Beilby[10] für die Dicke der durch den Polierprozeß beeinflußten Oberflächenschicht abgeleitet hat, als auch den Ergebnissen, welche Smekal und Mitarbb.[5] für die Zone der bruch- und splitterfreien Ritzspuren auf bestpolierten Gläsern erhalten haben.

Überzüge dieser Art lassen sich bei genügender Dicke noch auf andere Art besonders deutlich nachweisen. Verfolgt man nämlich den zeitlichen Verlauf des Reflexionsvermögens von monochromatischem Licht bei der Vergütung in der Lösung selbst (Abb. 4), so müßte man bei sofortigem Einsetzen der Schichtbildung sehr angenähert eine cos-Kurve erhalten. Während diese beim filzpolierten Spiegelglas nach dem Eintauchen praktisch sofort, beim pechpolierten nur wenig verzögert ansetzt, vergeht bei BK 7 etwa ¼ der Gesamtvergütungszeit, bis die Schicht merklich zu wachsen beginnt, weil erst die Polierschicht entfernt sein muß. Der weitere Verlauf der Kurve ist, namentlich beim Spiegelglas, gegenüber der cos-Funktion dadurch verzerrt, daß das Schichtwachstum nicht ganz linear mit der Zeit erfolgt, da bei dickeren Schichten offenbar die Diffusionsprozesse geschwindigkeitsbestimmend werden.

Der Wiederanstieg von v_t/v_p nach dem Minimum der Kurve in Abb. 3 vollzieht sich so langsam, daß die Porenweite mit wachsender Schichtdicke nur eine kaum merkliche Zunahme erfährt, d. h. der Totalabbau der Schicht erfolgt praktisch nur an den äußersten Schichtbausteinen. Erst bei Abänderung der Lösungen bis nahe an die Grenze des Schichtbildungsvermögens (v_t/v_p nahe 1) findet eine Aufweitung der Poren von den Porenwänden aus statt, die schließlich zur Bildung stark inhomogener Schichten führen kann.

Für die Praxis bedeuten diese Ergebnisse, daß die Anwendung des chemischen Vergütungsverfahrens für optische Zwecke — soweit man sich nicht mit Schichten geringeren Auslaugungsgrades, also höherer Brechzahl, begnügt — nur bei Gewährleistung einer hochwertigen, polierschuttarmen Politur ratsam erscheint. Das Schwergewicht seiner Verwendbarkeit wird daher bei der Behandlung großflächiger Scheiben, z. B. für die Verglasung von Bildern oder Schaukästen, liegen, wo auch die Mannigfaltigkeit der Glassorten gering ist und Fremdschichtverfahren technisch nicht mehr durchführbar sind.

[10] G. T. Beilby, Proc. Roy. Soc. [London], Ser. A **72**, 220 [1903].

Über die Rotgrenze der Augenempfindlichkeit

Von Marianus Czerny

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Frankfurt a. M.

(Z. Naturforschg. **4a**, 521—523 [1949]; eingegangen am 28. März 1949)

Nach neueren Messungen besitzt das Auge eine definierte Empfindlichkeit noch bis etwa 1,0 μ. Es wird hier eine Formel mitgeteilt, die die Messungsresultate befriedigend darstellt. Ihre Auslegung deutet darauf hin, daß der Abfall der Augenempfindlichkeit in diesem „ultraroten" Bereich gerade hinreichend rasch erfolgt, daß keine Dunkelreaktion im Auge den Sehakt stört.

Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges nimmt bekanntlich von Grün über Gelb nach Rot hin stetig ab. Gewöhnlich wird 0,76 μ als langwellige Grenze angegeben. Es ist daher interessant, daß in zwei unabhängig durchgeführten und kürzlich veröffentlichten Arbeiten[1,2] nachgewiesen wird, daß das Auge noch bis etwa 1,0 μ mit einer Rot-Empfindung anspricht, für die sich eine allerdings rasch abnehmende, aber definierte Empfindlichkeit experimentell bestimmen läßt. Die Messungen sind nicht leicht durchzuführen, weil gleichzeitig größte spektrale Reinheit und höchste Intensitäten der Strahlung verlangt werden. Zieht man diese Schwierigkeiten in Betracht, so muß man die Ergebnisse der beiden Publikationen als in befriedigender Übereinstimmung bezeichnen.

Die experimentellen Werte sind in Tab. 1 zusammengestellt, und zwar unter K_A die Werte,

[1] Griffin, Hubbard u. Wald, J. opt. Soc. America **1947**, Heft 7.

[2] E. Lau u. W. Leo, Ann. Physik **2**, 242—255 [1948].

	K_A	K_D	$K_A \lambda^{-3} \exp(-0{,}00462/\lambda)$	$K_D \lambda^{-3} \exp(-0{,}00462/\lambda)$
0,70 μ	$3{,}6 \cdot 10^{-3}$	$4{,}1 \cdot 10^{-3}$	$2{,}2 \cdot 10^{-19}$	$2{,}6 \cdot 10^{-19}$
0,72	$8{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	$3{,}1 \cdot 10^{-19}$	$3{,}9 \cdot 10^{-19}$
0,74	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$	$3{,}8 \cdot 10^{-19}$	$4{,}8 \cdot 10^{-19}$
0,76	$5{,}1 \cdot 10^{-5}$	$6{,}0 \cdot 10^{-5}$	$4{,}7 \cdot 10^{-19}$	$5{,}5 \cdot 10^{-19}$
0,78	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$5{,}6 \cdot 10^{-19}$	$5{,}9 \cdot 10^{-19}$
0,80	$3{,}9 \cdot 10^{-6}$	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$	$6{,}3 \cdot 10^{-19}$	$6{,}5 \cdot 10^{-19}$
0,82	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$	$7{,}6 \cdot 10^{-19}$	$6{,}6 \cdot 10^{-19}$
0,84	$3{,}8 \cdot 10^{-7}$	$2{,}9 \cdot 10^{-7}$	$8{,}3 \cdot 10^{-19}$	$6{,}4 \cdot 10^{-19}$
0,86	$1{,}3 \cdot 10^{-7}$	$7{,}6 \cdot 10^{-8}$	$9{,}6 \cdot 10^{-19}$	$5{,}6 \cdot 10^{-19}$
0,88	$4{,}5 \cdot 10^{-8}$	$2{,}3 \cdot 10^{-8}$	$10{,}5 \cdot 10^{-19}$	$5{,}4 \cdot 10^{-19}$
0,90	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$	$7{,}7 \cdot 10^{-9}$	$12{,}0 \cdot 10^{-19}$	$5{,}5 \cdot 10^{-19}$
0,92	$6{,}6 \cdot 10^{-9}$	$2{,}6 \cdot 10^{-9}$	$13{,}5 \cdot 10^{-19}$	$5{,}3 \cdot 10^{-19}$
0,94	$2{,}7 \cdot 10^{-9}$	$9{,}2 \cdot 10^{-10}$	$14{,}8 \cdot 10^{-19}$	$5{,}1 \cdot 10^{-19}$
0,96	$1{,}1 \cdot 10^{-9}$	$3{,}5 \cdot 10^{-10}$	$15{,}6 \cdot 10^{-19}$	$4{,}9 \cdot 10^{-19}$
0,98	$4{,}9 \cdot 10^{-10}$	$1{,}4 \cdot 10^{-10}$	$17{,}4 \cdot 10^{-19}$	$4{,}9 \cdot 10^{-19}$
1,00	$2{,}2 \cdot 10^{-10}$		$19{,}1 \cdot 10^{-19}$	

Tab. 1. Empfindlichkeit des Auges in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ. K_A Messungen amerikanischer, K_D Messungen deutscher Autoren.

die die amerikanischen Autoren für die Augenempfindlichkeit gefunden haben, unter K_D die entsprechenden Werte der deutschen Autoren. Dabei ist die Empfindlichkeit des Auges im Maximum = 1 gesetzt. Man erkennt, daß die beiden Meßreihen nach langen Wellen hin systematisch voneinander abweichen. Es wird wohl weiterer Messungen bedürfen, um zu entscheiden, ob diese Abweichungen innerhalb der Fehlergrenzen liegen, oder ob sie aus etwas verschiedenen Versuchsbedingungen resultieren.

Ich fand, daß die K_D-Werte nahezu umgekehrt proportional zu dem Ausdruck $\lambda^{-3} \exp(-0{,}00462/\lambda)$ verlaufen. Die Wellenlänge λ ist dabei in cm eingesetzt. Dies zeigen die beiden letzten Spalten der Tab. 1. Die K_A-Werte folgen dieser mathematischen Formulierung weniger genau, doch ist die Abweichung von der Konstanz für lange Wellen in umgekehrter Richtung wie bei den deutschen Messungen, so daß bei einer Wiederholung der Messung sich vielleicht eine noch bessere Übereinstimmung ergeben könnte.

Diese zunächst rein empirische Interpolations-Formel bekommt ein tieferes Interesse durch folgende Überlegung:

Die schwarze Hohlraum-Strahlung enthält bei Blut-Temperatur praktisch keine Quanten von 0,7 μ oder noch kurzwelligere Quanten, die den Empfangsapparat des Auges zum Ansprechen bringen könnten. Langwelligere Quanten treten aber in ihr auf, und zwar steigt die Anzahl sehr rasch an, wenn man zu längeren Wellen im Ultrarot übergeht. Prinzipiell darf man wohl auch mit der Möglichkeit rechnen, daß ein Molekül durch Energie-Übertragung bei einem Stoß den Empfangsapparat des Auges zum Ansprechen bringt, wenn sein Gehalt an kinetischer oder innerer Energie dem eines Quants der sichtbaren Strahlung entspricht. Solche Moleküle gibt es bei Bluttemperatur ebenfalls praktisch nicht. Dagegen gibt es wieder in sehr rasch ansteigender Anzahl Moleküle, deren Energie-Inhalt Quanten des ultraroten Spektralbereiches entspricht. Der Empfangs-Apparat des Auges wird daher nach dem Ultrarot hin mindestens so an Empfindlichkeit abnehmen müssen, wie die Anzahl der Quanten oder die Anzahl der entsprechend energiereichen Moleküle nach dem Ultrarot hin zunimmt. Andernfalls würde eine den Seh-Akt behindernde Dunkelreaktion sich bemerkbar machen.

Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz ist die Zahl der Quanten, die bei einer Temperatur T von einer Seite auf eine Fläche von 1 cm² in 1 sec auffallen,

$$dZ = 2\pi c_1 \lambda^{-4} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) d\lambda .$$

Bei einem idealen Gas ist nach dem Maxwellschen Geschwindigkeits-Verteilungs-Gesetz die Anzahl der Moleküle, die von einer Seite auf 1 cm² in 1 sec auftreffen, gegeben durch den Ausdruck

$$dZ = \pi \left(\frac{\mu}{2\pi k T}\right)^{3/2} n\, v^3 \exp\left(-\frac{\mu v^2}{2 k T}\right) dv .$$

Dabei ist n die Anzahl der Moleküle pro cm³,

μ die Masse des Einzel-Moleküls, v seine Geschwindigkeit.

Bringt man durch den Ansatz $1/2 \mu v^2 = h \nu = h c/\lambda$ die kinetische Energie mit der Wellenlänge eines energiegleichen Quants in Beziehung und ersetzt so in obiger Formel das v durch λ, so erhält man

$$d Z = 2 \pi \left(\frac{\mu}{2 \pi k T}\right)^{3/2} n \left(\frac{h c}{\mu}\right)^2 \lambda^{-3} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) d\lambda,$$

$$c_2 = \frac{h c}{k} = 1{,}432 \text{ cm}^{-1} \text{ Grad}^{-1}.$$

Die Wellenlängen-Abhängigkeit der Anzahl ist also bei den Strahlungs-Quanten durch $\lambda^{-4} \exp(-c_2/\lambda T)$ gegeben, bei den Molekülen durch $\lambda^{-3} \exp(-c_2/\lambda T)$. Bei der Bluttemperatur $T = 273 + 37 = 310°$ K erfolgt daher der Anstieg der schwarzen Quanten proportional

$$\lambda^{-4} \exp\left(-\frac{1{,}432}{\lambda \cdot 310}\right) = \lambda^{-4} \exp\left(-\frac{0{,}00462}{\lambda}\right), \quad (\lambda \text{ in cm})$$

bei den Molekülen proportional zu

$$\lambda^{-3} \exp(-0{,}00462/\lambda).$$

Das ist aber gerade der Ausdruck der oben angeführten empirischen Interpolations-Formel.

Die Tab. 1 zeigt also, daß die Empfindlichkeit des Auges umgekehrt proportional der Anzahl von Molekülen ist, die eine Energie haben, die einem Quant der Wellenlänge λ gleich ist. Der Unterschied zwischen $\lambda^{-3}\exp()$ und $\lambda^{-4}\exp()$ ist in dem Intervall von 0,7 μ bis 1,0 μ nicht sehr groß. Das empirische Material spricht für λ^{-3}.

Die in der Tab. 1 zutage tretenden Abweichungen nach kürzeren Wellen hin hängen damit zusammen, daß die Augenempfindlichkeit bereits verlangsamt zunimmt, um nach Erreichung eines Maximums nach dem Ultraviolett hin abzufallen.

Für obige Betrachtung ist es bedeutungsvoll, auch nach der Absolutzahl der Quanten und Moleküle zu fragen. Wenn man nicht näher auf den Mechanismus der Energie-Aufnahme im einzelnen Empfangselement des Auges eingeht, so dürfte es wohl sinnvoll sein, die das Empfangselement umschließende Fläche in Betracht zu ziehen und daher — wie oben geschehen — nach der Zahl der Quanten oder Moleküle zu fragen, die pro sec auf 1 cm² einer Oberfläche auftreffen.

Aus obigen Gleichungen ergibt sich, daß pro sec auf 1 cm² auftreffen

$2 \cdot 10^{-7}$ Quanten im Bereich 0,695—0,705 μ
und 17 Quanten im Bereich 0,995—1,005 μ.

Diese Werte sind zu klein, um bedeutungsvoll zu sein.*

Für Luft von Atmosphärendruck berechnet sich nach der obigen Formel die Anzahl der Moleküle, die pro sec auf 1 cm² auftreffen, zu

$Z = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ mit einer Energie äquivalent dem Bereich 0,695—0,705 μ,
$Z = 0{,}5 \cdot 10^5$ mit einer Energie äquivalent dem Bereich 0,995—1,005 μ.

Wenn es gestattet ist, diese für ein ideales Gas abgeleiteten Zahlen in erster Näherung auch auf das Innere des Auges mit seiner tausendmal höheren Dichte zu übertragen, so müßte man die angegebenen Zahlen mit dem Faktor 10^{+3} multiplizieren und käme dann zu Werten, die zwar immer noch klein sind, aber doch wohl schon als Begründung für obige Schlüsse gelten dürfen.

Falls man obige Betrachtung als eine physikalische Begründung für das Auftreten der langwelligen Grenze des Auges gelten läßt, so wäre dies ein Beitrag zu den anderen bekannten Anpassungs-Erscheinungen, daß z. B. das Auge sein Empfindlichkeits-Maximum ungefähr dort hat, wo die Intensität des Sonnenlichtes einen Maximalwert aufweist, daß die Größe der Empfangselemente der Netzhaut etwa mit der Größe der Beugungsscheibchen übereinstimmt und daß das dunkel adaptierte Auge in der Nähe seiner Reizschwelle ein solches Helligkeits-Unterscheidungsvermögen besitzt, daß es gerade die spontanen Schwankungen eines aus Photonen zusammengesetzten Lichtstromes nicht mehr wahrnimmt.

* Auch durch eine andere Wahl der Breite des Wellenlängen-Intervalls ändert sich das Bild nicht wesentlich. Zum Beispiel ist die Gesamtzahl aller Quanten unterhalb von 1 μ bei Bluttemperatur 37.