8. Ueber die Farbenempfindlichkeit des Auges; von A. Pflüger.

Dass die Empfindlichkeit des Auges für Licht verschiedener Wellenlängen verschieden ist, hat zuerst Hr. Ebert¹⁾ beobachtet. Er geht aus von der Entdeckung der Herren H. F. Weber²⁾ und F. Stenger³⁾, dass, entgegen dem Draper'schen Gesetz, sehr viele Körper schon bei niedrigeren Temperaturen als 500° C. beginnen, Licht auszusenden, und dass dieses Licht nicht von roter, sondern grauer Farbe ist; ferner von der Thatsache, dass viele Spectra der gasförmigen Nebelflecke nur die grünen Linien des Wasserstoffs und Stickstoffs zeigen. Es gelingt ihm, experimentell zu zeigen, dass das Auge empfindlicher ist für das grüne Licht, wie für die übrigen Wellenlängen, und darum in einem lichtschwachen Spectrum im allgemeinen nur das Grün wahrnehmen wird.

Die Details der Untersuchung sind die folgenden. Der Spalt eines Spectrometers wird von einer Lichtquelle erleuchtet. Das Auge blickt durch einen, in der Brennebene des Fernrohrobjectivs angebrachten Ocularspalt, der aus dem dort entworfenen reellen Spectrum einen schmalen Streifen ausblendet. Infolge dessen sieht es die Vorderfläche des Prismas in spectrumalem Lichte leuchten. Das Licht wird nun messbar geschwächt, bis das Auge absolut keinen Eindruck mehr empfängt, und der zugehörige Bruchteil der ursprünglichen Intensität bestimmt. Wiederholt man diese Messung für verschiedene Wellenlängen, so variirt dieser Bruchteil erheblich, so zwar, dass er im Grün ein Minimum erreicht. Kennt man dann noch die Energieverteilung im Spectrum der Lichtquelle, so kann man offenbar diejenigen relativen Energiemengen für die verschiedenen Wellenlängen bestimmen, die im Auge eben noch eine merkliche Empfindung auslösen. Dies ist die *eben untermerkliche* Schwelle der Empfindung.

1) H. Ebert, Wied. Ann. **33**. p. 136. 1888.

2) H. F. Weber, Wied. Ann. **32**. p. 256. 1887.

3) F. Stenger, Wied. Ann. **32**. p. 271. 1887.

Es zeigt sich nun, dass dieser Schwellenwert kleiner ist, als der *eben übermerkliche*, d. h. das Auge vermag einen stetig sich vermindernenden Lichtreiz bis zu einer Intensität hinab zu verfolgen, die kleiner ist, als diejenige Intensität, bei der ein neu auftauchender, und sich verstärkender Reiz zuerst empfunden wird. Es wird darum auch derjenige Bruchteil der Intensität gemessen, bei dem das Auge zuerst die Prismenfläche leuchten sieht, wenn die Intensität von Null allmählich ansteigt und das geometrische Mittel aus beiden als *eben merklicher* Schwellenwert bezeichnet.

Die Energieverteilung im Spectrum der benutzten Lichtquelle, einer Gasflamme, wird, entsprechend den damaligen Hilfsmitteln, auf sehr umständlichem Wege bestimmt. Es wird zunächst die Arbeit des Hrn. O. E. Meyer¹⁾ angezogen, der die Intensität des Gaslichtes spectrophotometrisch mit der der Sonne verglichen hatte. Aus den Bestimmungen des Hrn. Langley über die Energieverteilung im Sonnenspectrum konnte dann diejenige im Spectrum der Gasflamme abgeleitet werden. Es liegt auf der Hand, dass die Fehler hier ganz erhebliche werden können.

Die Messungen erfolgten für nur fünf verschiedene Wellenlängen, und für nur zwei Beobachter. Die Form der Curve konnte also nur ganz roh bestimmt, etwaige Unregelmässigkeiten ihres Verlaufes konnten kaum erkannt werden. Auch lässt sich aus der Thatsache der angenäherten Uebereinstimmung der Ergebnisse für die beiden Beobachter kein allgemeiner Schluss ziehen. Hierzu ist mehr Material erforderlich.

Eine andere Methode hat Hr. Langley²⁾ angewandt. Er misst für verschiedene Wellenlängen die Intensität des Lichtes, bei der das Auge noch eben eine feine Druckschrift zu lesen vermag. Als Lichtquelle diente die Sonne, deren spectrale Energieverteilung bekannt ist. Hr. Langley vermeidet also die Hauptfehler der Ebert'schen Messungen, doch ist seine Methode wohl der Ebert'schen unterlegen. Er findet erheb-

1) O. E. Meyer, Zeitschr. f. angew. Elektrizitätslehre 1. p. 320. 1879.

2) S. P. Langley, Phil. Mag. 5. 27. p. 1. 1889.

liche Verschiedenheiten zwischen den einzelnen Beobachtern. Die Curven zeigen für jede einzelne Versuchsperson ein glattes Ansteigen der Empfindlichkeit vom Rot und Violett bis zum Grün, können aber, da sie nur für sieben Punkte des Spectrums festgelegt sind, etwaige Unregelmässigkeiten kaum vertragen. Die Einzelwerte zeigen im Rot Abweichungen bis zu 1000 Proc. von den Ebert'schen, soweit überhaupt eine Vergleichung zulässig ist.

Eine weitere Untersuchung stammt von Hrn. Abney.¹⁾ Er misst, sofern ich die Arbeit verstanden habe, denjenigen Bruchteil der Intensität der Lichtquelle, bei dem ein von ihr beleuchtetes Kartenblatt nicht mehr gesehen wird. Die Messungen sind nur an einer Person ausgeführt, und nicht auf die spectrale Energieverteilung bezogen; sie können also zur Vergleichung nicht in Betracht kommen.

Endlich hat A. König²⁾ das Helligkeitsverhältnis verschiedener Regionen desselben Spectrums durch directe photometrische Vergleichung bestimmt. Die Messung erfolgte für verschiedene Intensitäten der Lichtquelle und diente der Untersuchung des Purkinje'schen Phänomens. Für uns kommt zur Vergleichung nur die Messungsreihe für die „untere Reizschwelle, Helligkeitsstufe S“ in Betracht. Die spectrale Energieverteilung wurde berücksichtigt. Die Beobachtungen wurden für zwei Personen und für 14 Curvenpunkte gemacht, es wurde aber keine Unregelmässigkeit im Verlauf der Curven und keine erhebliche Differenz zwischen verschiedenen Augen gefunden. Vielmehr betont König, dass bei der unteren Reizschwelle (im Gegensatz zu den grösseren Helligkeiten) nur geringe individuelle Verschiedenheiten vorzukommen scheinen. Bei Beurteilung der Methode müssen alle Schwierigkeiten der Photometrie verschieden gefärbter Lichtquellen berücksichtigt werden.

Bei diesem Stande der Frage schien eine sorgfältige Neuuntersuchung wünschenswert, der ich mich auf Anregung des Hrn. Prof. Dr. H. Kayser gern unterzog.

1) W. Abney, Proc. Roy. Soc. 49. p. 509. 1891.

2) A. König, Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Hamburg 1891.

Die Versuchsanordnung.

Maassgebend für diese waren die folgenden Gesichtspunkte. Erstlich sollte die Energieverteilung in dem Spectrum der benutzten Lichtquelle genau gemessen, zweitens die Empfindlichkeitscurve für eine möglichst grosse Anzahl von Curvenpunkten festgelegt, endlich eine grössere Anzahl von Versuchspersonen untersucht werden.

Als geeignetste Methode wurde die Ebert'sche benutzt, mit einigen, noch zu beschreibenden Abänderungen und Correctionen.

Die Lichtquelle sollte der Bedingung constanter Intensität, sowohl während der Dauer der Messung, als auch, wenn möglich, während der Dauer sämtlicher Versuche genügen. Sie sollte zweitens von solcher Stärke sein, dass ihre Energie auch im äussersten Violett noch gut gemessen werden könnte. Diesen Bedingungen schien die Nernst'sche Glühlampe am besten zu genügen, und sie hat sich in der That ausgezeichnet bewährt. Sie zeigte während der Dauer der Beanspruchung (30 bis 35 Brennstunden) keine erhebliche Aenderung ihrer Energiecurve.

Zu den Messungen sowohl der Energiecurve als auch der Empfindlichkeit des Auges diente dasselbe Instrument, ein sehr lichtstarkes Präcisionspectrometer. Ich beschreibe zunächst die Versuchsanordnung für die Energiemessung.

Das Bild des Nernst'schen Glühfadens wird durch ein achromatisches Condensorsystem auf den Spalt des Spectrometers entworfen. Ein in den Gang der Strahlen gebrachtes, planparalleles Wassergefäss absorbierte die ultrarote Strahlung. Zum Abblenden der Strahlen diente nach dem Vorgange der Herren Rubens und Hagen¹⁾ bei den Messungen im Violett ein rotes Glas, bei den übrigen ein Metallschirm. Durch ersteres wird die diffuse rote Strahlung des äussersten Rot im Apparat, die eine dauernde Einwirkung auf das benutzte Thermoelement ausübt, nicht gehindert. Vertauscht man das rote Glas mit einem farblosen, so addirt sich zu dieser Ein-

1) E. Hagen u. H. Rubens, Ann. d. Phys. 8. p. 1. 1902.

wirkung, falls man im Violett misst, die Einwirkung der violetten Strahlen. Aus leicht ersichtlichen Gründen vermeidet diese Anordnung die, durch die diffuse rote Strahlung verursachten Fehler. Die Energiearme, diffuse Strahlung der anderen Spectralregionen aber kann dieser gegenüber vernachlässigt werden.

Das Fernrohr ist mit geschwärzten Metallblenden ausgestattet. In seiner Brennebene befindet sich der Ocularspalt, von gleicher Höhe, wie der Collimatorspalt (18 mm). Seine Breite war bei den Energiemessungen und den Augenbeobachtungen dieselbe, nämlich 0,60 mm. Bei gleicher Breite des Collimatorspaltes und der gewählten Dispersion des Prismas gelangte infolge dessen durch den Spalt die Energie aus einem Spectralbereich von

140	A.-E.	bei $\lambda = 640 \mu\mu$,
80	„	„ $\lambda = 540 \mu\mu$,
55	„	„ $\lambda = 480 \mu\mu$,
30	„	„ $\lambda = 410 \mu\mu$.

Hinter dem Spalt wurde ein Ocular mit einer Rubens'schen Thermosäule angebracht, und das ganze Fernrohr mit einer dicken Wattesicht umhüllt. Als Galvanometer diente das du Bois-Rubens'sche Panzergalvanometer. Das Tragbrett desselben hing an dicken Gummischläuchen, diese wieder an Stahldrähten; die ganze Vorrichtung war zum Schutz gegen Luftzug in ein bis zur Decke des Zimmers reichendes Gehäuse eingebaut. Unter diesen Umständen ist die Ruhelage selbst in dem mangelhaften, starken Erschütterungen ausgesetzten Bonner Institut eine ausgezeichnete. Die benutzte Empfindlichkeit betrug, bei einem Scalenabstand von einem Meter, einem Spulenwiderstand von 2,7 Ohm und 8 Sekunden Schwingungsdauer, 1630 Scalenteile pro $1 \cdot 10^{-6}$ Amp.

Bei dieser Empfindlichkeit war der Ausschlag, bei 180 cm Scalenabstand, für die Wellenlänge $400 \mu\mu$ ca. 7 Scalenteile, für $\lambda = 670 \mu\mu$ ca. 1500 Scalenteile. Um die hohen Ausschläge im Rot messbar vermindern zu können, wurde ein rotirender Sector in den Strahlengang eingeschaltet. Der antreibende Elektromotor desselben befand sich in einem Eisengehäuse. Bei diesem Schutz und dem dreifachen Panzerschutz des Galvanometers betrug der Ausschlag des Galvanometers

infolge der Veränderung des magnetischen Feldes nur 1,5 Scalenteile, die Empfindlichkeit zeigte sich ungeändert.

Bei den Messungen blieben Collimator und Prisma, letzteres in der Minimumstellung, fest. Die Stellung des Fernrohres wurde verändert, um die verschiedenen Spectralpartien auf die Thermosäule projiciren zu können. Der Teilkreis war mit den Wasserstoff-, Helium-, Kalium-, Lithium-, Natrium-, Thalliumlinien geaicht.

Die folgende Tabelle enthält die, zu den einzelnen Wellenlängen gehörigen, corrigirten Galvanometerausschläge, also die Energiecurve desjenigen Lichtes, welches durch den Ocularspalt tritt. Nur diese interessirt uns in dieser Arbeit. Sie ist infolge der Reflexionen an den zahlreichen Glasflächen der Anordnung nicht identisch mit der vom Nernstbrenner ausgestrahlten. Die Messung wurde während der Dauer der Beobachtungen mehrmals, mit demselben Resultat, wiederholt.

Tabelle 1.

Die Energiecurve.

(Galvanometerausschläge e , Wellenlänge λ in $\mu\mu$.)

λ	717	671	639	609	583	561	542	525
e	2490	1525	940	688	509	370	268	193
λ	510	495	483	472	461	443	428	413
e	139	100	74	55	40,5	20,4	12,3	7,5

Ich gehe nun zur Beschreibung der Versuchsanordnung für die Augenuntersuchungen über. Damit das Auge durch den Ocularspalt die Prismenfläche gleichmässig erleuchtet sehe, muss der Collimators spalt mit einem Milchglase bedeckt sein. Die selective Absorption desselben war vorher photometrisch bestimmt worden. Die Durchlässigkeit erwies sich im ganzen Spectrum constant, gleich 41,3 Proc., nur im äussersten Rot wuchs sie auf die folgenden Werte an:

für $\lambda = 671 \mu\mu$: 46,2 Proc.,für $\lambda = 717 \mu\mu$: 49,5 Proc.

Mit diesen Werten wurde die Energiecurve auf diejenige Form corrigirt, die bei den Augenuntersuchungen in Betracht kam.

Eine weitere Correction ist durch die folgende Ueberlegung bedingt. Die zu den verschiedenen Spectralbezirken gehörigen, parallelen Strahlenbündel verlassen die vordere Prismenfläche unter verschiedenen Winkeln. Die Fläche erscheint im Blau schmaler, als in Rot, und dementsprechend wächst die *Flächenhelligkeit*, bezogen auf die Helligkeit im Rot, mit abnehmender Wellenlänge. Um auf gleiche Verhältnisse zu reduciren, müssen wir also, wie eine einfache Ueberlegung zeigt, die Spaltbreiten mit dem Cosinus des Austrittswinkels der Strahlen aus dem Prisma dividiren.

Der Ocularspalt wurde bis auf die Höhe von $\frac{3}{4}$ mm verkürzt, seine Breite blieb ungeändert. Bei einer Fläche von ca. $\frac{1}{2}$ qmm war also die Ocularöffnung stets erheblich kleiner als die der im Dunkeln sehr weit geöffneten Pupille. Das Verhältniß der Energiemengen, die, durch den Ocularspalt tretend, hier das Auge, bei den Energiemessungen aber die Thermosäule treffen, ist unter diesen Umständen für alle Spectralbezirke genau dasselbe, — wenn man die geringe Krümmung des Spaltbildes, die bei Benutzung der ganzen Spaltlänge eintritt, nicht in Betracht zieht. Man kann also diese Verhältnisse direct in Rechnung setzen.

Die Verlängerung des Collimators bildet eine Photometerbank von 4 m Länge, auf der die Lichtquelle verschoben, und dadurch die Erleuchtung der Milchglasplatte geändert werden kann. Bei der grossen Differenz der Empfindlichkeit des Auges im Rot und im Grün erwies sich indessen diese Schwächungsmethode nicht als ausreichend. Zur weiteren Abschwächung wurde daher der rotirende Sector benutzt. Da dieser während der Rotation nicht verstellt werden konnte, musste die letzte Feineinstellung durch Verengerung der Spaltbreite vorgenommen werden. Die Verhältnisse wurden bei jeder Messung so gewählt, dass hierbei die Spaltbreite weder eine obere Grenze, nämlich die der Ocularspaltbreite, noch eine untere (etwa die Hälfte derselben) überschritt, die spectrale Zusammensetzung des ins Auge gelangenden Lichtbündels also möglichst wenig geändert wurde.

Bei den Messungen der Energiecurve durchsetzte das Licht den aus zwei dreifachen Steinheil'schen Linsen bestehenden

Condensor, und das Wassergefäß; es wurde also durch Reflexion ein wenig in seiner Zusammensetzung gegenüber der hier in Betracht kommenden geändert. Um diesen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen, wurden bei den Augenbeobachtungen ausser der Milchglasplatte noch drei andere Glasplatten in den Strahlengang eingeschaltet.

Die Versuchsperson hielt sich zunächst 20 Minuten lang in völliger Dunkelheit auf, um die Netzhaut sich beruhigen zu lassen. Diese Zeit reichte, wie die Versuche ergaben, vollkommen aus. Dann wurde eine möglichst bequeme Stellung vor dem Apparat eingenommen, und Kopf und Fernrohr mit einem schwarzen Tuch lichtdicht verhangen. Selbstverständlich war der ganze Spectralapparat gleichfalls verhüllt.

Durch den Ocularspalt blickend, sieht der Beobachter die vordere Fläche des Prismas in spectrumalem Lichte leuchten. Von vornherein war die Intensität indessen schon so weit abgeschwächt, dass ein Farbeindruck überhaupt nicht zu stande kam, und die Fläche nur in dem bekannten grauen Schimmer erschien. Nur im Rot wurde, in Uebereinstimmung mit früheren Beobachtungen, von fast allen Personen die Farbe erkannt. Um die Aufmerksamkeit mehr zu erregen, war auf der Vorderfläche des Prismas eine schwarze Papierfigur angebracht, die sich schwarz vom hellen Hintergrunde abhob.

Bei der völligen Finsternis und dem schwachen Leuchten der Fläche war es für den Beobachter schwierig, die Pupille gerade vor die Ocularöffnung zu bringen. Um dies zu erleichtern, war über das Ocular ein Holzring gestülpt, dessen Rand sich mit leichtem Druck gegen die Umgebung des Auges legte.

Auf ein Zeichen der Versuchsperson wurde nun die Intensität so weit herabgemindert, bis das Auge absolut keinen Lichteindruck mehr empfing. Einzelne Beobachter brauchten dann das Auge nur zu schliessen und wieder zu öffnen, um wieder einen schwachen Schimmer wahrzunehmen. Es genügte dann eine geringe Verringerung der Spaltbreite, um auch diesen Eindruck verschwinden zu lassen. Diejenigen Personen, bei denen diese Art der Messung angewandt wurde, sind in den Tabellen besonders gekennzeichnet. Die Spaltbreite, Sector-einstellung, und Entfernung der Lichtquelle auf der Photo-

meterbank liessen den Procentteil der ursprünglichen Intensität, bezogen auf die Entfernung 100 cm von der Milchglasscheibe, berechnen. Durch diese Messung wurde also die eben untermerckliche Reizschwelle bestimmt.

Um die eben übermerckliche Reizschwelle zu erhalten, müsste nun der Spalt wieder verbreitert werden, bis das Auge wieder einen Lichteindruck empfängt. Indessen habe ich diese Messung nicht ausgeführt, da sie mir bei der angewandten Methode ungenau erscheint. Wie erwähnt, ist es für den Beobachter schwer, die Pupille genau vor die Ocularöffnung zu bringen und dies ganz besonders, wenn das Feld nicht erleuchtet erscheint. Denn dann hat er nicht den mindesten Anhalt dafür, ob er auch wirklich durch die Oeffnung blickt. Die Intensität kann dann schon erheblich die Reizschwelle überschritten haben, wenn das Auge bei einer uncontrolirbaren, unbewussten Richtungsänderung plötzlich das Bild erblickt, und der Beobachter sein Erscheinen angiebt.

Bei der Messung der eben untermercklichen Reizschwelle kommt dieser Fehler nicht in Betracht, da der Beobachter das Feld wirklich sieht, und bis zu seinem Verschwinden verfolgt.

Nur auf diese eben untermerckliche Reizschwelle beziehen sich also meine Messungen. Hr. Ebert giebt an, dass beide Reizschwellen nur wenig voneinander abweichen. Möglicherweise ist dann die Form der Curven für beide die gleiche.

Der Durchmesser der leuchtenden Fläche erschien unter einem Gesichtswinkel von ca. 12 Grad; ihr Bild auf der Netzhaut überstieg also die Grösse des gelben Fleckes ganz erheblich (den gelben Fleck überdeckt bekanntlich das Bild eines Gegenstandes, dessen Durchmesser unter dem Gesichtswinkel 1° gesehen wird). Beim Verengern des Spaltes schien die ganze Fläche sich gleichmässig zu verdunkeln, besondere Erscheinungen, welche auf ein abweichendes Verhalten des gelben Fleckes gegenüber der umliegenden Netzhautpartien hinweisen könnten, wurden nicht bemerkt. Die Empfindung beim allmählichen Verschwinden des Lichteindruckes ist freilich zu unbestimmt, um daraus sichere Schlüsse ziehen zu können, und die Entscheidung, ob die in dieser Arbeit gemessene Empfindlichkeit sich nur auf den gelben Fleck oder auch auf die umliegenden Netzhautpartien bezieht, daher schwer zu erfüllen.

Es sei hier bemerkt, dass unter „Empfindlichkeit“ die des Auges im ganzen, ohne Rücksicht auf selective Absorptionen in seinem Innern, verstanden wird, ebenso wie wir die Energie ohne Rücksicht auf die selective Absorption der Thermosäule bestimmt haben.

Trotz der geringen, nur wenige Secunden betragenden Dauer jeder Einzelmessung ist die Procedur für den Beobachter sehr anstrengend. Mehr wie 40—50 Einstellungen konnten in einer Sitzung nicht vorgenommen werden.

Das Fernrohr wurde nacheinander auf dieselben Wellenlängen eingestellt, wie bei den Energiemessungen. Bei jeder Einstellung wurden drei Ablesungen gemacht, und die ganze Reihe, mit je zwei Einstellungen für jede Wellenlänge, wieder rückwärts durchlaufen. Mit sehr wenigen Ausnahmen blieben die Ablesungen bei dieser Wiederholung innerhalb der Fehlergrenzen der ersten Messungen. Fanden Differenzen statt, so wurde die Messungsreihe verworfen. Die Fehler der Einzelmessungen sind naturgemäss sehr hoch. Sie können in seltenen Fällen 10 Proc. erreichen, betragen aber im Durchschnitt etwa 4 Proc. Einstellungen, die der Beobachter ohne Zögern, aus irgend einem subjectiven Grunde, als ungenau bezeichnete, wurden nicht notirt. Da die Versuchspersonen ohne Ausnahme in physikalischen Beobachtungen geschult waren, hat dies Verfahren gar keine Bedenken. Ich habe mich persönlich überzeugt, dass man im stande ist, sehr genau eine gute Beobachtung von einer durch Nachbilder, Flimmern, oder irgend welche andere subjective Erscheinungen gestörten zu unterscheiden.

Für ungeübte Versuchspersonen ist das Verfahren meines Erachtens überhaupt nicht zu empfehlen. Es müsste dann die Abänderung getroffen werden, dass die aus dem Spalt austretenden Strahlen eine weisse Fläche erleuchten, die alle Strahlen gleichmässig diffus reflectirt (Magnesiumoxyd¹⁾), und diese Fläche im dunklen Raume betrachtet werden. Hier würde sich auch die eben übermerkliche Reizschwelle leicht bestimmen lassen.

Zur Beurteilung der Genauigkeit folgt in Tab. 1a eine vollständige Messungsreihe mittlerer Güte. Die Zahlen be-

1) A. König u. C. Dieterici, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin 1886.

deuten gemessene, (nicht auf Sectoröffnung 360° und 100 cm Entfernung reducirte) Spaltbreiten in Hundertstel Millimetern. Die drei Zahlen links wurden auf dem Hin-, die zwei Zahlen rechts auf dem Rückweg, beim Durchlaufen der Reihe von 525 bis 443, gewonnen.

Tabelle 1a.
Vollständige Messungsreihe.
(G. III der Tab. 2.)

$\lambda =$	525	510	495	483	472	461	443
	53 49	46 47	59 63	57,5 53	49 44,5	45 46	48 41,5
	52,5 49	45,5 46	59 58	62 56	47 47	48 44	41 42,5
	51	46	63	56	49	42	41

Resultate.

Die fünf Messungen der Spaltbreite in jedem Spectralbezirk, für die der Lichteindruck verschwand, wurden zunächst zu einem Mittel vereinigt, und auf die Normalentfernung der Lichtquelle (100 cm) und auf die Sectoröffnung 360° (d. h. Abblendung Null) reducirt. Die so gewonnenen Werte s sind in der Tab. 2, in Hundertstel Millimetern ausgedrückt, angegeben. Schon bei diesen Werten tritt die hohe Empfindlichkeit (nämlich geringe Spaltbreite) im Grün hervor, trotzdem im Spectrum der Lichtquelle die Energie der roten Strahlen erheblich höher ist. Durch Vergleich mit der Energiecurve wird nun derjenige Spectralbezirk ermittelt, für den die Spaltbreite, bezogen auf eine constante, eindringende Energiemenge die kleinste, die Empfindlichkeit des Auges also die absolut grösste ist. Die zugehörige Spaltbreite sei s , der zugehörige Galvanometeraussschlag (Ordinate der Energiecurve) e . Gelten analog s' und e' für einen anderen Spectralbezirk, so giebt uns der Ausdruck

$$\frac{s' e'}{s e} = \sigma$$

direct diejenige Energiemenge, bezogen auf die Energie e als Einheit, welche in dem anderen Spectralbezirk nötig ist, damit das Auge gerade noch einen Lichteindruck empfängt.

Die reciproken Werte $1/\sigma$ können dann als ein Maass der Empfindlichkeit des Auges für jeden Spectralbezirk gelten. Man findet sie in der Tab. 3. In beiden Tabellen 2 und 3 stehen am Kopf jeder Verticalreihe die Wellenlängen, am Anfang jeder Horizontalreihe die Anfangsbuchstaben der Namen der Beobachter mit Angabe des Lebensalters. Die römischen Ziffern bezeichnen die Versuchsreihen verschiedener Tage. Die Sternchen * bezeichnen diejenigen Personen, die nach kurzem Schliessen des Auges wieder einen Lichteindruck empfangen (vgl. oben).

Trägt man die Wellenlängen als Abscissen, die zugehörigen $1/\sigma$ als Ordinaten auf, so erhält man die Empfindlichkeitscurven der Figg. 1—9 — wohlgemerkt, bei den Schwellenwerten der Reizempfindlichkeit. Diese Curven sind verschieden von denjenigen, die man erhalten würde, wenn man die relative Empfindlichkeit des Auges gegenüber höheren Intensitäten messen wollte. Hier tritt das Purkinje'sche Phänomen auf, d. h. bei gleichen absoluten Intensitäten eines roten und eines blauen Feldes erscheint das rote Feld heller bei hohen, dunkler bei niederen Intensitäten, als das blaue.

Vergleicht man die Werte einer Verticalreihe der Tab. 2, so fällt die ausserordentliche Verschiedenheit der verschiedenen Augen auf. Je kleiner die Zahl, um so grösser die Empfindlichkeit des betreffenden Beobachters. Aber auch bei jedem einzelnen Beobachter variirt die Empfindlichkeit an verschiedenen Tagen. Zweifellos hängt dies mit der körperlichen Disposition und damit zusammen, ob die betreffende Person in den letzten Tagen das Auge mehr oder weniger anstrengen musste. Man betrachte z. B. die Zahlen für die Person A. II und III stimmen leidlich überein, I dagegen zeigt eine doppelt so geringe Empfindlichkeit. Zwischen II und III lag ein Zeitraum von 2 Wochen, in den die Pfingstferien fielen. Am ersten Tage nach Wiederbeginn des Semesters wurde A. untersucht. Es zeigte sich, dass die Ruhe der Ferien (A. hatte nach seiner Angabe sehr viel geschlafen) die Empfindlichkeit ganz ausserordentlich gesteigert hatte. Die reducirte Spaltbreite betrug für $\lambda = 525 \mu\mu$ ca. 0,001; die Empfindlichkeit war also 110 mal höher als bei Versuch I, und 59 mal höher als bei Versuch II. Da der Sector dabei auf 1° Oeffnung, der Spalt auf $\frac{3}{100}$ mm ver-

engert werden musste, war die Genauigkeit der Messung zu gering. Als sie zwei Tage später mit einer verbesserten Einrichtung wieder aufgenommen werden sollte, ergab sich die Reihe III, die Empfindlichkeit war also ungefähr auf die der Reihe II zurückgegangen. Weiter ist bei A. die grosse Empfindlichkeit im Rot bemerkenswert. Sie lässt sich vielleicht dadurch erklären, dass A. in den letzten Monaten ausschliesslich in der Dunkelkammer bei rotem Licht gearbeitet hatte.

Während Tab. 2 uns die *absolute* Empfindlichkeit der verschiedenen Personen, bezogen auf dieselbe Lichtquelle, veranschaulicht, finden wir in Tab. 3 und in den Figg. 1—9 (jeder Versuchsreihe entspricht eine Curve, gewonnen durch directe Verbindung zweier aufeinander folgender Punkte) die Werte der *relativen* Empfindlichkeit jeder einzelnen Person, bezogen auf den höchsten Wert als Einheit. Sie variiren gleichfalls von Person zu Person, und bei jeder Person an den verschiedenen Tagen. Man vergleiche wieder die Curven für A., bei denen dies besonders stark hervortritt. A. zeigt in I und II ein deutliches doppeltes Maximum, das aber in III verschwunden ist. Auch die Stelle grösster Empfindlichkeit ist bei I eine andere als bei II. Noch evidenter zeigt sich eine solche Verschiebung bei Sch., der zwischen I und II einen starken Schnupfen durchzumachen hatte. Ich lege Wert darauf, zu betonen, dass diese Abweichungen völlig ausserhalb der Beobachtungsfehler liegen. Nur La. zeigt befriedigende Uebereinstimmung in drei Versuchsreihen.

Der ursprüngliche Plan, die Beobachtungen verschiedener Tage zu einer Curve zu vereinigen, musste aus diesen Gründen ganz aufgegeben werden. Nur die Reihen La. I und G. I sind auf das Mittel der übrigen bezogen, um sie nicht wegwerfen zu müssen. In der Tab. 3 ist nur der Vollständigkeit halber das Mittel für jede Person angegeben. Da die schnelle Ermüdung der Beobachter nicht erlaubte, sämtliche Punkte der Curve in einer Sitzung durchzumessen, habe ich nur in der ersten Sitzung die Messungen in grossen Sprüngen auf das Rot und Violett ausgedehnt, und später nur den mir vorläufig interessantesten Teil von $\lambda = 542 \mu\mu$ bis $\lambda = 443 \mu\mu$ genauer festgelegt.

Tabelle 2.

Die Spaltbreiten s.

Beobachter	717	671	639	609	583	561	542	525	510	495	483	472	461	452	443	435	428	421	413
La.* 22 J. I	230	—	25,8	—	0,71	—	0,59	—	0,78	—	0,54	—	1,15	—	3,54	—	20,6	—	144
„ II	—	46	—	3,7	—	0,39	—	0,12	—	0,36	—	0,72	—	3,3	—	11,3	—	27,1	—
„ III	—	—	—	—	—	—	—	0,071	0,11	0,20	0,33	0,53	0,92	2,28	—	—	—	—	—
Ha.* 31 J. I	233	54,4	—	2,8	—	0,36	—	0,16	—	0,35	—	1,0	—	2,27	—	7,4	—	21	—
„ II	—	—	—	—	—	—	—	0,17	0,18	—	0,95	—	1,86	—	3,38	—	9,55	—	55
„ III	—	—	—	—	—	—	0,12	0,044	0,075	0,113	0,21	0,39	0,78	—	2,42	—	—	—	—
„ IV	—	—	—	—	—	—	0,062	0,034	0,051	0,095	0,17	0,32	0,45	—	1,63	—	—	—	—
G.* 23 J. I	178	—	19,3	—	0,42	—	0,19	0,13	0,15	—	0,60	—	1,30	—	4,8	—	25	—	181
„ II	—	—	—	—	—	—	—	0,21	0,16	0,22	0,51	0,74	1,34	—	3,3	—	—	—	—
„ III	—	—	—	—	—	—	—	0,18	0,16	0,21	0,61	0,75	1,40	—	2,7	—	—	—	—
„ IV	—	—	—	—	—	—	0,17	0,19	0,16	0,17	0,55	0,76	1,31	—	3,3	—	—	—	—
„ V	—	—	—	—	—	—	0,40	0,18	0,17	0,20	0,60	1,14	1,82	—	4,56	—	—	—	—
„ VI	—	—	—	—	—	—	0,25	0,089	0,087	0,089	0,52	0,73	1,32	—	3,3	—	—	—	—

Cl.* 25 J.	86	—	53	—	0,42	—	—	0,13	0,12	0,14	0,36	0,84	—	1,65	—	8,3	—	20	—	88
M. 22 J.	I 244	—	13	—	0,69	—	—	0,21	0,11	0,21	0,39	0,45	—	0,86	—	3,6	—	34	—	163
"	II	—	—	—	—	—	—	—	0,21	0,35	0,57	0,63	0,98	1,9	—	5,5	—	—	—	—
"	III	—	—	—	—	—	—	—	0,37	0,58	0,99	0,99	1,45	2,0	—	4,9	—	—	—	—
"	IV	—	—	—	—	—	—	0,38	0,25	0,44	0,72	0,95	1,27	3,0	—	6,1	—	—	—	—
He.* 24 J.	—	—	—	—	—	—	—	—	0,11	0,12	0,21	0,44	0,68	0,66	—	4,4	—	—	—	—
K.* 49 J.	I	—	—	—	—	—	—	—	0,043	0,052	0,058	0,47	0,43	0,69	—	2,8	—	—	—	—
"	II	—	—	—	—	—	—	0,051	0,038	0,039	0,058	0,21	0,32	0,55	—	2,8	—	—	—	—
Sch.* 23 J.	I 216	—	24	—	0,72	—	—	0,21	0,097	0,20	0,33	0,56	—	0,80	—	2,4	—	28	—	76
"	II	—	—	—	—	—	—	0,18	0,090	0,079	0,090	0,11	0,22	0,53	—	2,7	—	—	—	—
A. 22 J.	I 23	—	3,8	—	0,23	—	—	0,25	0,11	0,096	0,17	0,39	—	0,57	—	3,6	—	9,4	—	37
"	II	—	—	—	—	—	—	—	0,059	0,042	0,043	0,092	0,11	0,22	—	0,73	—	—	—	—
"	III	—	1,5	—	0,25	—	—	0,05	0,045	0,040	0,048	0,079	0,15	0,36	—	1,34	—	—	—	—
E.* 29 J.	I	—	—	—	—	—	—	0,082	0,038	0,066	0,10	0,14	0,18	0,32	—	0,90	—	7,6	—	38
"	II	—	—	—	0,22	—	—	0,057	0,047	0,046	0,050	0,14	—	0,33	—	0,69	—	8,8	—	40

Tabelle 3.

Die Empfindlichkeit des Auges, dargestellt durch die Werte $1/\sigma$.

Beobachter	717	671	639	609	583	561	542	525	510	495	483	472	461	452	443	435	428	421	413
La.* 22 J. I	0,00004	—	0,00094	—	0,063	—	0,44	—	0,93	—	0,57	—	0,49	—	0,31	—	0,09	—	0,02
„ II	—	0,00032	—	0,009	—	0,16	—	1	—	0,64	—	0,57	—	0,23	—	0,13	—	0,037	—
„ III	—	—	—	—	—	—	—	1	0,93	0,68	0,56	0,47	0,37	—	0,29	—	—	—	—
Mittel	0,00004	0,00032	0,00094	0,009	0,063	0,16	0,44	1	0,93	0,66	0,57	0,52	0,43	0,23	0,30	0,13	0,09	0,037	0,02
Ha.* 31 J. I	0,00005	0,00038	—	0,017	—	0,24	—	1	—	0,90	—	0,56	—	0,46	—	0,27	—	0,17	—
„ II	—	—	—	—	—	—	—	0,78	1	—	0,36	—	0,34	—	0,37	—	0,22	—	0,06
„ III	—	—	—	—	—	—	0,27	1	0,81	0,75	0,55	0,39	0,27	—	0,17	—	—	—	—
„ IV	—	—	—	—	—	—	0,39	1	0,92	0,69	0,53	0,37	0,36	—	0,30	—	—	—	—
Mittel	0,00005	0,00038	—	0,017	—	0,24	0,33	0,95	0,91	0,72	0,48	0,44	0,32	0,46	0,25	0,27	0,22	0,017	0,06
G.* 23 J. I	0,00004	—	0,0011	—	0,093	—	0,39	0,79	0,96	1	0,45	—	0,38	—	0,20	—	0,069	—	0,015
„ II	—	—	—	—	—	—	—	0,55	0,97	1	0,58	0,54	0,41	—	0,33	—	—	—	—
„ III	—	—	—	—	—	—	—	0,60	0,93	1	0,47	0,51	0,37	—	0,39	—	—	—	—
„ IV	—	—	—	—	—	—	0,38	0,45	0,75	1	0,42	0,41	0,32	—	0,25	—	—	—	—
„ V	—	—	—	—	—	—	0,19	0,58	0,88	1	0,46	0,33	0,28	—	0,22	—	—	—	—
„ VI	—	—	—	—	—	—	0,13	0,52	0,73	1	0,23	0,22	0,17	—	0,13	—	—	—	—
Mittel	0,00004	—	0,0011	—	0,097	—	0,28	0,59	0,88	1	0,44	0,40	0,32	—	0,25	—	0,069	—	0,015

Cl.* 25 J.	0,00009	—	0,0004	—	0,089	—	0,56	0,82	1	0,53	0,31	—	0,29	—	0,11	—	0,076	—	0,03
M.* 22 J. I	0,00003	—	0,0021	—	0,058	—	0,36	1	0,62	0,52	0,61	—	0,59	—	0,28	—	0,049	—	0,017
" II	—	—	—	—	—	—	—	—	0,83	0,72	0,88	0,76	0,52	—	0,36	—	—	—	—
" III	—	—	—	—	—	—	—	—	0,88	0,72	0,97	0,89	0,87	—	0,71	—	—	—	—
" IV	—	—	—	—	—	—	0,38	1	0,78	0,66	0,68	0,69	0,40	—	0,39	—	—	—	—
Mittel	0,00008	—	0,0021	—	0,058	—	0,37	1	0,78	0,66	0,79	0,78	0,59	—	0,44	—	0,049	—	0,017
He.* 24 J.	—	—	—	—	—	—	—	0,77	1	0,79	0,51	0,44	0,61	—	0,17	—	—	—	—
K.* 49 J. I	—	—	—	—	—	—	—	0,69	0,80	1	0,17	0,24	0,21	—	0,097	—	—	—	—
" II	—	—	—	—	—	—	0,39	0,74	1	0,92	0,35	0,31	0,24	—	0,095	—	—	—	—
Mittel	—	—	—	—	—	—	0,39	0,72	0,90	0,96	0,26	0,28	0,23	—	0,096	—	—	—	—
Sch.* 23 J. I	0,00004	—	0,0009	—	0,051	—	0,38	1	0,67	0,57	0,45	—	0,57	—	0,39	—	0,054	—	0,053
" II	—	—	—	—	—	—	0,16	0,45	0,71	0,87	1	0,64	0,36	—	0,14	—	—	—	—
A. 22 J. I	0,00023	—	0,0038	—	0,12	—	0,20	0,66	1	0,78	0,46	—	0,58	—	0,18	—	0,12	—	0,048
" II	—	—	—	—	—	—	—	0,38	0,74	1	0,63	0,74	0,48	—	0,29	—	—	—	—
" III	—	—	0,0034	—	0,038	—	0,36	0,55	0,87	1	0,81	0,57	0,38	—	0,18	—	—	—	—
E.* 29 J. I	—	—	—	—	—	—	0,34	1	0,81	0,71	0,72	0,75	0,58	—	0,40	—	0,079	—	0,026
" II	—	—	—	—	0,044	—	0,32	0,54	0,78	1	0,47	—	0,38	—	0,35	—	0,046	—	0,017

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 7.

Fig. 8.

Fig. 9.

Es zeigt sich für diesen Teil das schon oben angedeutete Ergebnis, dass einzelne Personen ein deutlich ausgeprägtes Doppelmaximum besitzen. Bei M. tritt dies in vier Reihen klar hervor, so sehr auch die Form der Curven sich ändert. Bei A. findet es sich nur in den Reihen I und II, in Reihe III ist es verschwunden. Auffallend ist bei allen Personen der colossale Unterschied der Empfindlichkeit im Rot und Grün, der das Verhältnis 1:33000 für $\lambda = 717$ erreichen kann.

Zum Vergleich gebe ich noch die Resultate der früheren Beobachter, sämtlich auf die in dieser Abhandlung benutzte Darstellungsweise umgerechnet (vgl. Tab. 4—6, p. 206).

Die Grauglut des schwarzen Körpers.

Es ist von Interesse, die Resultate dieser Untersuchung zu einer Berechnung der Weber'schen Phänomene zu verwenden. Nach Hrn. Emden¹⁾, der die Versuche Weber's sorgfältiger wiederholte, beginnt das Kupferoxyd bei 415° C. graues Licht auszusenden. Die Energiecurve des Kupferoxyds bei dieser Temperatur können wir angenähert bestimmen, wenn wir die Messungen des Hrn. Paschen²⁾ über die Energieverteilung im Spectrum des schwarzen Körpers bei niederen Temperaturen extrapoliren. Vergleichen wir diese Energiecurve mit der Empfindlichkeitscurve der Person La., die ja bei drei verschiedenen Messungen ziemlich dieselbe war, so finden wir, dass die Energie des Spectralbereiches 583, bezogen auf die Empfindlichkeit von La., die relativ grösste ist. Wir können dann annehmen, dass dieses Licht bei der Temperatur 415° *allein* empfunden wird, während die Energien der übrigen Spectralbereiche die untere Reizschwelle noch nicht erreicht haben. Aus den Versuchsdaten berechnen wir diese Verhältnisse, setzen die Energie für 583 gleich 1, und bekommen für die übrigen Wellenlängen die Zahlen der ersten Horizontalreihe in Tab. 7. Dieselben geben die Bruchteile

1) R. Emden, Wied. Ann. 36. p. 214. 1889.

2) F. Paschen, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin p. 405. 1899.

Tabelle 4.
Messungen von H. Ebert.

Beobachter	675 $\mu\mu$	590 $\mu\mu$	530 $\mu\mu$	500 $\mu\mu$	470 $\mu\mu$
S.	0,04	0,066	1	0,77	0,83
E.	0,03	0,060	1	0,50	0,25

Tabelle 5.
Messungen von S. P. Langley.

Beobachter	768	750	700	650	600	550	500	450	400	380	340
S. P. L.	—	—	0,005 6	0,10	0,67	1	0,26	0,06	—	—	—
F. W. V.	0,000 001	0,000 009	0,000 68	0,004 5	0,070	0,74	1	0,19	0,013	0,002 1	0,000 65
B. E. L.	—	0,000 004	0,000 9	0,008 8	0,115	0,62	1	0,37	0,014	0,000 3	0,000 0
E. M.	—	—	0,004 9	0,018	0,24	0,85	1	0,60	0,030	—	—

Tabelle 6.
Messungen von A. König.

Beobachter	670	650	625	605	590	575	555	535	520	505	490	470	450	430
A. K.	0,000 19	0,000 47	0,003 8	0,015	0,045	0,12	0,36	0,75	0,98	1	0,86	0,50	0,23	0,047
R. R.	0,000 17	0,000 56	0,004 8	0,019	0,033	0,12	0,33	0,60	0,83	1	0,75	0,50	0,26	0,059

der Minimalenergie (bei welcher zuerst ein Reiz empfunden wird) an, wenn diese Minimalenergie gleich 1 gesetzt wird.

Nun berechnen wir für die höheren Temperaturen 430° , 450° , 470° und 525° die Zunahme der Energie jeder Spectralregion, wie die Ziffern der folgenden Horizontalreihen sie angeben. Sowie die Energie den Wert 1 erreicht hat, wird sie im Auge von La. empfunden. In jeder Horizontalreihe bezeichnen darum die fett gedruckten Zahlen, die grösser als 1 sind, den Teil des Normalspectrums, welches bei der zugehörigen Temperatur gesehen wird. Die erste Empfindung tritt bei 415° im Gelb (583) auf. Bei 430° hat sich das Spectrum nach links bis zum Orange, nach rechts bis ins Grün (525) verbreitert. Bei 450° wird das Hellrot (671) und Grünblau (525) einbegriffen. Erst bei 470° wird das äusserste Rot sichtbar. Bei 525° ist das ganze Spectrum bis ins Blau erschienen. Die Zahlen spiegeln also den Verlauf der Erscheinung, wie ihn Hr. Weber¹⁾ beobachtet hat, sehr gut wieder, wenn sie auch der Extrapolation der Energiecurve halber nur angenähert richtig sein können.

Tabelle 7.

$\lambda =$	703	671	639	609	583	561	542	525	510	495	483
415°	0,12	0,28	0,22	0,53	1	0,74	0,65	0,50	0,17	0,04	0,01
430	0,22	0,54	0,44	1,1	2,2	1,6	1,5	1,2	0,4	0,1	0,03
450	0,5	1,3	1,1	2,8	5,7	4,5	4,2	3,5	1,2	0,3	0,1
470	1,05	2,9	2,6	6,8	14,3	11,8	11,3	9,7	3,5	0,9	0,3
525	6,9	21	20	61	140	128	130	123	48	14	5

Schlussergebnis.

Die absolute und die relative Farbenempfindlichkeit des Auges, gemessen bei den Schwellenwerten der Reizempfindung, ist grossen individuellen Verschiedenheiten, und, bei demselben Auge, grossem Wechsel unterworfen. Die Empfindlichkeit ist am grössten für den Spectralbereich $\lambda = 495 \mu\mu$ bis $\lambda = 525 \mu\mu$. Sie kann für

1) H. F. Weber, l. c. p. 260.

$\lambda = 717 \mu\mu$, den 33000^{ten}, für $\lambda = 413 \mu\mu$ den 60^{ten} Teil des Wertes im Grün betragen.

Den Herren Prof. Dr. H. Kayser, Dr. A. Hagenbach, Dr. Eversheim, Morris-Airey, K. Langenbach, J. Giesen, R. Schue, Schmidt, P. Hermesdorf, J. Müller, J. Clodius spreche ich auch an dieser Stelle den besten Dank für ihre freundliche Unterstützung bei der vorstehenden Arbeit aus.

Bonn, Physik. Institut der Universität, im Mai 1902.

(Eingegangen 5. Juni 1902.)