

Sitzungsberichte

der

mathematisch-naturwissenschaftlichen
Abteilung

der

Bayerischen Akademie der Wissenschaften
zu München

1933. Heft III

November-Dezember-Sitzung

München 1933

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung



Blendungs-, Schwellen- und Kontrast-Empfindlichkeit als Grundelemente zur Darstellung der allgemeinen Helligkeitsfunktion des Auges.

Von A. Kühl, München.

Vorgelegt von J. Zenneck in der Sitzung vom 2. Dezember 1933.

Es werden Beobachtungsreihen verschiedener Autoren über Blendungs-, Schwellen- und Kontrastempfindlichkeit zu einer einheitlichen Darstellung zusammengefaßt. Es wird gezeigt, wie diese Zusammenfassung die qualitative und quantitative Erklärung einer Reihe von bisher unverständlichen Beobachtungen ergibt, was als Beweis dafür gelten darf, daß hiermit die allgemeine Helligkeitsfunktion des menschlichen Auges gewonnen ist.

Die Blendungs-Empfindlichkeit ist in Deutschland von Gehlhoff und Schering („Zur Frage der Blendung, insbesondere durch Automobilscheinwerfer“ Z. f. techn. Physik 1923, S. 321 u. f.) messend verfolgt worden. Eine etwas frühere Versuchsreihe am Nuttingschen Sensitometer stammt von Blanchard (vgl. u. a. D. O. W. 1921, S. 936 u. f.). Obgleich alle drei Autoren in der Einleitung zu ihren Arbeiten aussprechen, daß sie im Beginn der Versuche mit einem unbehaglichen Unsicherheitsgefühl bei sich selbst und bei den Beobachtern zu kämpfen hatten, so zeigte sich doch, daß das Gefühl der „unerträglichen Blendung“ ein recht gut definiertes Meßobjekt ist und — obgleich Gehlhoff und Schering a. a. O. betonen, daß die Meßreihe von Blanchard wegen anderer Beobachtungsbedingungen mit ihren Scheinwerferversuchen nicht vergleichbar sei — so zeigt sich doch, daß nach Ausmerzung einiger Rechenfehler in den Tabellen von Gehlhoff und Schering und nach Umrechnung auf gleiche Beleuchtungseinheit ein exakter und sogar quantitativer Vergleich beider Reihen möglich ist.

Wir stellen aus den zusammengefaßten Beobachtungsreihen der genannten drei Autoren die Abhängigkeit des Logarithmus der Blendungs-Flächenhelle ($\log G$) vom Logarithmus der Allgemeinbeleuchtung oder Umfeldbeleuchtung ($\log B$) dar. Es

ergibt sich nach Abb. 1, daß der von Blanchard festgestellte, von Gehlhoff und Schering aber bezweifelte lineare Zusammenhang beider Größen zweifelsfrei allgemein als gute Näherung anzusehen ist.

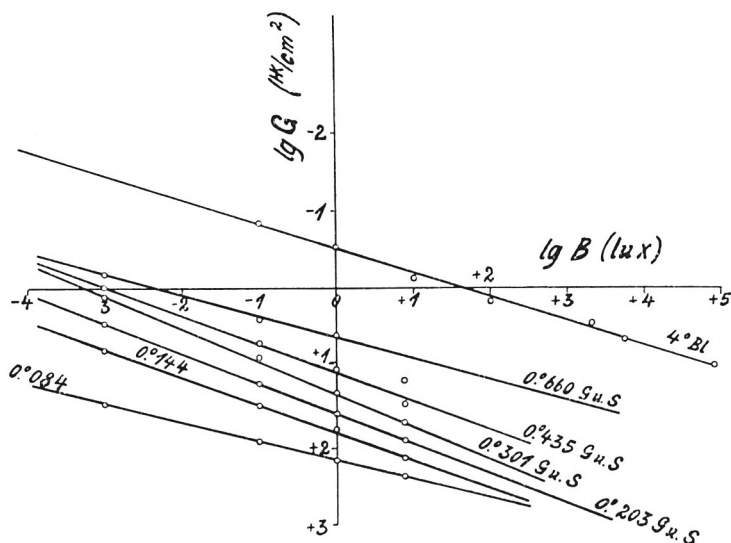


Abb. 1

Abhängigkeit der Blendungsflächenhelle (HK/cm^2) $\lg G$ von der Allgemein- oder Umfeldbeleuchtung (lux) $\lg B$ für blendende Leuchtflächen von scheinbaren Durchmessern zwischen $0^\circ 08$ und 4° .

Gehlhoff und Schering (G. u. S.) haben bei verschieden starker Allgemeinbeleuchtung und für verschieden große scheinbare Durchmesser der kreisförmigen Leuchtfläche an Automobilscheinwerfern den Eintritt der unerträglichen Blendung festgestellt; Blanchard (Bl) stellte die gleiche Untersuchung an, indem er die Blendung an einem quadratischen Prüffeld von $4^\circ \times 4^\circ$ beobachten ließ, das inmitten eines etwa $60^\circ \times 60^\circ$ großen quadratischen Umfeldes mit variabler Lichtstärke angebracht war.

Stellt man andererseits die Abhängigkeit des Logarithmus der Blendungs-Flächenhelle ($\log G$) vom scheinbaren Durchmesser der Leuchtfläche dar, so ergibt sich Abb. 2, d. h. die von Gehlhoff und Schering (a. a. O. S. 327) angegebene Darstellung durch Hyperbeln gilt nur als Näherung für kleine Leuchtflächen.

Vergleicht man nun mit der Kurve für $\log B = -3$, d. h. für die geringste vorhandene Umfeldbeleuchtung aus Abb. 2 die Beobachtungen über die Abhängigkeit der Schwellenreize von der Objektgröße, wie sie nach Loeser für scheinbare Objektdurchmesser von $0^{\circ}036$ bis $0^{\circ}145$ und nach Henius und Fujita für Durchmesser von 1° bis 30° im „Handbuch d. physiol. Optik“ von Helmholtz (3. Aufl. Bd. 2, S. 284 und 285) — leider in relativen Einheiten der Beleuchtungsstärke — angegeben sind, indem man die Reihe von Loeser für den Durchmesser $0^{\circ}145$

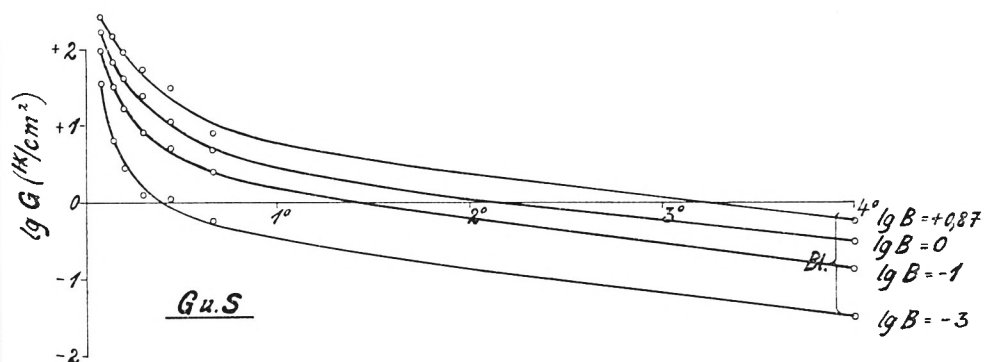


Abb. 2

Abhängigkeit der Blendungsflächenhelle (HK/cm^2) $\lg G$ vom scheinbaren Durchmesser der blendenden Leuchtfläche bei verschiedener Umfeldbeleuchtung ($\lg B$) in lux.

Die Beobachtungen für Durchmesser von $0^{\circ}08$ — $0^{\circ}66$ stammen von Gehlhoff und Schering (G u. S), die für den Durchmesser 4° von Blanchard (Bl).

und die von Henius und Fujita für den Durchmesser 4° an die genannte Kurve angleicht, so erhält man Abb. 3. Es stellt sich also heraus:

Der funktionelle Zusammenhang zwischen scheinbarem Durchmesser der Leuchtfläche und der Flächenhelle ist für Schwellenreize und Blendungsreize derselbe; er muß also im ganzen Arbeitsbereich des menschlichen Auges gelten.

Man kann das auch anders aussprechen, und dadurch wird die Tragweite, die wir diesem Ergebnis als Grundlage des Folgenden zuerkennen wollen, wohl noch prägnanter herausgekehrt:

Wenn das Auge in irgendeinem Adaptionszustand einen Schwellenreiz empfängt, so entspricht dem die „kleinste“ Helligkeitsempfindung, wenn es in irgendeinem Adaptionszustand geblendet wird, so entspricht dem die „größte“ Helligkeitsempfindung, deren das Auge fähig ist und bei der ein Unstetigkeitsgebiet der Helligkeitsfunktion beginnt.

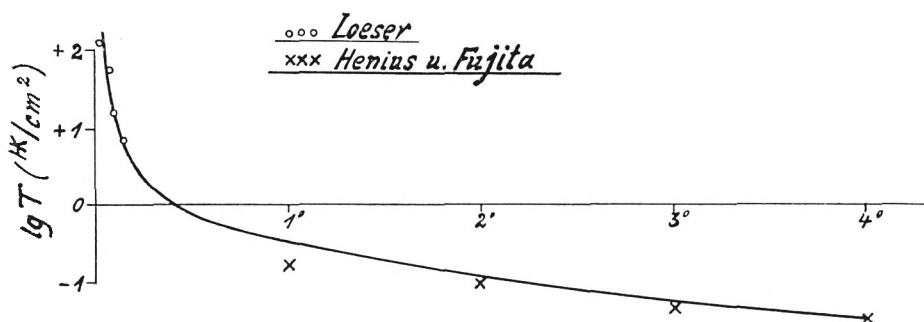


Abb. 3

Die Abhängigkeit der Reizschwellen-Flächenhelle (HK/cm^2) $\lg T$ vom scheinbaren Durchmesser der Leuchtfläche nach Loeser ooo und Henius, Fujita xxx im Vergleich zur entsprechenden Blendungsflächenhelligkeitskurve für $\lg B = -3$ aus Abb. 2.

Die Beobachtungen von Loeser sind der Kurve für $\Phi = 0.145$ und die Beobachtungen von Henius, Fujita für $\Phi = 4^0$ angeglichen.

Die Kurven der Abb. 2 stellen in dieser Auffassung ihrem Charakter nach ganz allgemein „Kurven gleicher Helligkeit“ für verschieden große Objekte und für alle möglichen Adaptionszustände des menschlichen Auges dar. Der Übergang von einer Kurve zu anderen, d. i. von einem Adaptionszustand in den anderen, erfolgt nach Abb. 1 für die Blendungsgrenze linear mit dem Logarithmus der Allgemeinbeleuchtung. Dieser Übergang kann aber im allgemeinen natürlich nur angenähert linear sein, soweit eben das Fechnersche Gesetz in seiner üblichen Formulierung als Annäherung gilt.

Eine ausführliche Beobachtungsreihe zum Fechnerschen Gesetz von Koenig und Brodhun konnte durch eine neue Untersuchung über den Wert des eben merkbaren Beleuchtungszuwachses von Blanchard (a. a. O.) voll bestätigt werden. Wir geben die Beobachtungen durch die Kurve $\lg \Delta B$ der Abb. 4 in der Fassung nach Blanchard wieder, wobei zu beachten ist, daß hier die Einheit der Flächenhelle das Millilambert (ml) ist.

Von einer angenäherten Konstanz des Fechnerschen Quotienten ist daher und bekanntlich nur zwischen den Flächenhellen 1 bis 1000 die Rede. Durch Diskussion der Zuordnung von $\lg \Delta B$ in Abhängigkeit von $\lg B$ zeigte sich mir aber, daß eine gute Darstellung durch folgende Gleichung möglich ist:

$$(1) \quad \lg \Delta B = + 0,85 \lg B + 0,05 \lg^2 B - 1,68.$$

Setzt man zur Abkürzung:

$$\begin{aligned} c \cdot 10^{1.68} \cdot l 10 &= \alpha \\ 0,15 \cdot l 10 &= \beta \\ 0,05 \cdot l 10 &= \gamma, \end{aligned}$$

so ergibt sich für die Helligkeit folgendes Differential in Abhängigkeit vom Logarithmus der Flächenhelle:

$$dH = \alpha \cdot e^{\beta \lg B - \gamma \lg^2 B} d \lg B$$

und hieraus das Integral

$$(2) \quad H = \alpha \int_{-\infty}^{\lg B} e^{\beta \lg B - \gamma \lg^2 B} d \lg B$$

das sich im allgemeinen nur mit Hilfe einer Reihenentwicklung darstellen läßt. Interessant ist aber zu bemerken, daß

$$(3) \quad H_{\infty} = \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\beta \lg B - \gamma \lg^2 B} d \lg B = c \cdot 746$$

d. h. also, daß nach dieser Darstellung die Helligkeitsempfindung auch bei beliebigem Anwachsen der Beleuchtungsstärke einem endlichen Maximum zustrebt. Der Grund liegt formal darin, daß mit stark wachsendem B auch der Fechnersche Quotient $\frac{\Delta B}{B}$ wieder stark anwächst und sich der Einheit nähert. Tatsächlich

kann ja auch die Helligkeitsempfindung über die Empfindung der Blendung nicht mehr hinauswachsen.

Sehr ähnlich mit der Kurve des notwendigen Beleuchtungszuwachses für einen eben merkbaren Helligkeitszuwachs $\lg \Delta B = f(\lg B)$ verläuft die Kurve der Schwellenreize ($\lg T$) für eine bestimmte Objektgröße bei verschiedenen Adaptionszuständen. Wir stellen diese Zahlen, zusammen mit der Kurve der Blendungsflächenhelle für ungefähr gleiche Objektgrößen, nach

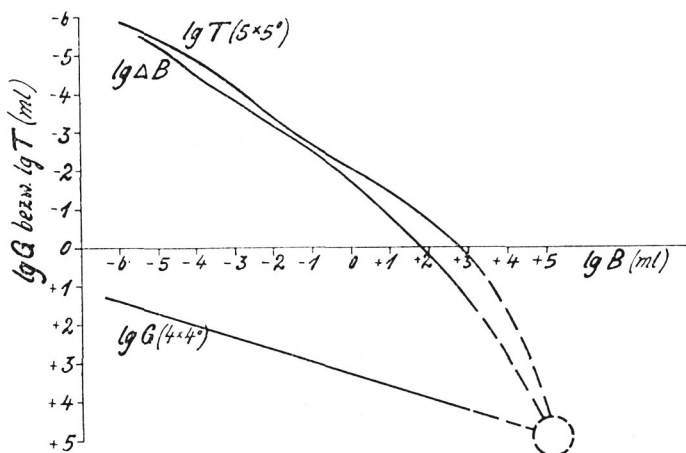


Abb. 4

a) Abhängigkeit des für einen eben merkbaren Helligkeitsunterschied nötigen Beleuchtungszuwachses ($\lg \Delta B$) von der Beleuchtungsstärke ($\lg B$) in Millilambert (ml).

Blanchard stellte an einem in zwei Hälften geteilten Prüffeld von $5^0 \times 5^0$ fest, bei welchem Beleuchtungsunterschied ($\lg \Delta B$) ein eben merklicher Helligkeitsunterschied beider Teilfelder auftritt. Die Kurve $\lg \Delta B$ stellt die Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke $\lg B$ des helleren Teilfeldes dar, was für kleine Werte von $\lg B$ zu beachten ist!

b) Abhängigkeit der Schwellenflächenhelle $\lg T$ (in ml) für eine Leuchfläche von $5^0 \times 5^0$ von der Flächenhelle $\lg B$ (in ml) eines $60^0 \times 60^0$ großen Umfeldes, auf die das Auge $3/4$ Stunden adaptiert war (unmittelbar nach Verlöschen der Umfeldbeleuchtung).

c) Abhängigkeit der Blendungsflächenhelle $\lg G$ (in ml) für eine Leuchfläche von $4^0 \times 4^0$ von der Flächenhelle $\lg B$ (in ml) eines $60^0 \times 60^0$ großen Umfeldes nach $3/4$ stündiger Adaption an $\lg B$ (nach Abb. 1).

diesem Schnittpunkt entsprechenden Allgemeinbeleuchtung (Adaption) ist die Allgemeinbeleuchtung schon blendend und das Auge so belastet, daß auch der Schwellenreiz schon blendend sein muß, um überhaupt bemerkt zu werden, m. a. W. der Schnittpunkt gibt das vorher rechnerisch aufgezeigte Maximum der Helligkeitsempfindung für diese Objektgröße an und ist selbst schon Beginn des Unstetigkeits-Bereiches der Helligkeitsempfindung.

Den Zusammenhang dieser Kurven mit den vorher gezeigten Abb. 1—3 kann man sich im Sinne unserer Auffassung am besten verdeutlichen, wenn man sie in ihrer Gesamtheit in einem dreidimensionalen Koordinatensystem darstellt.

Wir wählen die X -Achse zur Darstellung der scheinbaren Objektgröße; die Y -Achse zur Darstellung der Objekt-Flächenhelle ($\log G$), die Z -Achse zur Darstellung der Umfeldbeleuchtung (des Adaptionzustandes $\log B$).

Man erhält, wie Abb. 5 zeigt, durch eine unserer Auffassung entsprechende Ergänzung des Beobachtungsmaterials einen eigenartigen von zwei Kegelmänteln eingeschlossenen Raum als Bereich für die allgemeine Helligkeitsfunktion des menschlichen Auges bei beliebiger Adaption und beliebiger Beleuchtung verschieden großer Objekte. Der innere Kegelmantel ist gebildet durch die Geraden, welche bei konstanter Objektgröße nach Abb. 1 den Zusammenhang zwischen Blendung und Adaptionzustand darstellen. Der äußere Kegelmantel wird gebildet durch die Kurven der Reizschwellen in Abhängigkeit vom Adaptionzustand nach Abb. 4. Von diesen Kurven ist bisher nur eine für Objektgrößen von ungefähr $4^0 \times 4^0$ numerisch festgelegt. Daß die Extrapolation der Reizschwellenkurven nach Abb. 4 zu dem Unstetigkeitspunkt (Schnittpunkt) mit der Geraden der Blendungsgrenze führt, ist in Abb. 5 durch asymptotisches Vermeiden dieses Schnittes angedeutet. Durch stärkeres Hervorheben der entsprechenden Kurven ist das nach den bisherigen Untersuchungen vorliegende Zahlenmaterial angedeutet, damit klar ersichtlich wird, inwieweit unsere Auffassung über den bisher numerisch gut gesicherten Grund hinausgreift.

Um möglichst klar zu bleiben, heben wir angesichts dieser Abbildung noch einmal hervor, daß unserer Auffassung nach die

Begrenzungsflächen des keilförmigen Raums Flächen gleicher Helligkeitsempfindung sind, und zwar daß der äußere Kegelmantel die geringstmögliche Helligkeitsempfindung darstellt, während der innere Kegelmantel die größtmögliche Helligkeitsempfindung (Blendungsgrenze) anzeigt. Außerhalb des gezeichneten Raums ist das menschliche Auge einer positiven bzw. stetigen Helligkeitsempfindung nicht mehr fähig, weil auf der einen Seite das Auge wegen zu geringen Reizes nicht mehr anspricht, auf der anderen Seite aber wegen übermäßig großen Reizes beschädigt würde.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Frage nach den Kurven gleicher Helligkeitsempfindung, welche den Übergang zwischen dem äußeren und inneren Kegelmantel ermöglichen. Um keinen Denkfehler zu begehen, muß man sich aufs deutlichste vergegenwärtigen, daß irgendeine Niveaufläche parallel zur X - Y -Ebene einen bestimmten Adaptionszustand des Auges bedeutet. Für eine bestimmte Objektgröße ist der für eine gerade merkbare Helligkeitszunahme nötige Beleuchtungszuwachs durch die Reihen von Koenig und Brodhun sowie von Blanchard festgestellt. Solange an dem betreffenden Adaptionszustand festgehalten wird, bleibt nach unserer Auffassung die Größe $\Delta \log B$ konstant, d. h. wenn man in gleichen logarithmischen Schritten in einem bestimmten Adaptionsniveau vom Schwellenreiz bis zum Blendungsreiz fortschreitet, so erhält man Punkte gleicher Helligkeitsdifferenzen. Der Mittelpunkt ist also der Punkt mittlerer Helligkeit zwischen Schwellen- und Blendungsreiz. Verbindet man daher im Schnitt für eine bestimmte Objektgröße die Mittelpunkte zwischen Schwellen- und Blendungsreiz in den verschiedenen Adaptionsniveaus, so erhält man die Kurve der mittleren Helligkeitsempfindung für alle Adaptionszustände als Kurve gleicher, und zwar in der Mitte zwischen Schwelle und Blendung liegender Helligkeitsempfindung. Wir werden diese Kurve lediglich zur bequemen Abkürzung die „Graukurve“ nennen. Es ist selbstverständlich, daß nun durch entsprechende weitere Unterteilung des Raums zwischen Schwellenkurve und Graukurve einerseits und zwischen Graukurve und Blendungsgeraden andererseits beliebig viele weitere Kurven gleicher Helligkeitsempfindung angebbar sind. Durch gleich-

artige Unterteilung anderer Schnitte für konstanten Objektdurchmesser erhält man die den ganzen Helligkeitsempfindungsraum aufspaltenden Flächen gleicher Helligkeit. Die funktionelle Darstellung dieser Helligkeits-Koordinaten dürfte nicht ganz einfach sein. Ich habe sie aus naheliegenden Gründen noch nicht versucht, weil zunächst der Beweis für die Richtigkeit und Fruchtbarkeit der ganzen Auffassung zu liefern ist.

Es ist m. E. grundlegend wichtig darauf hinzuweisen, daß die so konstruierten Kurven gleicher Helligkeitsempfindung in einem Schnitt für irgendeine bestimmte Objektgröße keineswegs mit den Kurven zusammenfallen, welche man erhält, wenn man in jedem Adaptionsebene die gleiche Anzahl $\Delta \lg B$ aus (Gl. 1) abträgt. Das ist im ersten Augenblick befremdend und scheint ein Widerspruch gegen unsere Auffassung, aber bei näherem Zusehen bedeutet es nichts anderes, als daß die übliche Prüfung des Fechnerschen Gesetzes in unserer Darstellung besondere Bedingungen innehält. Sie setzt nämlich voraus, daß sich das Auge zugleich an den vorgenommenen Beleuchtungszuwachs adaptiert, sie prüft also in Wahrheit den Wert: $\left(\frac{\partial H}{\partial \lg G} \right)_{G=B}$. Zur Beleuchtung der inneren Widerspruchslosigkeit dieser Darstellung dient auch die Beantwortung der Frage nach dem Integrationsweg des vorher angegebenen Integrals für die maximale Helligkeitsempfindung in der Darstellung von Abb. 5. Eine Rückerinnerung an Abb. 4 zeigt, daß in jedem Adaptionsebene der nötige Beleuchtungszuwachs für einen eben merkbaren Helligkeitserfolg größer ist als der Beleuchtungszuwachs, der auf den benachbarten Schwellenreiz hinführt, mit anderen Worten: man verläßt bei der Integration die Kurve der Schwellenreize unter einer gewissen Neigung in Richtung auf die Gerade des Blendungsreizes. Der Integrationsweg selbst ist leicht anzugeben, wenn man sich wie oben sagt, daß ja der Bedeutung der $\Delta \lg B$ gemäß nach jedem merkbaren Helligkeitserfolg zugleich das der neuen Beleuchtung entsprechende Adaptionsebene erreicht werden soll, d. h. daß stets die Beleuchtung ($\lg B$) als „Adaptionsebene“ gelten soll, welche dem gerade erreichten $\lg G$ entspricht. So ergibt sich als Integrationsweg sofort die unter 45° geneigte geradlinige Verbindung zwi-

schen dem geringsten überhaupt festgestellten Schwellenreiz bei $\log T = -6$ und dem stärksten, dem Unstetigkeitsschnittpunkt entsprechenden Blendungsreiz $\log G = \text{etwa } +5$ und damit auch die Bedeutung des vorher erwähnten Differentialquotienten:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial \lg G} \right)_{G=B.}$$

Den Beweis für die Haltbarkeit der Darstellung sehe ich außer in ihrer zwangsfreien inneren Folgerichtigkeit in dem nun zu zeigenden Umstand, daß sie mit großer Leichtigkeit ein bisher unverständliches Gebiet von Beobachtungstatsachen zu erklären gestattet, qualitativ und quantitativ, nämlich den Helligkeitskontrast. Hering („Lehre vom Lichtsinn“ S. 118 f.) führt zur Kennzeichnung der wichtigsten Beobachtungstatsachen beim Helligkeitskontrast drei Fundamentalversuche an, welche das Aussehen von zwei „grauen“ Teilflächen auf nebeneinanderliegendem schwarzen bzw. weißen Grunde betreffen:

1. Wenn beide grauen Teilflächen objektiv gleich beleuchtet sind, so erscheint die Teilfläche auf weißem Grunde erheblich dunkler als die Teilfläche auf schwarzem Grunde.

2. Wenn die Beleuchtung der grauen Teilfläche auf weißem Grunde soweit verstärkt wird, bis beide Teilflächen gleich hell aussehen, und es wird dann die Beleuchtung des schwarzen und weißen Umfeldes proportional herabgesetzt, so erscheint die Teilfläche auf dem weißen Untergrunde heller als die auf schwarzem.

3. Wenn die beiden Teilflächen wie unter 2. gleich hell aussehend gemacht sind und es wird ihre Beleuchtung um den gleichen Betrag vermindert, so erscheint die Teilfläche auf weißem Grunde wiederum heller als die auf schwarzem.

Zur Erklärung zeigen wir in Abb. 6 ein Schnittbild für eine bestimmte Objektgröße (Teilflächen-Größe) durch den in Abb. 5 skizzierten Raum der Helligkeitsfunktion des menschlichen Auges, etwa einen Teil des der Abb. 4 entsprechenden Schnittes mit einigen Kurven gleicher Helligkeitsempfindung. Nehmen wir etwa zur Veranschaulichung an, daß die Flächenhelle des schwarzen Umfeldes durch $\log B = -1$ und die des weißen Umfeldes durch $\log B = +1$, während die Beleuchtung der beiden zunächst objektiv gleichen Teilfelder durch den Betrag $\log G = 0$ gekennzeichnet sei, dann gehört die Teilfläche für

das auf das schwarze Umfeld adaptierte Auge der Niveaulinie durch A (vgl. Abb. 6) an und die Teilfläche für das auf das weiße Umfeld adaptierte Auge der Niveaulinie B an. Die Teilfläche auf dem weißen Umfeld müßte also in ihrer Beleuchtung um den Betrag $B C = \Delta \lg G = 0,94$ vermehrt werden, um gleich hell zu erscheinen, wie die Teilfläche auf dem schwarzen Umfeld (1. Versuch Herings).

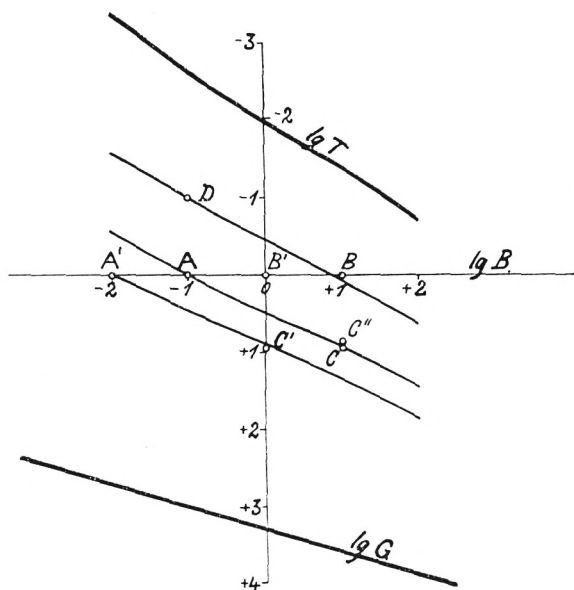


Abb. 6

Zur quantitativen Erklärung der Heringschen Fundamentalversuche zum simultanen Helligkeitskontrast.

Wenn jetzt die Beleuchtung der Umfelder proportional vermindert wird, etwa indem beide Umfelder um $\Delta \log B = -1$ verdunkelt werden, so wandert die Helligkeitslinie A nach A' und B und C wandern nach $B' C'$. Man sieht, daß der Punkt C' in der Abb. 6 unterhalb der durch A' gelegten Kurve gleicher Helligkeit liegt, d. h. das dem Punkt C' entsprechende Teilfeld auf dem weißen Untergrund erscheint um den ablesbaren entsprechenden Beleuchtungsbetrag $\Delta \lg G = 0,08$ heller (Herings 2. Versuch).

Vermindert man die Beleuchtung der Teilfelder um gleiche Absolutbeträge, etwa indem man die Beleuchtung des auf dem schwarzen Umfeld liegenden Teilfeldes um $\Delta \log G = -1$ vermindert, so fällt der dem schwarzen Teilfeld entsprechende Punkt von A nach D .

Hierbei ist die Beleuchtung des Teilfeldes auf dem schwarzen Umfeld von $\log G = 0$, also $G = 1$ auf $\log G = -1$, also $G = 0,1$ gesenkt worden, d. h. um ΔG gleich 0,9. Die Beleuchtung des gleich hell erscheinenden Teilfeldes auf dem weißen Umfeld ist aus der Ordinate des Punktes C zu $\log G = 0,94$ festzustellen, also $G = 8,71$. Eine Verminderung um 0,9 führt auf $G = 7,81$, also $\log G = 0,89$, d. h. in der Zeichnung zu dem Punkt C'' . Dieser liegt unterhalb der durch D gehenden Helligkeitslinie, also erscheint das Teilfeld auf dem weißen Umfeld entsprechend dem ablesbaren Betrag $\Delta \lg G = 0,80$ heller (Herings 3. Versuch).

Selbstverständlich ist der Zustand des Auges bei der wirklichen Ausführung des Heringschen Versuches nicht so, daß das Auge auf das schwarze bzw. weiße Umfeld vollkommen adaptiert sei, sondern es bewegt sich mit kleinen Schwankungen der Adaption um einen mittleren Adaptionszustand herum. Wie groß diese Adaptionsschwankungen sind, läßt sich numerisch an Hand von Abb. 6 sofort feststellen, wenn die Flächenhelle der beiden Versuchsfelder und die zum Ausgleich nötige Vermehrung der Helligkeit des Teilfeldes auf dem weißen Umfeld bekannt sind, was ja z. B. durch eine der von C. v. Heß angegebenen Versuchsanordnungen ohne weiteres möglich ist. Man braucht dann nur die im Versuch erhaltenen Teilbeträge als Multiplikatoren neben die hier abgelesenen Beträge BC und BC'' zu setzen, um auch quantitativ die Heringschen Fundamentalversuche zum Simultankontrast aufgeklärt zu haben. (Die Abweichungen C' von der Helligkeitslinie A' und die Differenz CC'' bleiben dabei erhalten.)

Es darf hier angedeutet werden, daß der von mir früher behandelte Grenzkontrast nach meiner Auffassung in gleicher Weise als Differenzialerscheinung aus der vorliegenden Darstellung erklärbar wird.

Hiermit dürfte, soweit die heutigen Beobachtungstatsachen

reichen, der Beweis für das qualitative und quantitative Zutreffen der ganzen obigen Darstellung gegeben sein.

Die Variable der Zeit, welche ja in der physiologischen Optik eine bedeutende Rolle spielt, läßt sich leider explizite in dieser Darstellung nicht unterbringen. Wenn das Auge auf irgendein Adaptionsniveau durch einwirkende Beleuchtung gehoben ist und nach plötzlichem Verlöschen der Beleuchtung in gewissen Zeitabständen auf Schwellenreize hin untersucht wird, so bewegt es sich mit einer Geschwindigkeit, welche von der Verweilungszeit im Adaptionsniveau abhängt längs der zugehörigen Kurve der Schwellenreize. Man nennt bekanntlich diesen funktionellen Zusammenhang zwischen Zeit und Schwellenreiz Dunkeladaption. Den umgekehrten Weg nennt man Helladaption. Sie entspricht einem anderen funktionellen Zusammenhang zwischen Zeit und Schwellenreiz, d. h. einer anderen Bewegungsgeschwindigkeit der Schwellenreizempfindlichkeit längs der zugehörigen Schwellenreizkurve. Man darf also allgemein sagen, wenn das Auge nach mehr oder weniger langer Einwirkung irgendeines Beleuchtungsreizes sich selbst überlassen wird, so sinkt sein Adaptionszustand mit einer Geschwindigkeit, welche Funktion der Reizgröße und ihrer zeitlichen Einwirkung ist, von Adaptionsniveau zu Adaptionsniveau ab. Wenn man also die gezeichneten Kurven gleicher Helligkeit mit einer von dem Ausgangszustand des Auges abhängigen Geschwindigkeit zurückgelegt denkt, so kann man diese Kurven bzw. die von ihnen gebildeten Flächen auch als Adaptionskurven bzw. -flächen bezeichnen.

Denkt man sich schließlich noch die Koordinaten der Helligkeitsfunktion nach der Farbe variiert, so erkennt man, daß unsere Darstellung die Grundlage bietet, um sämtliche bisher bekannten Beobachtungstatsachen aus dem Gebiete der Gesichtsempfindungen abzuleiten.

Insbesondere wollen wir auf die zwangslose Ableitung der merkwürdigen Tatsache hinweisen, daß von zwei verschiedenen Reizen bei proportionaler Vermehrung ihrer Flächenhelle der schwächere dunkler wird (z. B. Vertiefung der Schatten beim Übergang vom Morgengrauen zum vollen Tageslicht). Nehmen wir beispielsweise an, der schwächere der beiden Reize

sei der Schwellenreiz, der stärkere sei der Blendungsreiz im niedrigsten Adaptionsniveau (sie liegen dann in Abb. 4 etwa in den linken Anfangspunkten der Kurven $\lg T$ und $\lg G$ bzw. in Abb. 5 an den unteren Anfangspunkten der Kurve V und der Geraden III). Proportionale Vermehrung der Beleuchtung (und entsprechender Anstieg des Adaptionsniveaus) bedeutet in Abb. 4 und 5 Bewegung längs irgendwie geneigter paralleler Geraden. Angenommen, die Vermehrung der Beleuchtung und der Anstieg des Adaptionsniveaus seien derart, daß der Blendungsreiz sich auf der Geraden $\lg G$ fortbewegt, dann bewegt sich der anfängliche Schwellenreiz längs einer Parallelen zu der Geraden $\lg G$, d. h. in diesem Falle längs der Tangente im Anfangspunkt der Kurve $\lg T$. Er fällt also — je stärker die Beleuchtung wird — um so mehr aus dem Raum der Helligkeitsempfindung heraus; er wird unterschwellig, also dunkler als zuvor, während der Blendungsreiz trotz Vermehrung der Beleuchtung gleichhell bleibt. Formal liegt die quantitative Erklärung dieser Erscheinung darin, daß die Kurven gleicher Helligkeit in Abb. 4 und Abb. 6 eine von der Kurve $\lg T$ gegen die Kurve $\lg G$ abnehmende Neigung gegen die Abszissenachse haben. Es läßt sich also — wenn die proportionale Beleuchtungszunahme und der Adaptionsanstieg längs einer Geraden erfolgt, deren Neigung zwischen den beiden Extremen liegt, stets eine Helligkeit angeben, die trotz der Beleuchtungsvermehrung gleich bleibt (in obigem schematischen Beispiel ist es die Blendungshelligkeit). Diese gleichbleibende Helligkeit (Hering nennt sie ein „mittleres Grau“) variiert also mit der Art des Beleuchtungs- und Adaptionsanstieges (und ist nicht etwa identisch mit unserer „Graukurve“ in Abb. 5). Aus dem obigen schematischen Beispiel, d. h. dem Betrag des Unterschwelligwerdens des anfänglichen Schwellenreizes bei vermehrter Beleuchtung und Adaptionshebung läßt sich übrigens durch sinngemäße Extrapolation der Kurven gleicher Helligkeit über die Kurve der Reizschwellen hinaus auch die Hering'sche Schwarzempfindung formal und quantitativ zwanglos abstufen, was mir recht wichtig erscheint.

Auf die Fülle der übrigen Beobachtungstatsachen, die in unserer Formulierung der allgemeinen Helligkeitsfunktion nicht

nur qualitativ, sondern auch quantitativ faßbar werden — z. B. Helligkeit von Objekten im Fernrohr, Ausmerzungen gewisser systematischer Fehler in der astronomischen Sternhelligkeitsskala, exakter Vergleich der Helligkeit ausgedehnter Lichtquellen, z. B. der Sonne mit punktförmigen z. B. Fixsternen usw. usw. — soll nur andeutend hingewiesen werden.

Bezüglich der Helligkeitseinheit hat man natürlich wegen der willkürlichen Integrationskonstanten völlig freie Hand. Mir scheint dazu folgendes beachtenswert: Das Integral für die Helligkeit (s. Gl. 2) längs der mit $\int dH$ beschriebenen Geraden in Abb. 5 ist, wie bemerkt, nur durch Reihenentwicklung möglich. Andererseits gilt in jedem Adaptionniveau $\frac{\partial H}{\partial \lg G} = \text{const}$, also streng die bisherige Formulierung des Fechnerschen Gesetzes: $\partial H = c \partial \lg G$ (aber mit einer von der Adaption abhängigen Konstanten). Da nun die Gerade $\int dH$ in Abb. 5 alle Kurven gleicher Helligkeit schneidet, so läßt sich der Wert des Helligkeitsintegrals (Gl. 2) für jede beliebige Stelle auch errechnen aus dem Ersatzintegral $H = c \lg G$ erstreckt bis zum Schnittpunkt der Geraden $\int dH$ mit dem Adaptionniveau, welches der gerade vorgeschriebenen oberen Grenze des Integrals Gl. 2 entspricht. Die Integrationskonstanten aber für das Integral Gl. 2 und für die Ersatzintegrale müssen einerseits so festgesetzt werden, daß ihre Werte an den Schnittpunkten der Geraden $\int dH$ in Abb. 5 mit den Adaptionsniveaugeraden einander gleich werden und können andererseits leicht so festgesetzt werden, daß eine beliebige allgemein anerkannte Helligkeitseinheit, z. B. die der Sterngrößen resultiert.