

Experimentelle Untersuchungen über die Helligkeit der Farben.

Von

Eduard Gruber.

Einleitung.

Es sind vielfach Zweifel darüber geäußert worden, ob eine Vergleichung der Helligkeit einer farbigen und einer farblosen Empfindung mit hinreichender Genauigkeit und Sicherheit möglich sei. So schreibt Helmholtz: »Dass man auch verschiedene Farben in Bezug auf ihre Helligkeit vergleichen kann, ist im Vorigen mehrfach erwähnt worden. Aber die Sicherheit und Genauigkeit einer solchen Vergleichung erweist sich als eine viel geringere als diejenige, welche bei Vergleichung von Lichtern derselben Farbe erreicht werden kann. Selbst schon bei den sehr geringen Unterschieden des Farbentons, wie sie bei praktisch-photometrischen Messungen von Flammen verschiedener Temperatur und von elektrischen Glühlampen verschiedener Stromdichtigkeit vorkommen, ist die Störung sehr merklich. Sollen gar Lichter von sehr weit abweichenden Farbentönen mit einander verglichen werden, so wächst die Unsicherheit und Verlegenheit der Beobachter in hohem Grade. Sehr erhebliche Unterschiede der Helligkeit zwischen ganz verschiedenen Farben werden allerdings ohne Zweifeln und Schwanken anerkannt. Namentlich kann es nicht zweifelhaft sein, dass, wenn die eine Farbe als die Summe aus der andern und einem andersfarbigen Summanden anzusehen ist, die Summe immer heller als jeder der Theile erscheint. Das zeigt sich, sobald man auf irgend

einem farbig beleuchteten Felde einen Fleck noch mit andersfarbigem Licht beleuchtet.«

»Ich selbst muss gestehen, dass ich über eine große Unsicherheit in diesen Vergleichen nie hinausgekommen bin, obgleich ich in der Vergleichung sehr kleiner Farbenunterschiede bei gleicher Helligkeit und sehr kleiner Helligkeitsunterschiede bei gleicher Farbe andern Beobachtern nicht nachzustehen glaube¹⁾.«

Dem gegenüber ist es theoretisch nicht ohne Interesse und praktisch z. B. für Contrastversuche nicht unwichtig, die Möglichkeit einer solchen Vergleichung für verschiedene Helligkeits- und Sättigungsstufen verschiedener Farben zu untersuchen. Diese Untersuchung durchzuführen, war die Hauptaufgabe der folgenden Arbeit.

Es könnte dabei die Frage aufgeworfen werden, ob eine Farbe bei Veränderung der Sättigung nothwendig auch ihre Helligkeit ändert. Bekanntlich hat Hering angenommen, dass jede der von ihm postulirten vier Grundfarben, auch abgesehen von den sie begleitenden Helligkeitsempfindungen, einen erhellenden (Gelb und Roth) oder verdunkelnden (Grün und Blau) Einfluss ausübt²⁾.

Diesen Standpunkt Hering's sucht F. Hillebrand experimentell zu beweisen³⁾. Er knüpft an die Thatsache an, dass bei schwacher Beleuchtung farbige Gegenstände farblos gesehen werden. Dabei verändern sie ihren Helligkeitswerth, wie aus dem allbekannten Purkinje'schen Phänomen hervorgeht. Er bestimmte nun im Dunkelzimmer den Helligkeitswerth eines verschieblichen Ringes von Schwarz und Weiß. Er stellte dann nach den so gefundenen Werthen eine Reihe von Mischungen der Farbe mit Weiß

1) H. v. Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik. Zweite umgearbeitete Auflage. Sechste Lieferung. 1892. S. 428.

2) E. Hering, Über Holmgren's vermeintlichen Nachweis der Elementar-empfindungen des Gesichtssinnes in Pfüger's Archiv, Bd. XL. 1887. Hering macht hier folgende Anmerkung: »Ich hatte ursprünglich angenommen, dass alle Farbenempfindungen, wenn wir sie ganz rein, d. h. frei von jeder Beimischung der Weiß- und Schwarzempfindung, haben könnten, gleichhell sein müssten. Als ich jedoch im Jahre 1882 an die messende Untersuchung der weißen Valenz farbiger Pigment- und Spectrallichter ging, überzeugte ich mich bald, dass diese Annahme irrig gewesen.«

3) F. Hillebrand, Ueber die specifische Helligkeit der Farben. Sitzber. der kais. Acad. der Wissensch. in Wien, 1889.

und Schwarz her, für welche der Helligkeitswerth derselbe hätte sein sollen, und verglich diese Scheiben bei Tagesbeleuchtung mit einander. Er fand nun, dass dieselben eine sehr verschiedene Helligkeit zeigten.

Method.

Wir haben die Methode der Minimaländerungen benutzt. Diese Methode bietet uns die Möglichkeit der Vergleichung von sehr kleinen Reizunterschieden, und sie ist diejenige, welche am schnellsten zu Resultaten führt. Die Anordnung der Versuche war die folgende. Auf einem Tische in der Entfernung von 2 m von den Augen des Beobachters stehen zwei Farbenkreisel. Der eine derselben ist mit einer Scheibe der auf ihre Helligkeit zu untersuchenden Farbe versehen, welcher nach Umständen bestimmte Sektoren Weiß und Schwarz beigemischt sind. Diese Scheibe bleibt während des ganzen Versuches constant. Der andere Farbenkreisel trägt eine weiße und eine schwarze Scheibe, welche gegen einander verschiebbar sind und deren eine mit einer Gradeintheilung versehen ist. Es wurde stets die Größe der weißen Sektoren in Winkelgraden notirt. Beide Scheiben stehen vor einem schwarzen Hintergrund. Während die Abstufungen vorgenommen werden, sind die Scheiben durch einen schwarzen Schirm den Augen des Beobachters verdeckt. Das Verfahren war ein unwissentliches. Beurtheilt wurde immer die farbige Scheibe in ihrem Verhältniss zur grauen. Die Urtheilsrichtung war also stets dieselbe. Die Urtheile lauteten: »heller«, »gleich«, »dunkler«. Um den Experimentator über die Art der zu wählenden Abstufung zu orientiren, wurde eine nähere Bestimmung der »heller«- und »dunkler«-Urtheile angewandt. Die hierfür eingeführten Bezeichnungen waren hauptsächlich »entschieden«, »sicher«, »ebenmerklich«.

Sehr störend erwies es sich bei den Versuchen, dass es unmöglich war, eine örtlich und zeitlich constante Beleuchtung herbeizuführen. Um diejenigen Fehler, welche durch verschiedene Beleuchtung der beiden Scheiben entstanden, auszugleichen, wurde jeder Versuch in zwei Raumlagen direct hinter einander angestellt. Wenn die Farbenscheibe zuerst rechts vom Beobachter stand, so wurde sie nachher

links gestellt. Um allzu große Aenderungen der Beleuchtung in der Zeit zu vermeiden, und vor allem den äußerst störenden Sonnenreflexen zu entgehen, war es erforderlich, das Experimentirzimmer nach Norden zu wählen. Die Versuche wurden meist Vormittags von 10—12 Uhr angestellt. Nur wenige wurden im Wintersemester von 2—4 gemacht.

Die Versuchspersonen waren Herr Altschul aus Warschau, Herr Arrer aus Belgrad, Herr Dr. Cohn aus Berlin und Herr Buck aus Stoneham (Massachusetts).

Um ein Bild der Versuche zu geben, wollen wir als Beispiel das Protocoll eines beliebigen Versuches wiedergeben.

V. Grundversuch.

Dr. Cohn. 3. Mai. Heller Tag.

I. Raumlage.

| | Weiß | Von Schwarz an | Weiß | Von Weiß an |
|--------------|------|--------------------|------|---------------------|
| Grün rechts: | | | | |
| 360 | 30 | heller entschieden | 70 | dunkler entschieden |
| | 35 | heller | 60 | dunkler |
| | 40 | heller | — 55 | dunkler sicher |
| | — 45 | heller sicher | 53 | dunkler |
| | 46 | heller | + 52 | gleich |
| | + 47 | gleich | 51 | gleich |
| | 48 | gleich besser | 50 | gleich |
| | 49 | gleich | 49 | gleich |
| | + 50 | dunkler etwas | + 48 | heller ebenmerklich |
| | — 51 | dunkler sicher | — 47 | heller sicher |

II. Raumlage.

| | | | | |
|-------------|------|---------------------|------|---------------------|
| Grün links: | | | | |
| | 30 | heller entschieden | 70 | dunkler entschieden |
| | 35 | heller | 60 | dunkler |
| | 40 | heller | — 55 | dunkler sicher |
| | — 45 | heller sicher | 53 | dunkler |
| | 46 | heller etwas | 52 | dunkler |
| | 47 | heller ebenmerklich | + 51 | gleich |
| | + 48 | gleich besser | 50 | gleich |
| | 49 | gleich | + 49 | heller ebenmerklich |
| | + 50 | dunkler ebenmerkl. | — 48 | heller sicher |
| | 51 | dunkler | | |
| | — 52 | dunkler sicher | | |

Arithmetisches Mittel: 49,375. Gleichheitsstrecke: 52—47 = 5. Mittlere Variation (im Sinne der Tabellen): 1,375.

Durch eine Reihe derartiger Grundversuche wird die Helligkeit einer Farbenscheibe bestimmt. Dabei müssen meist die ersten Versuche als Uebungsversuche verworfen werden. Den durch diese Grundversuche gewonnenen Helligkeitswerth legen wir dann den weiteren Berechnungen zu Grunde. Wir bestimmen eine Anzahl von Abstufungen, verschiedener Sättigung d. h. der Mischungen der Farbe mit Weiß und Schwarz, welche dieselbe Helligkeit besitzen wie die Farbenscheibe, vorausgesetzt, dass die Helligkeit sich mit abnehmender Sättigung nicht ändert. Haben wir z. B. für den Beobachter Dr. Cohn als Mittel von 5 Versuchen gefunden:

$$360^{\circ} \text{ Grün} = 50^{\circ} \text{ Weiß} + 310^{\circ} \text{ Schwarz,}$$

so ist:

$$7,2^{\circ} \text{ Grün} = 1^{\circ} \text{ Weiß} + 6,2^{\circ} \text{ Schwarz.}$$

Es sind also z. B.

$$280^{\circ} \text{ Grün} + 10^{\circ} \text{ Weiß} + 60^{\circ} \text{ Schwarz}$$

$$108^{\circ} \text{ »} + 35^{\circ} \text{ »} + 217^{\circ} \text{ »}$$

an Helligkeit gleich 50° Weiß + 310° Schwarz oder 360° Grün, falls die Helligkeit durch Abnahme der Sättigung nicht geändert wird. Um eine weitere Controle zu gewinnen, wurden dann Versuche mit wechselnder Helligkeit und wechselnder Sättigung angestellt. Auch hierbei wurde derjenige Werth berechnet, welcher nach den für die Farbenscheibe gefundenen Werthen zu erwarten war.

Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Versuche wollen wir an dem Beispiel der Versuchstabelle IV erläutern. In der ersten Spalte sind diejenigen Versuche, welche aus später zu erörternden Gründen verdächtig erscheinen, mit einem * versehen. Spalte 2 enthält die laufende Nummer des Versuches, Spalte 3 das Datum des Tages, an welchem er angestellt wurde. Dann folgt eine Angabe der während des Versuches herrschenden Helligkeit. Die nächsten drei Spalten enthalten die constante Zusammensetzung der Farbenscheibe aus Farbe, Weiß und Schwarz. Die darauf folgende erste Spalte der mit »Helligkeitsscheibe« bezeichneten Rubrik trägt die Ueberschrift

Tabelle IV.

Controlversuche für Grün = 50° Helligkeit, mit wechselnder Helligkeit und wechselnder Sättigung.
Zusatz von Weiß. Beobachter Herr Dr. Cohn. Entfernung des Auges von den Vergleichsscheiben = 2 m.

| Verdächtige Versuche | Nummer des Versuchs | Datum, Monat und Tag | Helligkeit des Tages | Farbenscheibe | | | Helligkeitsscheibe | | | | | Differenz |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|------|---------|--------------------|--------------------|--|-------------------------------|----------------------|-----------|
| | | | | farbig | weiß | schwarz | Rich- tung | Gleichheitsstrecke | Mittlere Variation der 8 Werthe | Arith- metisches Mittel | Berechneter Werth | |
| * | I | 8. Mai | Hell | 340 | 20 | 0 | S | 70 — 59 = 11 | 5,625 | 64,375 | 67,222 | — 2,847 |
| * | II | 12. » | Hell | 320 | 40 | 0 | S | 75 — 51 = 24 | 6,875 | 66,500 | 84,444 | — 17,944 |
| * | III | 12. » | Hell | 300 | 60 | 0 | S | 90 — 80 = 10 | 2,656 | 85,125 | 101,666 | — 16,541 |
| * | IV | 15. » | Hell | 280 | 80 | 0 | W | 110 — 100 = 10 | 3,125 | 103,125 | 118,888 | — 15,763 |
| * | V | 16. » | Hell | 320 | 40 | 0 | W | 95 — 75 = 20 | 4,844 | 88,125 | 84,444 | + 3,681 |
| * | VI | 18. » | Wechselnd | 90 | 270 | 0 | W | 275 — 260 = 15 | 4,375 | 268,125 | 282,500 | — 14,375 |
| * | VII | 19. » | Hell | 180 | 180 | 0 | W | 210 — 180 = 30 | 7,500 | 195,000 | 205,000 | — 10,000 |
| | VIII | 29. » | Hell | 270 | 90 | 0 | S | 135 — 115 = 20 | 5,312 | 126,250 | 127,500 | — 1,250 |
| | IX | 30. » | Hell | 225 | 135 | 0 | W | 175 — 165 = 10 | 3,125 | 171,875 | 166,250 | + 5,625 |
| | X | 1. Juni | Hell | 135 | 225 | 0 | W | 255 — 235 = 20 | 4,531 | 245,625 | 243,750 | + 1,875 |
| | XI | 7. » | Hell | 180 | 180 | 0 | S | 210 — 200 = 10 | 3,281 | 205,625 | 205,000 | + 0,625 |
| | XII | 8. » | Hell | 300 | 60 | 0 | W | 110 — 95 = 15 | 3,750 | 103,250 | 101,666 | + 1,584 |
| | XIII | 9. » | Hell | 280 | 80 | 0 | S | 124 — 115 = 9 | 3,125 | 118,875 | 118,888 | — 0,013 |
| | XIV | 10. » | Hell | 90 | 270 | 0 | S | 285 — 276 = 9 | 2,750 | 282,250 | 282,500 | — 0,250 |

»Richtung«. Da nämlich jeder Versuch in jeder Raumlage zwei Reihen enthält, deren eine von einem deutlich helleren, die andere von einem entschieden dunkleren Werthe ausgeht, war es nöthig, anzugeben, mit welcher von beiden Reihen der Versuch in jeder Raumlage begann. Es bedeutet dabei *S* ein Beginnen vom dunkleren, *W* vom helleren Werthe an. Anfangs gingen wir stets von einem dunkleren Grau aus. Erst später wechselten wir aus unten näher zu besprechenden Gründen den Ausgangspunkt. Unter »Gleichheitsstrecke« verstehen wir den Abstand zwischen den beiden äußersten unter den 8 Werthen jedes Versuches (vergl. das S. 432 mitgetheilte Versuchsprotocoll). Es sind die beiden extremsten Werthe und der Abstand zwischen ihnen in Winkelgraden der weißen Scheibe mitgetheilt. Dann folgt eine »mittlere Variation« jener 8 Werthe. Es ist hervorzuheben, dass hier mittlere Variation etwas anderes bedeutet, als man gewöhnlich unter diesem Ausdruck versteht. Denn die 8 Werthe, aus welchen sie berechnet ist, sind unter sich nicht gleichbedeutend. Doch gibt diese Zahl ein brauchbares Maß für die Genauigkeit jeder Beobachtung. Das Resultat des Versuches ist in der folgenden Columnne unter dem Titel »arithmetisches Mittel« (nämlich aus jenen 8 Werthen) mitgetheilt. Schließlich kommt der nach dem Mittelwerthe der Grundversuche berechnete Werth und die Differenz zwischen beobachtetem und berechnetem Werth. Bei den Tabellen über Grundversuche fallen natürlich diese Spalten fort.

Es ist oben darauf aufmerksam gemacht worden, dass die als mittlere Variation bezeichneten Werthe der Tabellen dem Begriffe der mittleren Variation nicht entsprechen. Nun ist es aber in denjenigen Fällen, in denen eine größere Anzahl von Versuchen annähernd dasselbe Mittel ergeben, d. h. bei den Grundversuchen und den Controlversuchen mit constanter Helligkeit, möglich, eine mittlere Variation im strengen Sinne des Wortes zu berechnen. Bei dem großen Interesse, das diese Werthe gerade bei der Methode der Minimaländerungen besitzen, wollen wir sie hier mittheilen.

Mittlere Variationen.

| | Beobachter | Nummer der Tabelle | Zahl der Versuche | Art des Versuches | Richtung | Von dunkler an | | | Von heller an | | | | |
|---|---------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|----------------|-------|---------|---------------|---------|-------|---------|-------|
| | | | | | | AM | MV | AM | MV | AM | MV | | |
| 1 | Herr Dr. Cohn | I | 5 | Grün. Grundversuch | Alle S | 47,000 | 2,400 | 52,000 | 2,200 | 52,300 | 1,730 | 47,800 | 1,880 |
| 2 | » | II | 5 | Grün. Const. Helligk. | Alle S | 47,400 | 2,440 | 53,500 | 1,900 | 53,100 | 1,740 | 48,400 | 1,560 |
| 3 | » | XIV | 2 | Blau. Grundversuch | 1 S, 1 W | 53,000 | 2,000 | 50,250 | 4,250 | 50,750 | 1,125 | 51,250 | 4,625 |
| 4 | » | XIV | 4 | Blau. Const. Helligk. | Alle S | 48,500 | 4,250 | 55,250 | 3,562 | 54,125 | 3,593 | 49,500 | 3,125 |
| 5 | » | XV | 3 | Roth. Grundversuch | 2 S, 1 W | 48,000 | 2,333 | 53,833 | 1,166 | 51,666 | 2,333 | 46,833 | 1,900 |
| 6 | Herr Arrer | IX | 5 | Blau. Grundversuch | Alle S | 51,100 | 0,560 | 54,200 | 1,000 | 51,200 | 1,033 | 47,800 | 1,600 |
| 7 | » | X | 4 | Blau. Const. Helligk. | 2 S, 2 W | 50,374 | 0,781 | 54,625 | 0,719 | 51,000 | 0,500 | 47,250 | 2,375 |
| 8 | » | XVII | 7 | Gelb. Grundversuch | 4 S, 3 W | 180,000 | 3,571 | 182,642 | 9,071 | 180,714 | 5,928 | 176,857 | 8,285 |
| 9 | Herr Bueck | VII | 4 | Grün. Grundversuch | Alle S | 39,625 | 2,718 | 44,500 | 2,375 | 49,875 | 3,125 | 42,500 | 2,125 |

Es sind in dieser Tabelle für die Bildung der Mittelwerthe und der dazu gehörigen mittleren Variationen (MV) immer nur die zusammengehörigen Zahlen benutzt worden, also die ersten Gleichheitswerthe von dunkler, resp. heller an, und die zugehörigen Werthe ebenheller, resp. ebendunkler. Da jeder Versuch zwei Werthe von jeder dieser Classen, den zwei Raumlagen entsprechend, enthält, sind die Mittelwerthe also aus einer doppelt so großen Zahl von Bestimmungen gezogen, als die Zahl der Versuche angibt. Nebenbei sei hier bemerkt, dass ein constanter Unterschied zwischen beiden Raumlagen nicht stattfindet.

Was die Mittelwerthe betrifft, so fällt auf, dass bei Dr. Cohn die Gleichheitswerthe von heller an und die Werthe von dunkler an, sowie das entsprechende andere Werthe paar je unter sich nahezu übereinstimmen. Bei den anderen Beobachtern findet eine solche Uebereinstimmung nicht statt. Dass die Gleichheitswerthe dunkler sind, wenn man von einem dunkleren, heller, wenn man von einem helleren Werth ausgeht, war zu erwarten.

Bemerkenswerth ist, dass die mittleren Variationen bei den Grundversuchen für Gelb (Herr Arrer, Zeile 8) besonders groß sind. Da Gelb bedeutend heller ist als die anderen benutzten Farben, und die Unterschiedsempfindlichkeit für Helligkeiten dem Weber'schen Gesetze folgt, so war auch ein solches Verhalten zu erwarten.

Die auffällige Größe der MV bei den Versuchen mit Blau für Dr. Cohn erklärt sich daraus, dass diese Versuche den übrigen zeitlich vorangingen und daher der Beobachter noch ungeübt war. Dazu kommt, dass diese Versuche in einem ungünstig gelegenen Experimentirzimmer unter dem störenden Einfluss der Sonne ausgeführt wurden. Bei denjenigen Versuchsreihen des Dr. Cohn, bei welchen die Experimente immer in derselben Richtung ange stellt wurden, zeigt sich eine regelmäßige Abnahme der MV vom ersten zum letzten Werthe (Tabelle, Zeile 1, 2, 4). Es weist dies auf eine gewisse Uebung innerhalb jedes einzelnen Versuches hin. Eine ähnliche Erscheinung ist bei den anderen Beobachtern nicht zu bemerken. Nur für Herrn Buck, Zeile 11, zeigt sich der ebenhellere bez. ebendunklere Werth genauer bestimmt als der ihm vorausgehende Gleichheitswerth.

Bei Herrn Arrer zeigt sich theilweise die entgegengesetzte Erscheinung. Ob dies auf Ermüdung zurückzuführen ist, ob es auf Zufälligkeiten beruht, oder wie es etwa sonst zu erklären, muss dahingestellt bleiben. Man könnte meinen, dass die Verschiedenheit der MV auf eine verschiedene Größe der Abstufungen in den verschiedenen Abtheilungen jedes Versuches zurückzuführen sei. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass die Wahl der Abstufungen innerhalb jedes Versuches möglichst gleichförmig geschehe, wie der S. 432 als Beispiel aufgeführte Versuch zeigt. Da bei den Versuchen von Herrn Altschul, welche denen der übrigen Beobachter vorausgingen, möglicher Weise eine unbeachtete Beeinflussung durch die Manipulationen des Experimentators stattfand, die sich in der auffallenden Kleinheit der MV zu verrathen schien, so sind diese Versuche unberücksichtigt geblieben. Bei den weiteren Versuchen wurde daher auch darauf Bedacht genommen, die Möglichkeit einer solchen Beeinflussung auszuschließen.

Das Gesammtergebniss der Versuche mit constanter Helligkeit ist, dass eine bloße Sättigungsänderung keine Aenderung der Helligkeit bewirkt. Wir hatten nämlich wechselnde Theile der Farbenscheibe durch ein mit der Farbe gleichhelles Grau ersetzt, und dabei immer denselben Helligkeitswerth erhalten, wie für die farbige Scheibe. Dies Resultat widerspricht an sich nicht der Annahme einer specifischen Helligkeit der Farben. Denn wir hatten ja nicht die sogenannte weiße Valenz, d. h. die Einwirkung der Pigmentscheibe auf die schwarz-weiße Substanz durch unsere Grundversuche bestimmt, sondern den gesammten Helligkeitseindruck der farbigen Scheibe. Ersetzen wir daher einen Theil der Farbe durch das entsprechende Grau, so haben wir damit neben der weißen Valenz auch eine etwa vorhandene specifische Helligkeit ausgeglichen. Wir können ja durch die bloße Empfindung, auch nach der Theorie von Hering, niemals unterscheiden, wie viel von dem gesammten Helligkeitseindruck einer Farbe auf jeden dieser beiden Factoren kommt. Ebenso wenig liegt aber in diesen Versuchen etwas, was für die Theorie der specifischen Helligkeit spräche. Jedenfalls ist soviel erwiesen, dass man bei Contrastversuchen, oder in ähnlichen Fällen, den durch Grundversuche bestimmten Helligkeitswerth einer

Farbe noch zur Berechnung der Helligkeit von Mischungen dieser Farbe mit Weiß und Schwarz verwenden kann.

Um dieses Resultat einwandfreier zu machen, wurden Versuche mit wechselnder Helligkeit der Farbenscheibe angestellt. Es wurde also eine beliebige Menge Weiß oder Schwarz oder beides der Farbenscheibe zugesetzt, und dann nach derselben Methode die Helligkeit berechnet und experimentell bestimmt.

Es zeigte sich bei den ersten Versuchen dieser Art sowohl bei Herrn Dr. Cohn wie bei Herrn Arrer eine starke Abweichung der beobachteten von den berechneten Werthen, und zwar waren bei Zusatz von Weiß die beobachteten Werthe fast stets zu dunkel. Bei Zusatz von Schwarz waren die Abweichungen bedeutend geringer. Bei Herrn Arrer kommen sie fast gar nicht vor (siehe Tabelle XI), und nur in einem Falle (Versuch IV, Tabelle III) beurtheilte Dr. Cohn die Scheibe bedeutend zu hell. Dieses Resultat musste zunächst in Erstaunen setzen, und es handelte sich darum, eine Erklärung für dieses merkwürdige Verhalten zu finden. Da besonders bei hellen ungesättigten Farben ein sehr starker Contrast auftrat, so lag es nahe, diesen für das störende Element zu halten. Es wurden daher für Grün mit Herrn Dr. Cohn eine Anzahl Versuche zur Ausschließung des Contrastes angestellt. Und zwar wurde zunächst die graue Scheibe so gewählt, dass ihre Helligkeit der berechneten Helligkeit der Farbenscheibe gleich war; dann wurde gemäß der für Grün gefundenen Helligkeitsgleichung ein bestimmter Sector, Weiß und Schwarz, durch Grün ersetzt, und dies so lange vergrößert, bis der röthliche Schimmer verschwunden war. Die beiden Scheiben erschienen dann gleich hell. Darauf wurde die so gefundene Zusammensetzung der grauen Scheibe constant gehalten, und ausnahmsweise die grüne Scheibe in der gewohnten Weise variirt. Es zeigte sich dann, dass der beobachtete Mittelwerth dem berechneten hinreichend genau entsprach. Wir lassen eine tabellarische Uebersicht dieser Versuche hier folgen.

| Nummer der Versuche | Datum | Helligkeit des Tages | Grüne Scheibe constant | | Graue Scheibe proportional variabel | | | Urtheile über Helligkeit und Farbencontrast | |
|---------------------|---------|----------------------|------------------------|------|-------------------------------------|-------|---------|---|---------------|
| | | | grün | weiß | grün | weiß | schwarz | | |
| I | 6. Juni | Hell | 90 | 270 | 50 | 275,5 | 35,5 | Gleich. | Kein Contrast |
| II | 7. » | Hell | 135 | 225 | 45 | 237,5 | 77,5 | Gleich. | Kein Contrast |
| III | 2. » | Hell | 180 | 180 | 40 | 199,0 | 121,0 | Gleich. | Kein Contrast |

| Nummer der Versuche | Datum | Helligkeit des Tages | Graue Scheibe constant | | | Grüne Scheibe abstufungsweise variabel | | | Berechnetes Mittel der Helligkeit | Differenz |
|---------------------|---------|----------------------|------------------------|-------|---------|--|---------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | | | grün | weiß | schwarz | grün | weiß | Richtung | | |
| I | 8. Juni | Hell | 50 | 275,0 | 35,0 | 87,5 | 273,5 | <i>W</i> | 270 | + 3,500 |
| II | 9. » | Hell | 45 | 237,5 | 77,5 | 132,375 | 227,625 | <i>Gr</i> | 225 | + 2,625 |
| III | 5. » | Hell | 40 | 199,0 | 121,0 | 181,875 | 178,125 | <i>Gr</i> | 180 | - 1,875 |

Es hätte also scheinen können, als ob der Contrast die starke Abweichung der Werthe verschuldete. Sicherlich erschwerte der Contrast das Urtheil, da nicht mehr eine Farbe mit Grau, sondern mit der Complementärfarbe verglichen werden musste. Indessen zeigte sich bei Wiederholung der Versuche mit wechselnder Helligkeit gleichmäßig für beide Beobachter eine Abnahme der Abweichungen. Gleichzeitig traten auch Abweichungen nach der entgegengesetzten Richtung (cf. Tabelle IV und XII).

Es drängt sich daher eine andere Erklärung der anfänglichen Abweichungen auf. Die Beobachter waren gewöhnt, ein gewisses Grau der Farbscheibe gleich zu schätzen, da ja zahlreiche Grundversuche und Versuche mit constanter Helligkeit vorangegangen waren. Sie waren daher gewissermaßen auf dies Grau eingestellt. Wie weit eine solche Einstellung gehen kann, zeigte sich einmal bei dem weniger geübten Beobachter Herrn Arrer in höchst auffälliger Weise. Es sollte ein Versuch mit constanter Helligkeit

ausgeführt werden, und zwar war beabsichtigt, der blauen Scheibe 10° Weiß und 61° Schwarz zuzusetzen. Aus Versehen wurde statt dessen 10° Schwarz und 61° Weiß zugesetzt. Dabei wurde nun, mit einem sehr kleinen Unterschiede, fast derselbe Helligkeitswerth als gleich beurtheilt, der bei richtiger Anstellung des Versuches zu erwarten gewesen wäre. Allerdings glaubte der Beobachter in diesem Falle, dass es sich um einen Versuch mit constanter Helligkeit handelte. Auch wurden seine Urtheile höchst unsicher und schwierig gegeben. In schwächerem Maße mag ähnliches auch bei den übrigen abweichenden Werthen der Fall gewesen sein.

Um ein Urtheil darüber zu gewinnen, wie sich die Vergleichung der Helligkeiten verschiedener Farben zu der Vergleichung der Helligkeiten derselben Farbe in Bezug auf die Genauigkeit und Sicherheit verhält, wurden einige besondere Versuche angestellt. Für den Beobachter Dr. Cohn hatten die verwendeten grünen und rothen Scheiben dieselbe Helligkeit (50° Weiß + 310° Schwarz). Es wurde nun eine Scheibe von 260° Roth und 100° Weiß erst mit einer aus Grün und Weiß, dann mit einer aus Roth und Weiß zusammengesetzten Scheibe verglichen, ebenso eine andere von 310° Grün und 50° Weiß mit einer rothweißen und einer grünweißen Scheibe. Die Resultate waren folgende:

| Constante Scheibe | Variable Scheibe | | | |
|-------------------------------------|--|-------------------------|-----------------------|-----------|
| | Arithmetisches Mittel (als gleich beurtheilt) | Gleichheits- strecke | Mittlere Variation | Differenz |
| 260° Roth + 100° Weiß | 265,666 Grün + 94,444 Weiß | $105 - 80 = 25$ | 6,611 | - 5,666 |
| » » | 261,25 Roth + 98,75 Weiß | $105 - 95 = 10$ | 2,875 | - 1,250 |
| 310° Grün + 50° Weiß | 308,75 Roth + 51,25 Weiß | $60 - 45 = 15$ | 6,250 | + 1,250 |
| » » | 307,75 Grün + 52,25 Weiß | $60 - 45 = 15$ | 3,750 | + 2,250 |

Die Versuche wurden genau in derselben Weise wie alle anderen angestellt. Ebenso bedeuten die Werthe in der obigen Tabelle dasselbe wie sonst. Es zeigte sich danach, dass die mittlere Variation des einzelnen Versuches bei verschiedenen Farben in etwa

1,5—2,5 Fällen zehnmal so groß war als bei derselben Farbe. Bei einer Vergleichung einer Scheibe von 300° Grün und 60° Weiß mit einer farblosen Scheibe hatte die mittlere Variation (Tabelle IV, Zeile 12) sogar nur 3,75° betragen, war also nicht größer als bei Vergleichung gleichfarbiger Scheiben. Ebenso war für einen Versuch mit 270° Roth und 90° Weiß (Tabelle XVI, Zeile 3) die mittlere Variation nur 2,312°; entspricht also ebenfalls ungefähr der für Vergleichung gleichfarbiger Scheiben gefundenen. Dasselbe gilt für die Gleichheitsstrecke und die Abweichungen der beobachteten und berechneten Werthe. Es lässt sich hier sogar ein Vortheil für die Vergleichung gleichfarbiger Scheiben nicht deutlich nachweisen, was indessen möglicherweise in der geringen Zahl dieser Versuche seinen Grund hat. Jedenfalls ist Feinheit und Sicherheit der Beobachtung für verschiedene farbige Scheiben nicht sehr bedeutend geringer als für gleichfarbige.

Allmählich gelang es, diese falsche Einstellung völlig zu überwinden.

Dass bei sehr hellen Werthen die mittleren Variationen der Einzelversuche im Sinne der Tabellen zunehmen, bei dunklen Werthen abnehmen, entspricht wiederum dem Weber'schen Gesetze.

Wir haben daher gesehen, dass die Unsicherheit in der Helligkeitsvergleichung von Farben mit Grau nicht so groß ist, wie Helmholtz anzunehmen scheint. War es uns doch möglich, bei gehöriger Uebung der Beobachter die Vergleichungen bis auf einen oder wenige Grade genau durchzuführen.

Versuche im Dunkelzimmer und mit einem Farbenblinden.

Es war nun interessant, mit den bei Tagesbeleuchtung bestimmten Werthen diejenigen zu vergleichen, die für dieselben Pigmentscheiben und dieselben Beobachter nach Hering's und Hillebrand's Methode bei schwacher Beleuchtung sich ergeben. Die Farbenkreisel wurden daher in das Dunkelzimmer gesetzt, in welches nur ein schmaler, mit einer Milchglasplatte verdeckter Spalt ein schwaches diffuses Licht einließ. Nachdem der Beobachter sein Auge längere Zeit der schwachen Beleuchtung adaptirt hatte, erschien die farbige Scheibe grau, und konnte nun genau mit einem

Grau der schwarz-weißen Scheibe verglichen werden. Die Bestimmung geschah in derselben Weise, wie bei unseren anderen Versuchen. Die Ergebnisse der Versuche sind in der nebenstehenden Tabelle zusammengestellt.

Es zeigt sich dabei, dass, ganz den Hillebrand'schen Angaben und dem Verhalten der Farben beim sogenannten Purkinje'schen Phänomen entsprechend, Roth und Gelb relativ dunkler, Grün und Blau relativ heller erscheinen als bei Tagesbeleuchtung. Nach Hering sollte Gelb relativ stärker verdunkelt, Blau relativ stärker erhellt erscheinen als Roth resp. Grün. Dies zeigt sich bei unseren Versuchen nicht, doch ist möglicherweise das abweichende Resultat in der verschiedenen Sättigung der verschiedenen verwendeten Farben begründet.

Interessant ist, dass das Purkinje'sche Phänomen nicht nur durch eine verschieden starke, relative Verdunkelung der verschiedenen Farben im Vergleich zu Grau bewirkt wird, sondern dass Grün und Blau eine relative Erhellung gegen Grau zeigen. Demnach scheint hier das Hinzukommen der farbigen Erregung eine Verdunkelung des Gesamteindrucks zu bewirken. Dies würde mit Hering's Ansicht übereinstimmen, dass Grün und Blau, welche nach seiner Ansicht Assimilations-

| Beobachter | Nummer des Versuches | Datum | Farbenscheibe | Helligkeitsscheibe | | | | Verschiebung der Helligkeit | |
|---------------|----------------------|----------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|
| | | | | Richtung | Gleichheitsstrecke | Mittlere Variation | Arithmetisches Mittel | | bei Tagesbeleuchtung |
| Herr Dr. Cohn | I | 26. Juni | Roth | S | 16 — 8 = 8 | 1,750 | 12,000 | 50,000 | — 38,000 |
| » | II | 27. » | Grün | S | 70 — 58 = 12 | 3,125 | 63,500 | 50,000 | + 13,500 |
| Herr Arrer | III | 28. » | Blau | S | 68 — 56 = 12 | 3,750 | 64,500 | 51,000 | + 13,500 |
| » | IV | 3. Juli | Gelb | S | 166 — 153 = 13 | 3,500 | 159,500 | 180,000 | — 20,500 |

processen entsprechen, neben der Farbenempfindung eine Dunkelempfindung auslösen. Dennoch ist ein Beweis für die Annahme einer specifischen Helligkeit der Farben auch hierin nicht zu finden, da die Zunahme der Helligkeit einer Farbe bei wachsender Lichtstärke stets von dem relativen Wachsthum der Farberregung im Vergleich mit der farblosen Erregung abhängig sein wird. Die Erscheinung kann also ebenso gut davon herrühren, dass bei Grün und Blau dieses relative Wachsthum mit zunehmender Lichtstärke langsamer erfolgt als bei Roth und Grün.

Es ist mehrfach, und besonders von Hering und Ebbinghaus, hervorgehoben worden, dass das Verschwinden der Farbe bei schwacher Beleuchtung dem Sehen des Farbenblinden entsprechend erfolge. Da nämlich dem Farbenblinden bei denjenigen Farben, für welche ihm die Empfindung fehlt, nur die Erregung der schwarzweißen Substanz übrig bleibt, so muss die Helligkeit der Farben im Vergleich zu Grau derjenigen Helligkeit entsprechen, welche der normal Sehende bei schwacher Beleuchtung hat, wenn auch für ihn keine Erregung der farbenempfindenden Substanz¹⁾ mehr merkbar wird. Es müsste demnach z. B. einem Rothgrünblinden Grün heller, Roth dunkler erscheinen, als dem Farbentüchtigen.

Es war uns nun möglich, in Herrn stud. phil. Buck einen Fall von typischer Rothgrünblindheit aufzufinden. Im Spectrum sah er, wie ich unter der gütigen Mitwirkung des Herrn Mentz feststellte, nur 2 Farben, die er als Gelb und Blau bezeichnete. Das Spectrum war am rothen Ende stark verkürzt, bis fast in die Gegend der *D*-Linie. Die beiden Farben stießen in der Gegend der *E*-Linie zusammen und bildeten hier einen Bezirk, in welchem die Empfindung zwischen beiden schwankte. Auf der violetten Seite war das Spectrum nicht verkürzt.

Die Grundversuche für Grün ergaben einen Mittelwerth von 44° Weiß (s. Tabelle VII), also einen um etwa 6° dunkleren Mittelwerth als den für die farbentüchtigen Beobachter erhaltenen. Die Controlversuche mit wechselnder Helligkeit und Sättigung,

1) Wenn wir von schwarz-weißer Substanz oder farbenempfindender Substanz sprechen, so geschieht dies nur des bequemen Ausdrucks wegen, ohne dass wir damit etwas über die physische Grundlage der betreffenden Empfindungen aussagen wollen.

welche in derselben Weise wie bei den farbentüchtigen Beobachtern angestellt wurden, zeigen überall etwas zu helle Werthe. Die Abweichung ist nicht übermäßig groß, jedoch in ihrer Richtung auffällig constant; sie würde bedeutend geringer werden und diese auffallende Eigenschaft verlieren, wenn man der Berechnung die für Farbentüchtige gefundenen Werthe zu Grunde legte. Jedenfalls hat sich in keinem der Versuche eine Erhellung im Vergleich zum Farbentüchtigen gezeigt, während im Dunkelzimmer Grün um $13,5^{\circ}$ erhellt erschien.

Sollten sich diese Ergebnisse bei der Prüfung weiterer Farbenblinder bestätigen, so würden sie jedenfalls mit der Annahme einer spezifischen Helligkeit der Farben schwer vereinbar sein. Die Abreise des Herrn Buck aus Leipzig verhinderte uns leider daran, die Versuche mit ihm auch für andere Farben durchzuführen.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

- 1) Eine exacte Vergleichung von Farben in Bezug auf ihre Helligkeit ist möglich, und zwar scheint bei gehöriger Uebung des Beobachters und Einhaltung exacter psychophysischer Methoden die Genauigkeit und Sicherheit bei Vergleichung einer farblosen und einer farbigen oder zweier verschiedenfarbiger Scheiben nicht bedeutend geringer zu sein, als bei Vergleichung zweier gleichfarbiger Scheiben. Die mittleren Variationen der Einstellungen geben ein gewisses Maß der Uebungs- und Ermüdungseinflüsse.
- 2) In Bezug auf die Frage der »spezifischen Helligkeit« geben die an normalsichtigen Individuen angestellten Versuche kein Resultat. Denn die Ergebnisse der Versuche am Farbkreisell lassen sich mit jeder Theorie vereinigen, sie sind zweideutig. Die Versuche im Dunkelzimmer enthalten lediglich eine Modification des Purkinje'schen Versuchs. Dieser ist aber ebenfalls zweideutig: er kann ebenso gut aus dem verschiedenen relativen Wachsthum der farblosen und der farbigen Erregungcurve bei den verschiedenen Farben erklärt werden, und diese Erklärung ist sogar die näher liegende: erstens in Anbetracht des Umstandes, dass man jede Erregung aus einer farbigen

und einer farblosen Componente zusammengesetzt denken muss, und es von vornherein sehr unwahrscheinlich wäre, dass diese sich bei jeder Wellenlänge übereinstimmend zu einander verhielten; zweitens wegen des bekannten Einflusses der Helligkeit auf die Sättigung, wonach Zunahme der Helligkeit von einem gewissen Punkte an Abnahme der specifischen Farbeempfindung bez. Zunahme der farblosen Empfindung verursacht.

- 3) Die Versuche am Farbenblinden widersprechen direct der Annahme der »specifischen Helligkeit«. Es würde aber wünschenswerth sein, dass solche Versuche an Farbenblinden in weiterem Maßstabe ausgeführt würden. Sie allein können die Frage zur Entscheidung bringen.
- 4) Der Farbencontrast wirkt erschwerend auf die Vergleichung ein, ohne aber das Resultat der Versuche zu ändern.

Schließlich fühle ich das Bedürfniss, Herrn Professor Wundt und Herrn Privatdocent Dr. Külpe für die Anregung zu dieser Arbeit und die mir während derselben gewährten werthvollen Rathschläge, sowie meinen Versuchspersonen, besonders Herrn Dr. Cohn, für ihre Theilnahme an den Untersuchungen auch an dieser Stelle meinen Dank auszusprechen.