Dicke der Schnitte konnte durch den mitgeschnittenen Lack von bekanntem Brechungsindex ($n = 1,480$) im Interferenzmikroskop bestimmt werden. Da die Cornea von beiden Seiten mit Lack umgeben war, konnte auch eine Keiligkeit des Schnittes genau gemessen werden. Brechungsindices wurden nur an Schnitten mit zwei exakt parallelen Schnittflächen bestimmt.

Um eine genaue Ortsbestimmung zu gewährleisten, wurden Schnitte hergestellt, die sowohl achsenparallel verliefen als auch den Scheitel der Corneafacette enthielten. Bei einer Schnittführung wie in Abb. 2, Schnitt c, sind die Scheitelpunkte derjenigen Cornealinsen, die die großen Segmente bilden, in der Schnittebene enthalten. Da die Brechungsindexverteilung in der Cornea radiärsymmetrisch inhomogen ist, läßt sich die Achsenparallelität des Schnittes mit Hilfe der Interferenzbilder der angeschnittenen Facetten bestimmen: z. B. liegen in einem Schnitt c zwischen je zwei großen Segmenten zwei kleinere. Sind die Interferenzbilder dieser Segmente spiegelsymmetrisch zueinander, so ist der Schnitt achsenparallel und die großen Segmente enthalten zudem die Scheitelpunkte ihrer Facette. Gleiches gilt

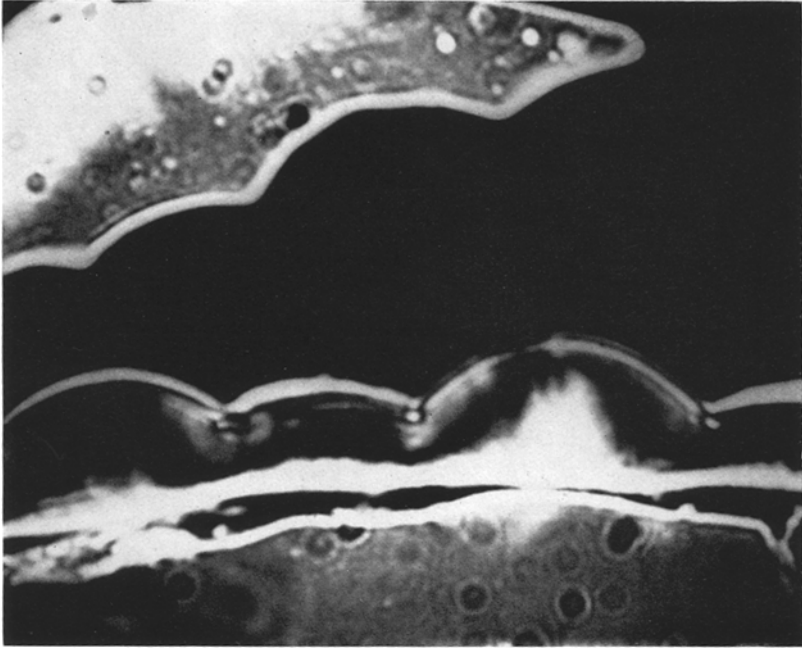


Abb. 1. Interferenzmikroskopisches Bild eines Corneaschnittes (Dicke $3,20 \mu\text{m}$) parallel zur Achse der Cornealinse. Vor (etwas abgehoben) und hinter der Cornea befindet sich mitgeschnittener Lack. Der Untergrund ist auf Dunkelheit abgeglichen

für Schnitt d, wie auch für andere Schnitte, bei denen die großen Segmente noch weiter voneinander entfernt sind. In den „normalen“ Schnitten a und b dagegen läßt sich die Schnittlage nicht genau bestimmen. Zur Messung wurden daher nur Schnitte verwendet, die den Kriterien für Schnitte c und d genügten. Als zusätzliches Kriterium für einen Schnitt in der Achse diente noch die Übereinstimmung des über die Achse gemittelten Brechungsindex eines Corneaschnittes mit dem an der intakten Cornea in der Achse gemessenen (mittleren) Brechungsindex.

b) Messung des Brechungsindex

Die interferometrischen Messungen (ausführliche Beschreibung der Meßtechnik bei Gahm, 1963, und bei Piller, 1962) wurden in monochromatischem Licht ($\lambda = 546,1 \text{ nm}$) mit einem Zeiss Universal POL-Mikroskop unter Verwendung eines Drehkompensators nach Ehringhaus durchgeführt (Quarzplatten; Meßbereich: $1-7 \lambda$). Die benutzten Deckgläser und Objektträger waren auf Spannungsfreiheit überprüft. Die Meßpunkte in einem Cornealinsenschnitt wurden durch ein Leitz-Feinmeßokular mit zwei gekreuzten, gegeneinander beweglichen Skalen festgelegt. Die Schnittfläche einer Cornealinse wurde so in ein Raster von ca. 320 Quadraten von $0,7 \mu\text{m}$ Kantenlänge aufgeteilt. In deren Mitte wurde jeweils zweimal gemessen.

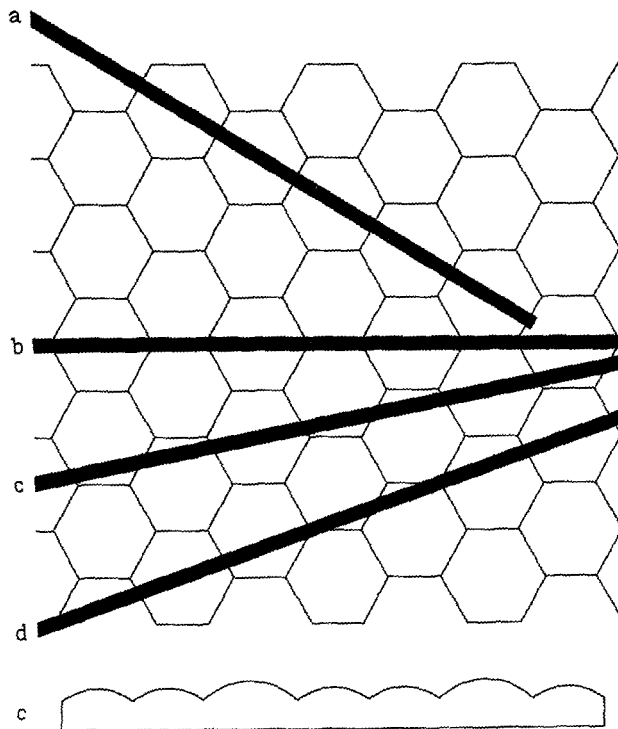


Abb. 2. Schema einiger Schnittlagen in der Cornea. Alle Schnitte führen durch Scheitelpunkte der Außenflächen von Cornealinsen. In den Lagen a und b sind Schnitte schräg zur Achse der Cornealinsen schwer von achsenparallelen Schnitten zu unterscheiden. Dagegen zeigen schräge Schnitte c und d in den kleinen Segmenten der Schnittfläche verschiedene Interferenzbilder, wenn in der Cornealinse eine radiale Brechungsindex-Variation vorliegt. Bei achsenparallelen Schnitten (c, d) sind die Interferenzbilder der kleinen Segmente spiegelsymmetrisch. Unten das Bild der Schnittfläche eines Schnittes c

c) Die Wirkung von Einbettungsmedien

Es war zu überprüfen, ob die für die Präparation benutzten Einbettungsmedien Änderungen im Brechungsindex der Cornea hervorrufen. Als Indikator für eine mögliche Veränderung diente der an der ungeschnittenen Linse in der Achse gemessene (mittlere) Brechungsindex \bar{n}_A . Er wurde mit der Methode der mehrfachen Einbettung bestimmt. Ein zweites Corneastück wurde dabei auf ein Zeiss-Mikrorefraktometer als Objektträger gebracht. Dadurch war es möglich, den Brechungsindex des jeweiligen Einbettungsmediums im gleichen Präparat zu messen.

Sind n_1, n_2 die Brechungsindices zweier Einbettungsmedien und Δ_1, Δ_2 die in der Achse der Cornealinse gemessenen Gangunterschiede, ergibt sich:

$$\bar{n}_A = \frac{\Delta_2 \cdot n_1 - \Delta_1 \cdot n_2}{\Delta_2 - \Delta_1}. \quad (1)$$

Dies gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, daß \bar{n}_A in beiden Einbettungsmedien gleich ist. Um dies zu testen, wurde der Gangunterschied nacheinander in drei verschiedenen Einbettungsmedien gemessen.

$$\Delta_{1,2,3} = (\bar{n}_A - n_{1,2,3}) \cdot d ; \quad (2)$$

Dabei ist:

- $n_1 = 1,335$ Aqua. dest. bzw. isotonische NaCl-Lösung (1,04% ig) = 1,337.
 $n_2 = 1,401$ 40%ige Rinderserumalbuminlösung.
 $n_3 = 1,373$ verdünnte Rinderserumalbuminlösung.
 $d =$ Scheitelhöhe der Cornealinse.

Sind die Lösungen für \bar{n} , die sich nach (1) aus den verschiedenen Gleichungskombinationen mit $(n_1, n_2; n_1, n_3; n_2, n_3)$ ergeben, identisch, so wird \bar{n}_A in den verschiedenen Einbettungsmedien nicht verändert. Das Einbettungsmedium n_3 muß eine verdünnte Rinderserumalbuminlösung und nicht Aqua dest. sein, da im letzteren Fall die Gleichungskombinationen mit $(n_1, n_2$ und $n_2, n_3)$ auch für den Fall die gleiche Lösung ergäben, daß sich n im Einbettungsmedium n_1 zwar ändert, diese Änderung aber reversibel ist.

Messungen an 14 Cornealinsen zeigten, daß der (mittlere) Brechungsindex in der Achse einer Cornealinse in isotonischer NaCl-Lösung, in Aqua dest. und in Rinderserumalbuminlösung gleich ist; $\bar{n}_A = 1,466$.

Wurde ein so vermessen Corneastück mit Lack überzogen, der Lack nach Trocknung mechanisch wieder entfernt, und \bar{n} durch eine erneute Einbettung in Aqua dest. bestimmt, ergab sich, daß die Behandlung mit Lack die Cornea nicht veränderte.

Da manche Autoren (z. B. Kuiper, 1962; Varela und Wiitanen, 1970; Horridge, 1972; Meyer-Rochow, 1973) für Corneaelemente Glycerin als Einbettungsmedium benützen, wurde mit der vorstehenden Methode auch untersucht, wie sich Glycerin auf die Cornea auswirkt.

Nachdem \bar{n} und d durch Einbetten eines Corneastückes in Aqua dest. und Rinderserumalbuminlösung bestimmt waren, wurde in Glycerin-Wasser ($n = 1,448$) eingebettet. Der mittlere Brechungsindex in der Achse erhöhte sich dabei von $\bar{n}_A = 1,466$ auf $\bar{n}_{A\text{glyz.}} = 1,513$.

Dieser Befund konnte durch Messungen an Corneaschnitten bestätigt und spezifiziert werden. Bringt man die Schnitte von Aqua dest. ($n = 1,3356$) in Glycerin-Wasser ($n = 1,456$), so steigt der Brechungsindex des Schnittes, und zwar im Zentralbereich (mit ursprünglich niedrigem Brechungsindex) stark, im Randbereich (mit ursprünglich hohem Brechungsindex) schwach. An vier Schnitten ergab sich der Anstieg des Brechungsindex als:

	Aqua dest. ($n = 1,335$)	Glycerin ($n = 1,456$)	Differenz
Proximaler Achsenbereich	1,429	1,507	0,078
Rand	1,539	1,558	0,019

Eine inhomogene Brechungsindex-Verteilung wird also durch Glycerin „eingebnet“. Möglicherweise wird Wasser in den Intermicellarräumen der Cornea gegen Glycerin mit höherem Brechungsindex ausgetauscht. Bei im zentralen Linsenbereich größeren Volumenanteil der Intermicellarräume würde dort die größte Änderung des Brechungsindex erfolgen. In jedem Fall ist Glycerin, da es den Brechungsindex der Cornea ändert, als Einbettungsmedium ungeeignet.

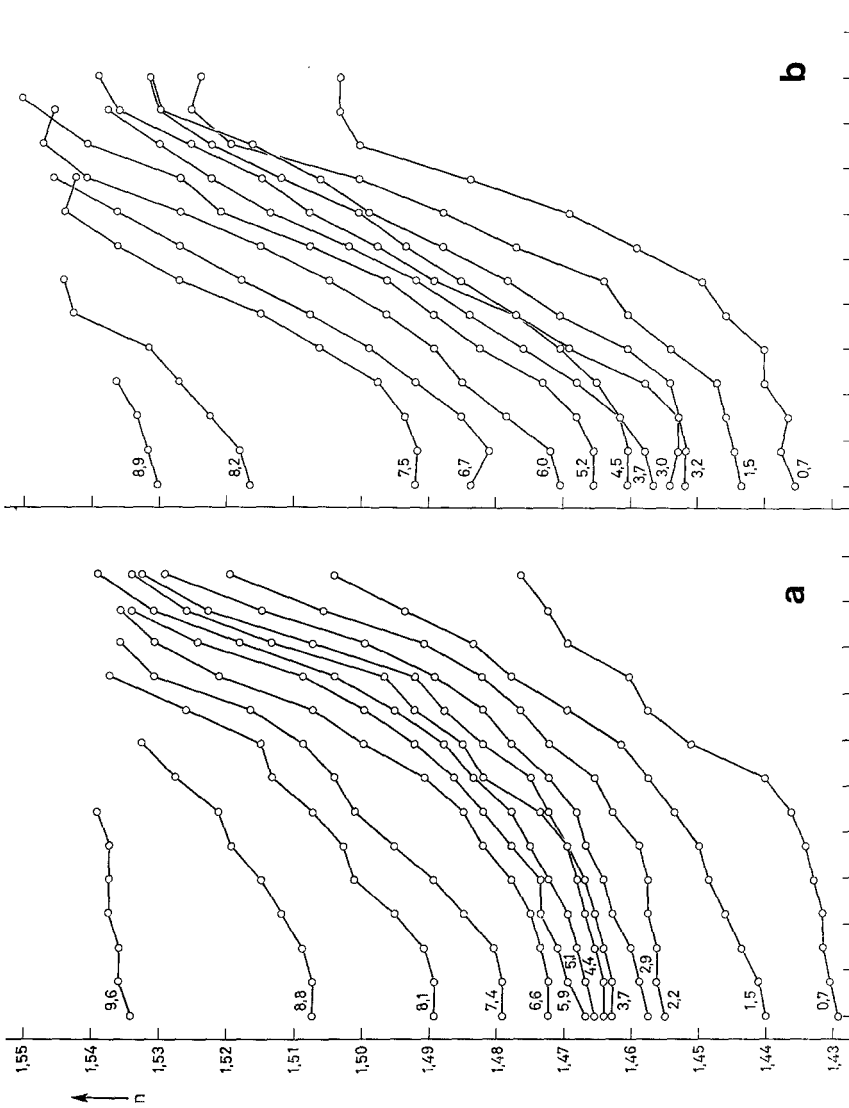


Abb. 3. Brechungsindex in Abhängigkeit vom Achsenabstand in vier Hälften von achsenparallelen Schnitten durch Cornealinsen (Schnittticken a, b, c, d: 3,20; 3,54; 3,17; 3,17 μm). Die Zahlenangaben an den Einzelkurven entsprechen dem Abstand der Meßpunkte von der Cornea-Innenseite (in μm). Jeder eingezeichnete Punkt ist der Mittelwert aus zwei Messungen

Ergebnisse

a) Brechungsindex-Verteilung in der Cornea

Die Cornea-Facette zeigt sowohl eine radiale als auch eine axiale Variation des Brechungsindex, wobei der Brechungsindex von der Achse zur Peripherie der Facette und von proximal nach distal zunimmt. Dies gilt qualitativ für alle untersuchten Präparate (ca. 50). Genaue Messungen

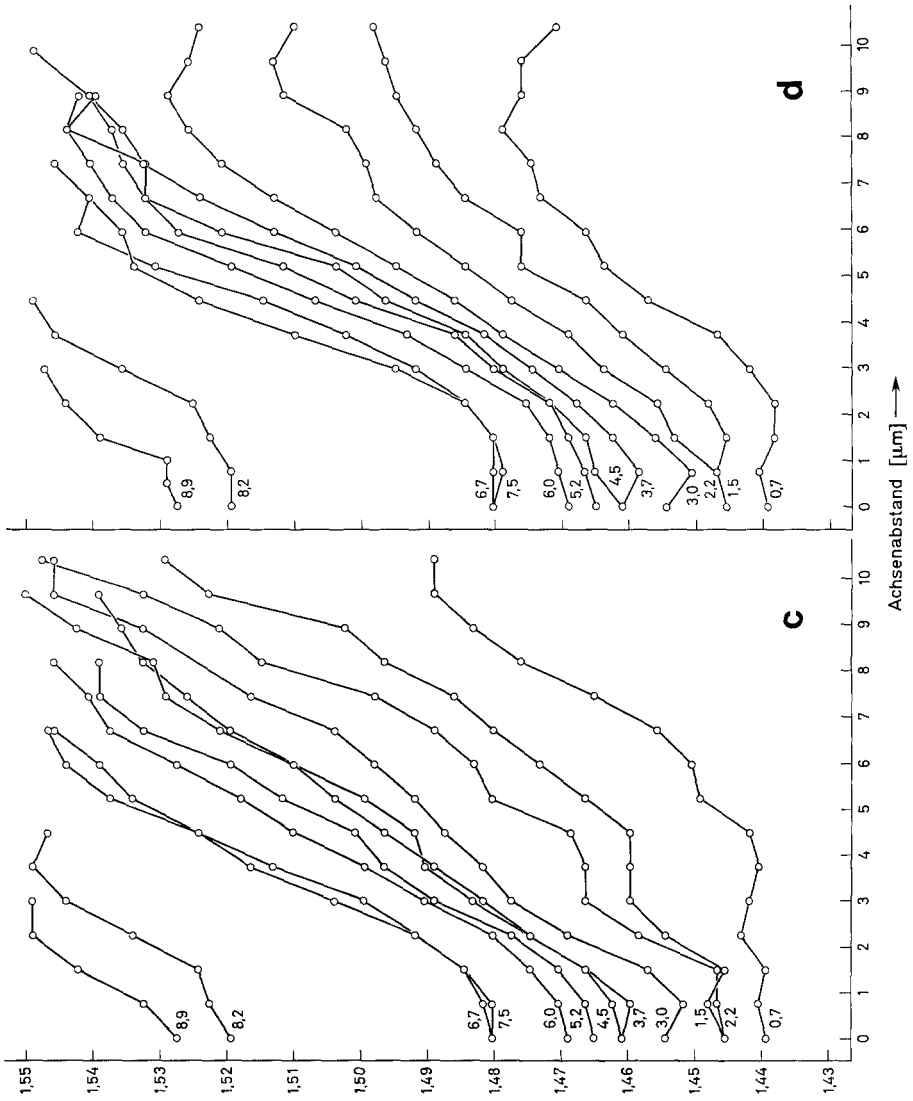


Abb. 3 c u. d

wurden jedoch nur an Schnitten durchgeführt, die den angeführten Kriterien hinsichtlich ihrer Lage in der Facette genügten. Abb. 3 zeigt als Ergebnisse von Messungen an vier Cornealinsenschnitthälften den Brechungsindex in Abhängigkeit vom Achsenabstand, wobei jede Einzelkurve für einen bestimmten Abstand von der Corneainnenseite gilt. Maxima und Minima des Brechungsindex stimmen in den verschiedenen

Schnitten gut überein. Minima des Brechungsindex von 1,43—1,44 liegen proximal im Achsenbereich der Linse. Der Brechungsindex steigt radial im unmittelbaren Achsenbereich flach, danach steil an. Maxima von 1,54—1,55 finden sich an der distalen Facettenbegrenzung und im Randbereich. Da die Brechungsindex-Verteilung in der Cornealinse radiärsymmetrisch ist und diese Daten an dünnen achsenparallelen Schnitten gewonnen wurden, gibt jede Kurvenschar in Abb. 3 die Brechungsindexverteilung in der ganzen Cornealinse wieder.

Die optische Wirkung der hier gefundenen inhomogenen Brechungsindexverteilung läßt sich — unter vereinfachenden Bedingungen — beschreiben. Nach K. Exner (1886) muß in einer inhomogenen, von sphärischen Flächen begrenzten Linse die Brechungsindex-Verteilung einer bestimmten Funktion genügen, damit die Linse noch gute abbildende Eigenschaften besitzt. Unter der Voraussetzung, daß die Linse dünn ist und nur paraxiale Strahlen betrachtet werden, läßt sich aus K. Exner (1886) für eine von der Achse zur Peripherie zunehmende Brechungsindex-Verteilung ableiten, daß

$$n = \frac{d \cdot n_1 + g \cdot x^2}{d - \frac{x^2}{2r}} \quad (3)$$

(n = Brechungsindex im Achsenabstand x ; n_1 = Brechungsindex in der Achse; x = Achsenabstand; d = Linsendicke in der Achse; r = Krümmungsradius der sphärischen Linsenfläche; g = Proportionalitätskonstante).

Entwickelt man in eine Reihe und bricht, da die Funktion nur für den achsennahen Bereich gilt, nach dem Glied 4. Ordnung ab, so ergibt sich

$$n = n_1 + \frac{n_1 + 2rg}{2rd} x^2 + \frac{n_1 + 2rg}{(2rd)^2} x^4. \quad (4)$$

In dieser Formel wird deutlich, daß die Brechungsindex-Verteilung einer quadratischen Parabelfunktion genügen muß, die durch eine Parabelfunktion 4. Ordnung korrigiert ist.

Unter Vernachlässigung der axialen Variation läßt sich die Brechungsindexverteilung der Cornea mit der Funktion (4) vergleichen. Dazu wird ein Durchschnittswert (\bar{n}) aller in einem bestimmten Achsenabstand auftretender Brechungsindices in Abhängigkeit vom Achsenabstand berechnet.

$$\bar{n} = f(x) \quad (5)$$

Abb. 4 Kurve a zeigt Mittelwert und Standardabweichung der Funktion $\bar{n} = f(x)$ von vier auf einen Linsendurchmesser von 20 μm normierten Cornealschnitten. (Die Zunahme der Standardabweichung mit dem Achsenabstand erklärt sich u. a. daraus, daß Fehler bei der Festlegung des

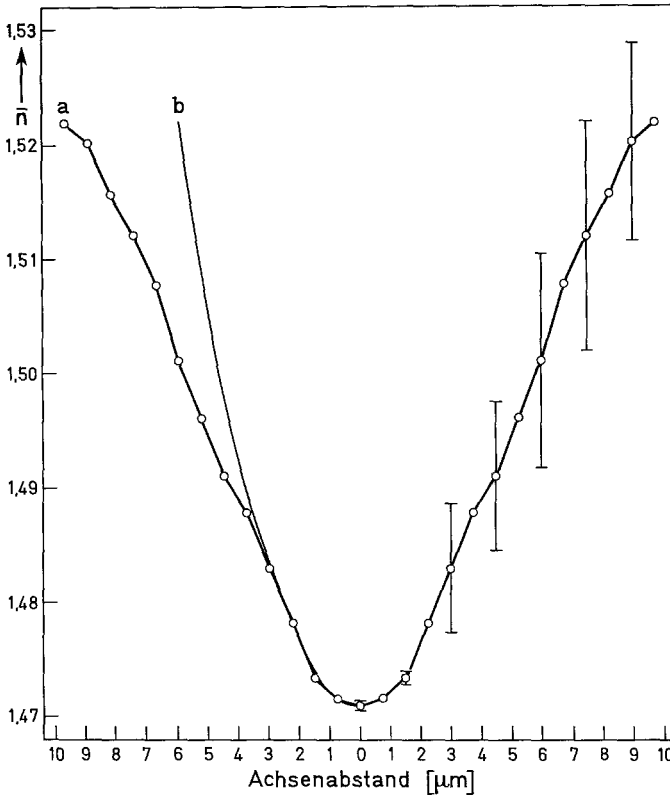


Abb. 4. a Mittelwert und Standardabweichung der Funktion $\bar{n} = f(x)$ von vier auf einen Linsendurchmesser von $20 \mu\text{m}$ normierten Corneaschnitten. Der linke Teil der Kurve ist symmetrisch ergänzt. b Funktion (4) mit $r = 14 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$ und $g = -4,0 \cdot 10^{-2} 1/\mu\text{m}$. Nur der linke Ast der Kurve ist aufgetragen

Meßpunktes auf dem Corneaschnitt sich umso stärker auswirken, je steiler der Brechungsindex ansteigt.)

Kurve b stellt die Funktion (4) mit $r = 14 \mu\text{m}$ und $d = 10 \mu\text{m}$ (Abmessungen der Corneallinse) dar. Sie stimmt für ein $g = -4,0 \cdot 10^{-2}$ mit der Funktion $\bar{n} = f(x)$ im Achsenbereich gut überein.

Da die Cornea eine dicke Linse ist, ist die Bildung von \bar{n} als gemittelter Brechungsindex parallel zur Achse vor allem im achsenfernen Bereich fehlerhaft, so daß hier eine Abweichung zu erwarten ist. Die Beschränkung bei der Herleitung der theoretischen Brechungsindex-Verteilung auf dünne Linsen und paraxiale Strahlen, dazu die Vernachlässigung der axialen Brechungsindex-Variation, lassen quantitative Aussagen, wie z. B. über die Brennweite, nicht zu. Als wesentliches Ergebnis ist jedoch

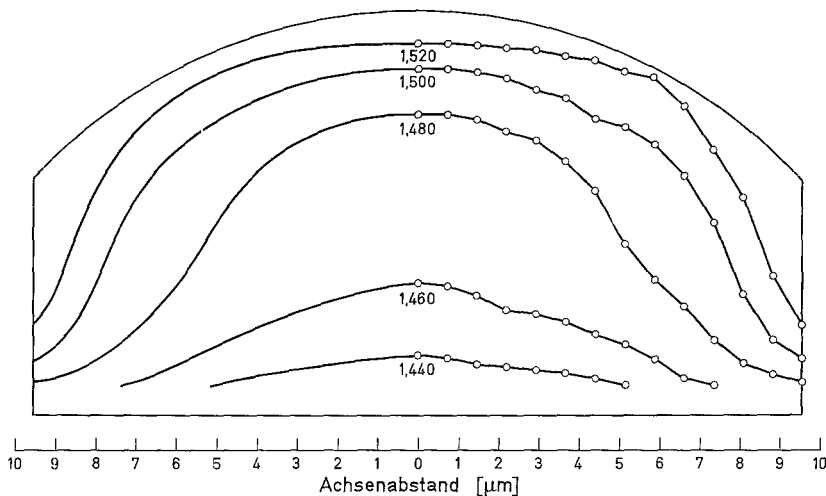


Abb. 5. Äquirefraktionslinien in einem Corneaschnitt. Sie wurden aus den in Abb. 3a dargestellten Messungen durch lineares Interpolieren ermittelt. Orte mit gleichem Brechungsindex sind in der rechten Hälfte geradlinig, in der linken durch geglättete Kurven verbunden

festzuhalten, daß die Corneallinse eine Brechungsindex-Verteilung aufweist, die der einer inhomogenen Linse mit abbildenden Eigenschaften vergleichbar ist. Da der Brechungsindex in der Achse ein Minimum hat und zum Rand hin ansteigt, wirkt die Brechungsindexverteilung wie eine Zerstreuungslinse.

Dies wird unmittelbar deutlich durch die Darstellung in Abb. 5, die die Brechungsindex-Verteilung in der Cornea anhand einiger Äquirefraktionslinien wiedergibt. Jede der durch diese Linsen angedeuteten Grenzschichten außer der Luft-Cornea-Grenze hat zerstreue Wirkung.

b) Optische Untersuchungen an der intakten Corneallinse

Eine isolierte Corneakalotte wurde über der Öffnung einer Metallblende mit Lack befestigt und unter dem Mikroskop mit einem Wasserimmersionsobjektiv (40/0.75, Immersionsmed. Aqua dest.) betrachtet. Die Außenseite der Cornea grenzte an Luft. Der Kondensator des Mikroskops war entfernt und statt dessen im Abstand von ca. 15 cm von der Cornea (entspricht für die Corneallinse einer unendlichen Gegenstandsweite) eine Blende (Durchmesser ca. 250 μm) angebracht. Beleuchtet wurde mit monochromatischem Licht ($\lambda = 546,1 \text{ nm}$). Es wurde mit dem Mikroskop abwechselnd auf die Cornea-Innenseite (dies im Auflichtstrahlengang) und auf den Brennpunkt bzw. das Blendenbild scharfgestellt. Die Tubus-

verschiebung wurde mit einem Millitron-Feinmeßgerät (Mahr-Feinprüf) gemessen. Durch ihre Befestigung konnte die Corneakalotte bei Tubusverschiebungen nicht mitbewegt werden. Bestimmt wurde so die hintere Brennpunktschnittweite der Cornealinse in Aqua dest.

Als Mittelwert aus jeweils 5 Messungen an 10 Cornealinsen ergibt sich die Brennpunktschnittweite in Wasser als

$$f' = 37,5 \pm 3,5 \mu\text{m}.$$

Der Krümmungsradius der äußeren Linsenoberfläche und die Dicke (Scheitelhöhe) der Linse wurden an achsenparallelen Schnitten gemessen. Wie bei Fischer und Horstmann (1971) ergab sich für den Krümmungsradius $14 \mu\text{m}$, für die Dicke $10 \mu\text{m}$. Die Innenseite der Linse kann als plan betrachtet werden.

Berechnet man den Brechungsindex einer homogenen Linse gleicher Abmessung und gleicher Brechkraft wie die Cornealinse, indem man die Werte für Krümmungsradius, Linsendicke und Brennpunktschnittweite in die Formel für dicke Linsen einsetzt, so ergibt sich ein Brechungsindex der homogenen Linse von 1,397. Dieser Wert stellt den effektiven Brechungsindex (Totalindex) der Cornealinse dar. Er liegt deutlich unter dem niedrigsten in Corneaschnitten gemessenen Brechungsindex von 1,43. Dieser niedrige effektive Brechungsindex der Cornealinse kann also nur durch eine Brechungsindexverteilung erreicht werden, die wie eine Zerstreuungslinse wirkt.

Dies wird bestätigt, wenn man bei der Brennweitenmessung die Luft vor der äußeren konvexen Corneafläche gegen Medien mit höherer Brechzahl austauscht. Es zeigte sich, daß schon bei einem Medium mit dem Brechungsindex 1,41 (konz. Rinderserumalbuminlösung) die Cornealinse keinen reellen, sondern nur noch einen virtuellen Brennpunkt bildet. Der Wert von 1,41 ist sehr viel kleiner als die an der Corneaaußenseite auftretenden Brechungsindices von 1,54—1,55. In diesem Fall übersteigt also die Wirkung der „internen Zerstreuungslinse“ die verbleibende sammelnde Wirkung der Corneaoberfläche. Dieser Befund ist ein direkter Beweis für eine beachtliche radiale Variation des Brechungsindex in der Cornealinse.

Abb. 6 zeigt Bilder, die die Cornealinse von einem weit entfernten Objekt entwirft, das aus vier kleinen Lampen besteht, die wie eine 1 angeordnet sind. Bei Abb. 6a befindet sich vor der Corneaaußenfläche Luft, im Bildraum Aqua dest. Es entstehen in der hinteren Brennebene umgekehrte reelle Bilder des Objektes. Ist die Luft vor der Corneaaußenfläche gegen Lack mit einem Brechungsindex von 1,48 ausgetauscht, entstehen aufrechte virtuelle Bilder des Objekts (Abb. 6b), obwohl die Lack-Corneagrenze noch immer sammelnd wirken muß. Werden durch die Brechungsindex-Verteilung innerhalb der Cornea keine Abbildungsfehler

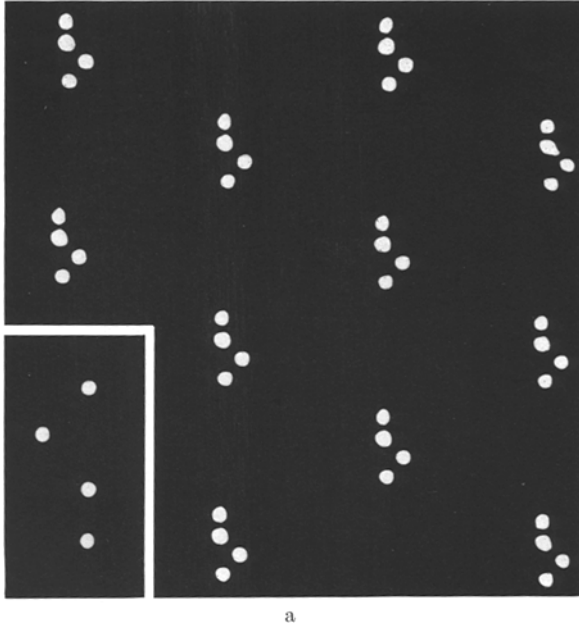


Abb. 6. Abbildung eines aus vier kleinen Lämpchen bestehenden Objektes (Einschaltfigur) durch Cornealinsen

a Umgekehrte reelle Bilder des Objektes in der hinteren Brennebene der Cornealinsen. Vor der Cornea-Außenseite Luft, hinter der Cornea-Innenseite Wasser

eingeführt und weist die Cornealinsens keine größeren Linsenfehler wie z. B. sphärische Aberration auf, so ist die Abbildungsgüte nur durch die Beugung an der Apertur der Linse beschränkt. Nimmt man für den Linsenrand eine kreisförmige Pupille an und betrachtet die Corneainnenseite als Ort dieser Pupille, so ist der Durchmesser des zentralen Beugungsscheibchens (Airy-Disk)

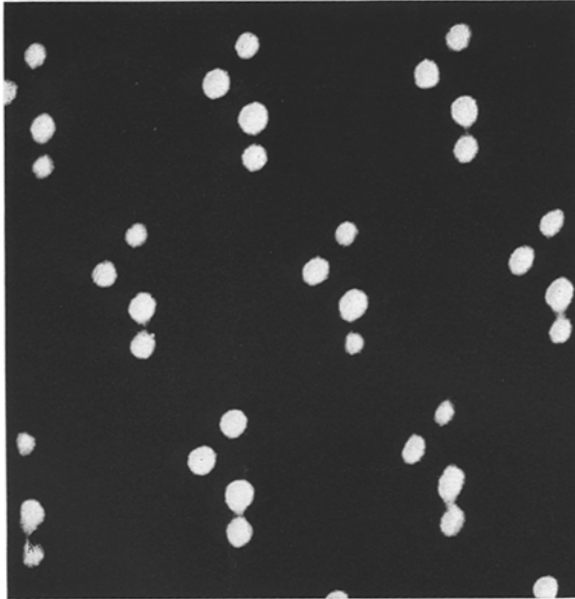
$$d' = 2 \cdot 1,22 \frac{\lambda \cdot f'}{D \cdot n} . \quad (6)$$

Bei der Wellenlänge $\lambda = 546,1 \text{ nm}$, einer Brennpunktschnittweite von $f' = 37,5 \pm 3,5 \text{ }\mu\text{m}$, dem Facettendurchmesser $D = 20 \text{ }\mu\text{m}$ und dem Brechungsindex des Mediums im Bildraum $n = 1,334$ ist

$$d' = \frac{2 \cdot 1,22 \cdot 0,546 \cdot 37,5}{20 \cdot 1,33} = 1,88 \pm 0,18 \text{ }\mu\text{m} .$$

(Der Wert von $\pm 0,18 \text{ }\mu\text{m}$ ergibt sich aus der Streuung bei der Brennweitenmessung.)

Der Durchmesser des Airy-Disk in der Brennebene der Cornea wurde in der zuletzt beschriebenen Versuchsanordnung bestimmt. Als Punkt-



b

Abb. 6b. Aufrechte virtuelle Bilder des Objektes, wenn sich vor der Cornea-Außenseite ein Medium vom Brechungsindex 1,48 befindet. Die virtuellen Bilder entstehen durch die wie eine Zerstreuungslinse wirkende Brechungsindexverteilung in den Cornealinsen

lichtquelle diente dabei eine Blende, deren Winkelausdehnung (von der Cornea her gesehen) sehr klein war im Vergleich zum Winkelabstand zweier Punkte, die von der Cornealinse gerade noch aufgelöst werden können. Der Durchmesser d des zentralen Beugungsscheibchens (bis zur Mitte des 1. Minimums) wurde an Photographien gemessen. Es ergab sich

$$d = 1,76 \pm 0,1 \mu\text{m}.$$

Der gemessene Durchmesser des Airy-Disk (d) liegt an der unteren Grenze des theoretisch berechneten d' . Daraus geht hervor, daß nicht die in der Cornealinse vorliegende Brechungsindexverteilung die Qualität der Abbildung limitiert, sondern die durch die Linsenöffnung verursachte Beugung.

Diskussion

Bei Interferenzmessungen an Gefrierschnitten durch das Auge von *Ephestia kühniella* fand Horridge (1972) für den Brechungsindex in der Cornea Werte von 1,48—1,52 mit 1,50 als "best-value". Er gibt für das Zentrum der Cornealinse einen Brechungsindex von 1,49 an, beschreibt

aber die Cornea als "almost homogeneous". Eine Kontrolle möglicher Brechungsindexveränderungen durch das Einfrieren gibt Horridge nicht an. Die Schnittdicke betrug 8—10 μm . Bei dieser Schnittdicke, die groß ist im Vergleich zum Facettendurchmesser, enthalten die Schnitte Bereiche mit gekrümmten Oberflächen, an denen eine exakte Bestimmung der Brechungsindices nicht möglich ist. Da außerdem der Meßstrahl Schichten von unterschiedlicher optischer Dichte durchläuft, wird immer nur ein mittlerer Brechungsindex bestimmt. Eine vorhandene Inhomogenität der Linse wird dadurch verdeckt. Als Einbettungsmedien verwandte Horridge Glycerin-Wasser-Gemische. Dies hat — wie hier schon ausgeführt — zur Folge, daß sich der Brechungsindex der Cornealinse erhöht und zwar in den verschiedenen Linsenbereichen umso stärker, je niedriger ihr ursprünglicher Brechungsindex ist. Vorhandene Brechungsindexdifferenzen werden so reduziert. Der Befund von Horridge, daß die Cornealinse "almost homogeneous" sei und der hohe Brechungsindex von 1,50 lassen sich also mit großer Wahrscheinlichkeit auf zu große Schnittdicke und das Verwenden von Glycerin-Wasser-Gemischen als Einbettungsmedium zurückführen.

Horridge benutzt die in Cornea und Kristallkegel gemessenen Brechungsindices, um an Hand von Strahlengangkonstruktionen nach Snellius die Möglichkeit eines Superpositionsstrahlenganges zu prüfen. Er findet, daß auf die Cornea parallel einfallende Strahlenbündel den Kristallkegel divergierend verlassen, wobei nur sehr wenige Strahlen dem Strahlengang einer aufrichtenden Optik entsprechen. Dieses Ergebnis ist im wesentlichen vom Brechungsindex und Krümmungsradius der Cornealinse bestimmt. Der für die Cornea angenommene Brechungsindex von 1,50 unterscheidet sich erheblich von dem effektiven Brechungsindex der Cornealinse von 1,40, der sich hier aus der Brennweitenmessung ergab. Schon aus diesem Grund sind seine Ergebnisse sehr zweifelhaft.

Seitz (1968) fand bei Interferenzmessungen an der Cornealinse von *Calliphora erythrocephala* eine axiale Variation des Brechungsindex. Die gemittelten Brechungsindices von Cornealinsen betragen 1,436—1,484. Eine statistisch zu sichernde radiale Brechungsindexvariation konnte Seitz allerdings nicht feststellen. Da die Messungen an Gefrierschnitten von großer Dicke (10 μm) vorgenommen wurden, gelten ebenfalls die hier für die Messungen von Horridge gemachten Einschränkungen. Die von Seitz (1968) veröffentlichten interferenzmikroskopischen Bilder von Schnitten, die senkrecht und parallel zur Achse der Cornealinse geführt wurden, weisen trotz anderer Beurteilung durch den Autor auf eine radiale Brechungsindex-Variation hin. (Die eigene Beobachtung, daß eine isolierte Cornealinse von *Musca domestica* nur einen virtuellen Brennpunkt bildet, wenn sich vor der Corneaaußenseite statt Luft ein Medium mit dem Brechungsindex 1,410 befindet, macht eine Brechungsindex-

Verteilung in der Dipteren-Cornea, die der von *Ephestia* ähnlich ist, wahrscheinlich).

Die eigenen interferometrischen Messungen an Corneaschnitten, die durch Untersuchungen an der intakten Linse bestätigt werden, zeigen, daß in der Cornealinse von *Ephestia kühniella* eine beachtliche radiale Brechungsindexvariation vorliegt, die wie eine Zerstreuungslinse wirkt. Anders als im Kristallkegel, wo der Brechungsindex mit dem Quadrat des Achsenabstandes fällt (Hausen, 1973), steigt der Brechungsindex in der Cornealinse mit dem Achsenabstand. Diese Brechungsindexverteilung scheint aber insofern keine spezifische optische Funktion zu haben, als die gleiche optische Wirkung auch von einer homogenen Cornealinse mit größerem Krümmungsradius erzielt werden könnte.

Literatur

- Barlow, H.B.: Visual resolution and the diffraction limit. *Science* **149**, 553—555 (1965)
- Exner, K.: Zur Linsenformel. Linsenwirkung nicht homogener Körper. *Ann. Phys. Chem.*, N. F. **28**, 111—116 (1886 a)
- Exner, K.: Gültigkeit der Linsenformel für nicht homogene Linsen. *Ann. Phys. Chem.* N. F. **29**, 484—487 (1886 b)
- Exner, S.: Die Physiologie der facettierten Augen von Krebsen und Insecten. Leipzig-Wien: Franz Deuticke 1891
- Fischer, A., Horstmann, G.: Der Feinbau des Auges der Mehlmotte, *Ephestia kühniella* Zeller. *Z. Zellforsch.* **116**, 275—304 (1971)
- Gahm, J.: Quantitative Messungen mit der Interferenzanordnung von Jamin-Lebedeff. *Zeiss-Mitt.* **3**, 3—31 (1963)
- Hausen, K.: Die Brechungsindices im Kristallkegel der Mehlmotte *Ephestia kühniella*. *J. comp. Physiol.* **82**, 365—378 (1973)
- Horridge, G.A.: Alternatives to superposition images in clearzone compound eyes. *Proc. roy. Soc. B* **179**, 97—124 (1971)
- Horridge, G.A.: Further observations on the clear zone eye of *Ephestia*. *Proc. roy. Soc. B* **181**, 157—173 (1972)
- Kühn, A.: Entwicklungsphysiologische Wirkungen einiger Gene von *Ephestia kühniella*. *Naturwissenschaften* **20**, 974—977 (1932)
- Kuiper, J.W.: The optics of the compound eye. *Symp. Soc. exp. Biol.* **16**, 58—71 (1962)
- Kunze, P.: Eye glow in the moth and superposition theory. *Nature (Lond.)* **223**, 1172—1174 (1969)
- Kunze, P.: Verhaltensphysiologische und optische Experimente zur Superpositionstheorie der Bildentstehung in Komplexaugen. *Verh. Dtsch. Zool. Ges.* Bd. **64**, S. 234—238. Stuttgart: Gustav Fischer 1970
- Kunze, P.: Comparative studies of arthropod superposition eyes. *Z. vergl. Physiol.* **76**, 347—357 (1972)
- Kunze, P.: Pigment migration and the pupil of the dioptric apparatus in superposition eyes. In: *Information processing in the visual systems of Arthropods* (ed. R. Wehner), p. 89—92. Berlin-Heidelberg-New York: Springer 1972

- Kunze, P., Hausen, K.: Inhomogeneous refractive index in the crystalline cone of a moth eye. *Nature (Lond.)* **231**, 392—393 (1971)
- Meyer-Rochow, U.B.: The dioptric system of the eye of *Cybister*. *Proc. roy. Soc. B* **183**, 159—178 (1973)
- Piller, H.: Durchlicht-Interferenzmikroskopie nach dem Jamin-Lebedeff-Prinzip. *Zeiss-Mitt.* **2**, 309—334 (1962)
- Seitz, G.: Der Strahlengang im Appositionsauge von *Calliphora erythrocephala*. *Z. vergl. Physiol.* **59**, 205—231 (1968)
- Varela, F.G., Wiitanen, W.: The optics of the compound eye of the honey bee. *J. gen. Physiol.* **55**, 336—358 (1970)

Klaus Vogt
Biologisches Institut
der Universität Stuttgart
D-7000 Stuttgart-Wangen
Ulmer Str. 227
Bundesrepublik Deutschland