

III. *Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben; von H. Helmholtz.*

(Vom. Hrn. Verfass. mitgetheilt aus Müller's Archiv. — Es ist dies der im vorigen Hefte vom Hrn. Verfass. erwähnte Aufsatz.)

Die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge und Farbe unterscheiden sich in ihrer physiologischen Wirkung dadurch wesentlich von den Tönen verschiedener Schwunddauer und musikalischer Höhe, dafs je zwei der ersteren, gleichzeitig auf dieselben Nervenfasern einwirkend, eine einfache Empfindung hervorbringen, aus welcher auch das geübteste Sinnesorgan nicht mehr die einzelnen zusammensetzenden Elemente erkennen kann, während zwei Töne durch ihr Zusammenwirken zwar die eigenthümlichen Empfindungen der Harmonie und Disharmonie erzeugen, aber dabei doch stets vom Ohre einzeln empfunden und erkannt werden. Diese Vereinigung der Eindrücke zweier verschiedener Farben zu einem einzigen neuen Farbeneindruck ist offenbar ein rein physiologisches Phänomen und hängt nur von der eigenthümlichen Reactionsweise des Sehnerven ab. Objectiv im rein-physikalischen Gebiete findet eine solche Vereinigung niemals statt, die Strahlen verschiedener Farben gehen vielmehr stets ohne allen gegenseitigen Einflufs neben einander her, und wo sie dem Auge auch vereinigt erscheinen sollten, sind sie durch physikalische Mittel stets von einander zu scheiden.

Die Untersuchung des Zusammenwirkens der Farben hat auf die Lehre von den Grundfarben geführt, aus denen alle andere combinirt wären, oder wenigstens combinirt werden könnten. Man hat diese Lehre aber von Anfang an nur auf eine einzige Art von Erfahrungen gegründet, nämlich auf diejenigen, welche durch die Mischung der Farbstoffe gewonnen waren und von denen man stets annahm, dafs sie dieselben Resultate geben müßten, wie die Zusammensetzung des gefärbten Lichtes selbst, eine An-

nahme, deren Unrichtigkeit ich im Folgenden nachzuweisen beabsichtige.

Schon Plinius spricht davon, daß die ältesten griechischen Maler mit vier Farbstoffen alles darzustellen gewußt hätten, während man in seiner Zeit deren vielmehr besäße und damit doch nicht so viel, wie Jene, leistete. Leonardo da Vinci, ebenso berühmt als wissenschaftlicher Bearbeiter der Malerei, wie als Künstler, kennt noch nicht die Lehre von den drei sogenannten Grundfarben, er nennt außer Schwarz und Weiß, welche jedoch nicht im eigentlichen Sinne Farben wären, vier, nämlich Gelb, Grün, Blau und Roth. Die nachher allgemein angenommenen drei Grundfarben, Roth, Gelb und Blau finden sich, und zwar, wie es scheint, als eine damals allgemein anerkannte wissenschaftliche Thatsache, einem Versuch zur Classification der Farben und Farbstoffe von Waller zu Grunde gelegt in den *Philosophical Transactions* des Jahres 1686, also noch vor Newton's Untersuchungen über die Zerlegung des weißen Lichts durch das Prisma, zu einer Zeit wo man eben noch keine andere Methode, Farben zusammenzusetzen, kannte, als die Mischung der Farbstoffe. Auch in den späteren Versuchen, die natürlichen Farben nach ihrer Zusammensetzung aus den genannten drei Grundfarben zu classificiren, von Castell, dem Astromen Mayer, Lambert, Hay, Forbes ¹⁾ wird überall die Mischung der Farbstoffe zu Grunde gelegt. Als Repräsentanten der Grundfarben und zur Darstellung der zusammengesetzten Mischfarben gebraucht Mayer Zinnober, Königsgelb, Bergblau, Lambert Carmin, Gummi-Gutti und Berliner-Blau, welche schon reinere Mischungen geben, und Hay, dessen Geschicklichkeit in der Wahl und dem Gebrauche der

1) P. Castell Farbenclavier.

Mayer in Göttinger gel. Anzeigen. 1758. St. 147.

J. H. Lambert Beschreibung einer Farbenpyramide. Berlin, 1772 (Darin ist auch die ältere Literatur zusammengestellt).

D. R. Hay *Nomenclature of Colours*.

J. D. Forbes in *Philosophical Magazine Vol. XXXIV. p. 161.*

Farben für diesen Zweck *Forbes* besonders rühmt, *Carmin*, *Chromgelb* und französisches *Ultramarin*.

Einige Physiker versuchten es auch, den drei Grundfarben eine objective Existenz anzuweisen. Es war zuerst *Mayer*, der die Ansicht aufstellte, den drei Grundfarben könnte wohl dreierlei verschiedene Arten Licht, ein rothes, ein gelbes und ein blaues entsprechen, deren jedes Strahlen von allen Abstufungen der Brechbarkeit lieferte. Es wäre demnach an jeder Stelle des Spectrums rothes, gelbes und blaues Licht gemischt, die sich aber nicht durch ihre Brechbarkeit unterschieden und sich deshalb durch das Prisma nicht trennen ließen.

Am rothen Ende des Spectrums sollte das rothe Licht überwiegen, am blauen das blaue, in der Mitte das gelbe. Dieselbe Ansicht wurde später von *D. Brewster* aufgestellt, und dieser berühmte Physiker glaubte durch Absorption in gefärbten durchsichtigen Mitteln die Trennung der verschiedenen Arten des Lichts in allen Theilen des Spectrums wirklich bewerkstelligen zu können.

Newton hatte, nach seiner Entdeckung der Zusammensetzung des weissen Lichts aus farbigem, sieben Hauptfarben im Spectrum angenommen: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Er wählte diese Zahl wahrscheinlich wegen der Analogie, die er zwischen den Farben und den musikalischen Intervallen der Durtonleiter suchte, und die er auch der bekannten Eintheilung seiner siebenfarbigen Scheibe zu Grunde legte. Wohl nur deshalb hat er Blau und Indigoblau unterschieden. Dafs er diese Unterscheidung gerade in den blauen Farbentönen vornahm, liegt wohl daran, dafs die meisten Prismen die blaue Hälfte des Spectrums unverhältnismäfsig ausdehnen, und *Newton* die Breite der Farbenstreifen unmittelbar mit den musikalischen Intervallen vergleichen wollte. Uebrigens mußte er sich mit sehr unvollkommenen Apparaten behelfen, und konnte deshalb auch nur wenige Beobachtungen über die Resultate künstlicher Vereinigung von zwei oder mehreren prismatischen Farben anstellen, welche im Ganzen mit den aus der

Mischung von Farbstoffen entnommenen übereinzustimmen schienen. Auch er benutzt daneben die Resultate der Vermischung farbiger Pulver.

Newton hat seine Spectra stets mit Sonnenlicht dargestellt und nicht die Methoden angewendet, welche nöthig sind, um ganz vollständige Trennung der verschiedenfarbigen Strahlen zu erhalten, deshalb auch nicht die Fraunhofer'schen Linien im Sonnenlichte gesehen. Wollaston¹⁾ stellte zuerst ein so reines Spectrum dar, dafs einige dieser Linien darin gesehen werden konnten. Er blickte nach einer feinen Spalte, welche Tageslicht einfallen liefs, durch ein sehr gutes Flintglasprisma mit unbewaffnetem Auge hin, und sah, wie es unter diesen Umständen in der That der Fall ist, vier gut abgegränzte Farbenstreifen im Spectrum: Roth, Gelbgrün, Blau und Violett. Es ist nämlich der Uebergang von röthlichem Orange durch Orange und Gelb in Gelbgrün, der von Grün in Blau, und von Blau in Violett im Flintglasspectrum so schnell, dafs er ohne Anwendung eines vergrößernden Fernrohres dem Auge fast verschwindet. Dabei begränzen die Fraunhofer'schen Linien *G* und *H* das Violett auf beiden Seiten sehr scharf, der Uebergang von Grün in Blau wird durch die Linien *b* und *F* markirt, und der an sich schon sehr schmale Streifen des reinen Gelb ist im reflectirten Himmelslichte verhältnismäfsig lichtschwach, so dafs es gegen das stärkere Roth und Grün zurücktritt, und diese beiden Farben unmittelbar an einander zu gränzen scheinen. Wollaston nimmt deshalb vier Grundfarben an: Roth, Grün, Blau, Violett.

Thomas Young tritt Wollaston's Beschreibung des Spectrums bei und verändert darnach seine Theorie des Farbensehens, welche er zuerst auf die gewöhnlich angenommenen drei Grundfarben: Roth, Gelb und Blau gegründet hatte, indem er dafür jetzt Roth, Grün und Violett setzt, wobei man voraussetzen mufs, dafs er gewufst habe, aus prismatischem Roth und Grün lasse sich Gelb,
aus

1) *Philos. Transact.* 1802. *P. II.* p. 378.

aus prismatischem Grün und Violett Blau mischen. Die erwähnte Theorie von Young ist wichtig, weil darin den drei Grundfarben eine bestimmte physiologische Bedeutung untergelegt wird. Er nimmt an, dafs die an der Oberfläche der Retina gelegenen Theilchen eigenthümlicher Schwingungen fähig wären, und dafs an jeder Stelle Theilchen von dreierlei verschiedener Schwingungsdauer sich neben einander vorfänden, entsprechend den Oscillationsgeschwindigkeiten der drei Grundfarben, Violett, Grün und Roth, welche im Verhältnifs wie 7, 6 und 5 ständen. Wäre die Schwingungszahl eines Lichtstrahls 5, so würde er blofs auf die rothempfindenden Nervenenden wirken; wäre sie $5\frac{1}{2}$, so würde er gleichzeitig die roth- und die grünempfindenden anregen, und dadurch die gemischte Empfindung des Gelb hervorbringen u. s. w.

Uebrigens habe ich ebenso wenig wie Forbes, bei Newton's Nachfolgern bis in die neueste Zeit Versuche über die Mischung einzelner prismatischer Farben gefunden. Es scheint, dafs man die Sache stets durch die Mischversuche mit farbigen Pulvern als vollständig erledigt angesehen hat. Ja, man hat sich sogar durch abweichende Resultate, welche der Farbenkreisel gab, nicht darauf aufmerksam machen lassen, dafs hier Schwierigkeiten verborgen liegen.

Die Zurückführung der Farben auf drei Grundfarben hat bei den verschiedenen Beobachtern dreierlei verschiedenen Sinn:

1) entweder, dafs die Grundfarben solche seyen, aus denen alle möglichen anderen zusammengesetzt seyen, oder sich mindestens zusammensetzen liefsen;

2) oder, wie bei Mayer und Brewster, dafs die Grundfarben dreierlei objectiven Arten des Lichtes entsprächen;

3) oder, dafs sie, wie bei Thomas Young, dreierlei verschiedenen Grundempfindungsarten der Sehnervenfasern entsprächen, aus denen die übrigen Farbenempfindungen sich zusammensetzten.

Auf die zweite Ansicht und die Gründe, wodurch Brewster sie zu stützen versucht hat, werde ich an einem andern Orte zurückkommen, und glaube im Stande zu seyn, diese Gründe zu widerlegen. Die beiden andern Ansichten müssen aber jedenfalls an den prismatischen Farben, als den reinsten und gesättigsten, welche wir kennen, geprüft werden. Das soll die Aufgabe vorliegenden Aufsatzes seyn.

Die Mittel, dessen ich mich bedient habe, um sämtliche Combinationen aus je zwei einfachen Spectralfarben herzustellen, ist folgendes: Ich schneide in einen schwarzen Schirm zwei hinreichend schmale ($\frac{1}{4}$ Linie breite) Spalten ein, welche zusammen ein V bilden. Beide sind unten 45° gegen den Horizont geneigt, stoßen mit ihren untern Enden zusammen, und schließsen somit einen rechten Winkel zwischen sich ein. Nach diesen Spalten sieht man aus genügender Entfernung (12 Fufs) durch ein Fernrohr und Prisma hin. Das Prisma ist dicht vor dem Objectivglase des Fernrohrs in der Stellung der kleinsten Ablenkung befestigt, und die Kante seines brechenden Winkels steht vertical. Es ist bekannt, dafs man durch ein verticales Prisma, nach einer verticalen Spalte blickend, ein rechteckiges Spectrum sieht, in welchem die Farbenstreifen und die Fraunhofer'schen Linien vertical verlaufen. Sieht man durch ein verticales Prisma nach einer schiefen Spalte, so bekommt das Spectrum die Form eines schiefwinklichen Parallelogramms, mit zwei horizontalen und zwei der schiefen Spalte parallelen Seiten. Die Farbenstreifen und Fraunhofer'schen Linien laufen natürlich hier auch der Spalte parallel. Sehen wir nach unserer zusammengesetzten Winkelspalte, so decken sich die Spectra seiner beiden Schenkel theilweise, und da in dem einen die Farbenstreifen von oben links nach unten rechts, im andern von oben rechts nach unten links verlaufen, so durchschneiden sie sich gegenseitig unter rechten Winkeln. Jeder Farbenstreifen des einen schneidet in dem beiden Spectren gemeinsamen Felde jeden des andern, und wir bekommen somit gleich-

zeitig sämtliche Combinationen, welche aus je zwei einfachen Farben gebildet werden können.

Da es darauf ankommt, die Spalte in ihrer ganzen Ausdehnung gleichmäfsig zu erleuchten, kann man directes Sonnenlicht nicht wohl anwenden, und mufs sich mit reflectirtem Lichte des Himmels, oder mit dem einer gleichmäfsig von der Sonne beschienenen weissen Fläche begnügen. Diese Erleuchtungen reichen in der Regel auch vollkommen aus.

Das von mir angewendete Flintglasprisma, dem Hrn. Professor Neumann zugehörig, liefs bei Anwendung von Sonnenlicht und einer feinen Spalte eine sehr grofse Zahl der feineren Fraunhofer'schen Linien sehen. In dem Spectrum der eben beschriebenen, etwas breiteren Winkelspalte waren wenigstens die stärkeren noch deutlich sichtbar, namentlich die von Fraunhofer durch die Buchstaben *A*, *B*, *D*, *E*, *b*, *F*, *G* und *H* bezeichneten. Die Anwesenheit dieser Linien giebt zunächst die Bürgschaft dafür, dafs in dem Spectrum jedes einzelnen Schenkels die verschiedenfarbigen Strahlen nicht über einander greifen konnten, dafs ich es also mit wirklich reinen Farbenstrahlen zu thun hatte; und zweitens erleichtern sie sehr die Orientirung in dem gemischten Felde, durch welches man sie deutlich verlaufen sehen kann. Mein Fernrohr hat ein Fadenzkreuz aus zwei sich rechtwinklich kreuzenden Fäden, diese stellte ich den dunklen Linien der beiden sich deckenden Spectra parallel. Die Fäden bezeichnen dann nach dem oberen und unteren Rande des lichten Feldes zu, wo ungemischte Farben liegen, unmittelbar die beiden reinen Farben, welche an ihrem Kreuzungspunkte gemischt sind.

Es ist nöthig, die relative Intensität der gemischten Farben ändern zu können. Das bewirkte ich, indem ich das Prisma aus seiner verticalen Stellung in eine mehr oder weniger schiefe brachte. Seine Fassung, mit der es an das vordere cylindrische Ende des Fernrohrs befestigt war, liefs sich um dieses als Axe drehen, und es konnte so in jede beliebige Stellung gegen den Horizont gebracht

werden. Um zu erläutern, wie dadurch die Lichtintensität des Spectrums geändert werde, beschränken wir unsere Betrachtung zunächst auf eine einzige Spalte. Die Lichtintensität des Spectrums hängt von der Menge Licht ab, die durch die Spalte auf das Prisma und Fernrohr fällt, und von dem scheinbaren Flächenraum des Spectrums, zu dessen Beleuchtung diese Lichtmenge verwendet wird. Die Lichtmenge, welche überhaupt einfällt, ändert sich nicht, wenn wir das Prisma um die Axe des Fernrohrs drehen, wohl aber der erleuchtete Flächenraum des Spectralbildes. Letzterer hat, wie schon oben bemerkt ist, die Gestalt eines Parallelogramms. Zwei seiner Seiten sind der Spalte parallel und stets eben so lang, wie die Spalte selbst im Fernrohr erscheint. Die beiden anderen Seiten stehen senkrecht auf der Kante des brechenden Winkels, und ihre Länge hängt nur von der zerstreuen Kraft des Prisma ab. Das Spectrum bildet also ein Parallelogramm, dessen Seiten constant sind, dessen Winkel aber durch Drehung des Prisma um die Axe des Fernrohrs geändert werden können. Bekannte Sätze der elementaren Geometrie lehren, daß der Flächeninhalt eines solchen Parallelogramms am größten ist, wenn es rechte Winkel hat, und desto kleiner wird, je schiefer die Winkel werden. Da nun eine gleiche Menge Licht eine kleinere Fläche heller erleuchtet, als eine größere, so muß die scheinbare Helligkeit des Spectralbildes am kleinsten seyn, wenn es ein Rechteck ist, d. h. wenn die brechende Kante der Spalte parallel ist, und desto heller werden, je größer der Winkel zwischen beiden wird.

Die beiden Schenkel unserer Winkelspalte geben, durch ein verticales Prisma gesehen, zwei gleich helle Spectren, weil die Richtung der brechenden Kante mit beiden den gleichen Winkel von 45° macht; drehen wir aber das Prisma um die Axe des Fernrohrs, so wird der eine Winkel größer, der andere kleiner, und es variiren dabei die beiden Spectren in jedem beliebigen relativen Verhältniß ihrer Helligkeit.

Je heller man auf diese Weise ein Spectrum macht,

desto näher rücken seine Farbenstreifen zusammen; um daher die Reinheit der Farben nicht zu sehr zu beeinträchtigen, ist es rathsam, stärkere Unterschiede der Helligkeit nicht auf die bisher beschriebene Weise hervorzubringen, sondern durch andere Mittel. Sehr leicht geschieht diefs, indem man dünnere oder dickere, geölte oder nicht geölte Papierblättchen hinter die eine Spalte setzt. Diese lassen nur einen kleinen Theil des auffallenden Lichts durchscheinen, während durch die andere Spalte das ungeschwächte Himmelslicht einfällt.

Hat man sich in der beschriebenen Weise ein Feld hergestellt, welches mit den Mischfarben je zweier reiner Spectralfarben bedeckt ist, so wird man sich bald überzeugen, daß man die Färbung, namentlich der weißlicheren Stellen, dieses Feldes zu beurtheilen unfähig ist, so lange man gleichzeitig gesättigte Farben daneben hat.

Es ist also durchaus nöthig, die Stellen, über deren Farbe man urtheilen will, getrennt von den übrigen zu betrachten. Wenn man mit dem Fernrohr beobachtet, ist das Mittel dazu sehr einfach. Man stelle das Fadenkreuz auf die fragliche Stelle ein und entferne sich mit dem Auge ein bis zwei Fufs vom Oculare. Aus dieser Entfernung sieht man nur eine sehr kleine Stelle des farbigen Bildes durch das Ocular hindurch, deren Farbe man unbehindert durch die Gegensätze blendenderer Farben beurtheilen kann. Die Fäden des Fadenkreuzes und ihre Kreuzungsstelle findet man, wenn man fernsichtig genug ist, auch bei dieser Entfernung des Auges leicht wieder, wenn nicht, doch mit Hilfe eines schwachen Concavglases, welches der Accommodation des Auges passend nachhilft. Um die beobachtete Farbencombination schnell wiederfinden und einem Andern zeigen zu können, bringe ich in dieser Entfernung vom Oculare des Fernrohrs einen verstellbaren dunkelen Schirm mit einer kleinen runden Oeffnung an, durch welches das Auge nach dem Oculare des Fernrohrs hin zu sehen hat. Will man statt der zusammengesetzten Farbe wieder die beiden constituirenden einfachen sehen, so läßt man von einem

Anderen erst die eine, dann die andere Spalte bedecken, so daß immer nur die eine der beiden gemischten Farben stehen bleibt, oder man schaltet zwischen das Auge und die Oeffnung im Schirm, wodurch es nach dem Oculare hinsieht, ein zweites kleines Prisma ein, welches statt des einen hellen Flecks im Oculare zwei mit getrennten Farben erscheinen läßt. Zur sicheren Bestimmung sehr weißlicher Mischfarben ist es vortheilhaft, ein weißes, weiß erleuchtetes Papierblatt rings um die Oeffnung des Oculars anzubringen, und mit dessen Farbe die beobachtete Farbe zu vergleichen. Auch habe ich bemerkt, daß das Auge bei längerer Betrachtung sehr weißlicher Mischfarben für feine Farbenunterschiede unempfindlich wird, und es rathsam ist, es zuweilen eine Zeit lang ausruhen, oder auf den Gegenständen der Umgebung herumschweifen zu lassen. Bei erneuerter Beobachtung der Mischfarbe sieht man dann oft eine farbige Beimischung des scheinbaren Weiß deutlich, die man vorher nicht mehr erkennen konnte, und die bei längerer Betrachtung auch wieder verschwindet.

Auf diese Weise ist es möglich, sämtliche Combinationen zweier prismatischen einfachen Strahlen in allen Abstufungen ihrer relativen Stärke herzustellen und ungestört von andern Farbeindrücken zu betrachten. Meine Beobachtungen, deren Hauptpunkte ich mir von mehreren anderen, in Beurtheilung der Farben geübten Personen bestätigen ließ, um nicht durch etwa vorhandene subjective Fehler meiner Augen getäuscht zu werden, haben folgende von den bisherigen Ansichten zum Theil auffallend abweichende Resultate gegeben.

1. *Roth* giebt mit Orange ein röthlicheres Orange, mit Gelb Orange; die gemischten Farben unterscheiden sich nicht merklich von den Abstufungen des Orange, die in dem einfachen Spectrum vorkommen. Mit Grün giebt es ein Gelb, welches, weniger gesättigt, fahler ist, als das einfache Gelb, und bei vorwaltendem Roth durch Orange in Roth, bei vorwaltendem Grün durch Gelbgrün in Grün übergeht. Mit den grünblauen Tönen des Spectrums ent-

steht eine fleischfarbene, mit den himmelblauen eine rosa-rothe Farbe, welche bei überwiegendem Blau in weisliches Violett, mit überwiegendem Roth in Carminroth übergeht. Vereinigt man endlich das Roth mit weiter nach dem Ende des Spectrums hin gelegenen indigoblauen oder violetten Strahlen, so bekommt man ein immer dunkleres und gesättigteres Purpurroth.

2. *Orange* mit Gelb giebt ein gelblicheres Orange, mit Grün ein fahles Gelb, mit Blau fleischfarbene Töne, die bei Indigo und Violett in Carminroth übergehen.

3. *Gelb* mit Grün giebt ein grünliches Gelb, ähnlich den dazwischen gelegenen Farbentönen des Spectrums. Mit Himmelblau giebt es ein schwach grünliches Weifs, mit Indigoblau *reines Weifs*, mit Violett ein schwach fleischfarbenes Weifs, was bei überwiegendem Violett in weisliches Violett, bei überwiegenderem Gelb in weisliches Gelb übergeht.

4. *Grün* giebt mit Blau Grünblau, mit Indigo ein Hellblau, welches aber viel matter und weislicher ist als das des Spectrums, ebenso mit Violett Hellblau.

5. *Blau* mit Indigo giebt die dazwischenliegenden Töne, mit Violett ein Dunkelblau, was aber weniger gesättigt ist, als das Indigo des Spectrums.

6. *Indigo* mit Violett die zwischenliegenden Töne.

Die auffallendste und von den bisherigen Ansichten abweichendste Thatsache ist die, dafs unter den Farben des Spectrums nur zwei vorkommen, welche zusammen reines Weifs geben, also Complementarfarben sind, und dafs diefs Gelb und Indigoblau sind, zwei Farben, aus deren Verbindung man bisher fast immer Grün entspringen liefs. Das Gelb, was man zu dieser Mischung gebraucht, ist ein sehr schmaler Strich im Spectrum, zwischen den Linien *D* und *E* gelegen, und etwa dreimal so weit von *E* als von *D* entfernt, ein Gelb, welches weder in das Orange, noch in das Grünliche zieht und unter den Pigmenten am besten durch das chromsaure Bleioxyd (Chromgelb) wiedergegeben wird. Das dazu gehörige Blau hat eine gröfsere

Breite und umfasst die Abstufungen dieser Farbe, welche Newton und Fraunhofer als Indigo bezeichnen, etwa von der Mitte zwischen den Linien *F* und *G* bis gegen *G* hin. Unter den Farbstoffen giebt dunkles Ultramarin diese Farbe aber besser wieder, als das mehr violette Indigo. Hat man die Mischungsfarben durch zwei gleich helle Spectra eines Flintglasprisma hervorgebracht und zur Erleuchtung das Licht der Wolken gebraucht, so ist es gerade die Mitte zwischen den Linien *F* und *G*, welche für das Weiß die richtige Lichtintensität hat. Nach dem Violett und der Linie *G* zu wird das Blau immer lichtschwächer, und hier muß es daher relativ zum Gelb verstärkt werden, um Weiß zu geben. Aus diesem Grunde fällt z. B. im Spectrum eines weißlich blauen Himmels das Weiß nahe der Linie *G*. Auch das hellere Blau des Spectrums mehr nach der Linie *F* hin giebt mit reinem Gelb, und das Violett mit einem etwas in das Grünliche ziehenden Gelb, bei passender Abgleichung ihrer relativen Intensitäten, Farbentöne, welche dem Weiß sehr ähnlich werden, aber doch immer einen Anflug von Färbung behalten. Sie ziehen meist in das Fleischfarbene, Bläuliche und Grünliche hinüber; zuweilen ist es auch schwer, der Färbung einen bestimmten Namen zu geben, aber niemals ist es mir gelungen, aus diesen Farben ein klares, reines Weiß zu erhalten. Wenn die Untersuchung mit vollkommeneren Instrumenten ausgeführt würde, als es die meinigen waren, welche dem Felde der zusammengesetzten Farben eine grössere Flächenausdehnung zu geben erlaubten, würden sich die Gränzen der weißgebenden Strahlen wahrscheinlich genauer angeben lassen, weil die Vergleichung der Farbentöne grösserer Flächen viel leichter und schärfer auszuführen ist.

Durch die weißgebenden Strahlen wird die ganze Breite des Spectrum in drei Abtheilungen getheilt. Deren erste, die rothe entspricht, wenn man die Verhältnisse der Lichtschwingungen mit denen der Schallwellen vergleicht, etwa dem Intervalle einer kleinen Terz, die mittlere grüne einer grossen Terz, und die dritte violette ist etwas kleiner als

eine kleine Terz. - Farben der ersten und zweiten verbinden sich zu gelben Tönen mit Uebergängen in Roth, Fleischfarben, Weiß und Grün, solche der zweiten und dritten zu blauen mit Uebergängen in Grün, Weiß und Violett, solche der ersten und dritten zu purpurrothen mit Uebergängen in Fleischfarben, Rosa und Violett.

Was die Zusammensetzungen von drei einfachen Farben betrifft, so dürfen wir wohl voraussetzen, daß Weiß nur dann entstehen könne, wenn Strahlen aus den drei verschiedenen Abtheilungen des Spectrum passend vereinigt werden. Es läßt sich wenigstens nicht annehmen, obgleich man natürlich durch das Experiment nicht alle möglichen Combinationen erschöpfen kann, daß z. B. die gelben oder gelblichen Farben, welche aus solchen der rothen und grünen Abtheilung entstehen, durch weiteren Zusatz von einer oder mehreren Farben, welche diese Abtheilungen enthalten, Roth, Gelb oder Grün, in Weiß übergehen sollten. Eben so ist es mit den Mischungen der grünen und violetten, so wie mit denen der rothen und violetten Abtheilung. Dagegen gelingt es, Weiß aus ziemlich mannigfaltigen Combinationen solcher drei Farben zu bilden, welche aus allen drei Abtheilungen gleichzeitig entnommen sind. Ich habe dazu einen schwarzen Schirm mit drei Spalten gebraucht. Zwei waren parallel unter 45° gegen den Horizont geneigt, und standen in solcher Entfernung von einander, daß durch das Prisma aus der gewöhnlichen Entfernung gesehen, das Violett der einen auf das Roth der andern fiel. Die Spalte, welche das Violett giebt, muß man etwa doppelt so breit machen, als die andere, weil sonst das Violett zu lichtschwach gegen das Roth wird. Eine dritte Spalte, die das Grün zur Mischung geben sollte, wurde rechtwinklich gegen die beiden ersteren zwischen ihnen eingeschnitten, so daß die drei Spalten zusammen einem liegenden Z ähnlich wurden. Das Spectrum der dritten schneidet rechtwinklich durch den Purpurstreif, den die beiden andern geben, und erzeugt eine Reihe von Mischfarben, aus denen man leicht die weißeste Stelle aussuchen kann. Durch Drehung des

Prisma um die Axe des Fernrohrs läßt sich das Verhältniß der gemischten Farben dann so abgleichen, daß man reines Weiß bekommt. So erhält man Weiß aus Roth, Grün und Violett, welche man zu drei Paaren von Complementarfarben verbinden kann, nämlich

einfaches Roth	und	zusammengesetztes	mattes Blaugrün,
» Grün	»	Purpurroth,	
» Violett	»	mattes Gelb.	

Auffallend ist hierbei, daß die Complementarfarben des einfachen Roth und Violett sich von gewissen Farbentönen des Spectrum nur durch ihr minder gesättigtes Ansehen unterscheiden, und dennoch die ersteren mit einfachem Roth und Violett Weiß geben, letztere nicht.

Newton's wenige Beobachtungen über die Zusammensetzung je zweier prismatischer Farben stimmen mit meinen Angaben überein. Er giebt an, die primitiven Farben könnten durch Vereinigung der beiderseitigen Nachbarfarben wiedergegeben werden¹⁾, so z. B. Orange durch Roth und Gelb, Gelb durch Orange und Grüngelb, Grün durch Grüngelb und Meergrün, oder auch, aber weniger gut, durch Gelb und Blau (*cyaneum*), Blau durch Meergrün und Indigoblau. Außerdem hat er Purpurroth aus Roth und Violett dargestellt. Weiß hat er nur durch je drei Farben, Roth, Violett und Grün erhalten, und damit es gut gelinge rath er sogar, Spectra mit unvollkommen getrennten Farben anzuwenden. Dabei mischen sich dann noch mehr als drei Einzelfarben.

Dagegen wird man bemerkt haben, daß meine Angaben über das Zusammenwirken der prismatischen Farben erheblich von denen abweichen, welche man aus der Mischung von Farbstoffen gewonnen hatte. Namentlich, daß Gelb und Blau nicht Grün, sondern höchstens ein schwach grünliches Weiß geben sollten, widerspricht der tausendjährigen Erfahrung aller Maler auf das entschiedenste. Der Grund des Widerspruchs wird aber durch eine kurze Ueberlegung

1) *Lectiones opticae. P. II. S. I. Prop. IV.* und *Optice Lib. I. P. II. Prop. IV.*

wie Farbstoffe auf das Licht wirken, klar werden. Farbstoffe, wie alle gefärbten Körper, welche wir in größeren Stücken von regelmässigem Gefüge besitzen, z. B. der krystallinische Zinnober, das krystallisirte chromsaure Bleioxyd, das Kobaltglas, aus welchem die Smaltefarben gemacht werden, sind durchsichtig oder wenigstens durchscheinend. Fällt Licht auf sie, so wird von ihrer äusseren Oberfläche zunächst ein Theil desselben als weisses Licht reflectirt, ein anderer geht in das Innere, wird hier durch ungleichmässige Absorption der ihn zusammensetzenden einfachen Strahlen farbig, wird an der hintern Begränzungsfäche des Körpers reflectirt, und kehrt nach vorn zum Auge des Beobachters zurück, der eben wegen der Farbe dieses vorgedrungenen und im Körper selbst reflectirten Lichts diesen gefärbt sieht. Zerpulvern wir dagegen einen Farbstoff, so sieht der Beobachter von dem auffallenden Lichte nicht blofs das in sein Auge zurückkehren, was an der vorderen und und hinteren Oberfläche der obersten Lage von Pulvertheilchen, sondern auch, was von der zweiten und dritten u. s. w. reflectirt ist. Eine einzelne ebene Glastafel reflectirt von senkrecht einfallendem Licht nur $\frac{1}{2}$, zwei solche $\frac{1}{3}$, sehr viele fast alles. Wir können daraus schliessen, dafs von dem Licht, welches auf feines weisses Glaspulver fällt, nur der kleinste Theil von den zu oberst liegenden Theilchen ein bei weitem gröfserer, von den tieferen reflectirt wird. Ebenso wird es sich bei gefärbten Pulvern verhalten müssen, wenigstens mit denjenigen Arten der einfachen Strahlen, deren Farbe sie tragen, und welche sie ohne Absorption hindurchzulassen pflegen; das meiste Licht dieser Art wird aus den tieferen Schichten kommen und durch eine gröfsere Anzahl von Pulvertheilchen hindurchgegangen seyn.

Wie wird es sich nun verhalten, wenn wir Pulver von verschiedener Farbe mischen, z. B. gelbes und blaues? Die oberflächlich gelegenen blauen Theilchen werden blaues, die oberflächlichen gelben gelbes Licht geben; beides zusammen wird sich zu Weifs oder grünlichem Weifs vereinigen. Ganz anders ist es aber mit dem Lichte, welches

aus der Tiefe zurückkehrt. Diefs muß abwechselnd durch gelbe und durch blaue Theilchen hindurchdringen; es wird also aus der Tiefe nur solches Licht zurückkehren, welches sowohl von den blauen, als auch von den gelben durchgelassen wird. Blaue Körper pflegen grünes, blaues und violettes Licht in merklicher Menge durchzulassen, gelbe dagegen rothes, gelbes und grünes. Durch beides zugleich geht also nur grünes, und es kann aus der Tiefe des gemischten Pulvers nur grünes Licht zurückkehren. Da nun die von den oberflächlichen Theilen des Pulvers reflectirte Lichtmenge nach dem vorher Gesagten viel kleiner zu seyn pflegt, als die aus der Tiefe zurückkehrende, so wird das Grün der letzteren bei weitem überwiegen und die Farbe der Mischung bestimmen.

Wenn wir also zu einem blauen Pulver gelbes hinzumischen, wird die Farbe der Mischung weniger dadurch verändert, daß zu den Farbstrahlen des blauen Pulvers sich noch solche des gelben hinzu addiren, als vielmehr dadurch, daß von jenen Farbenstrahlen noch der violette und blaue Theil verloren geht, und nur das grüne übrig bleibt. Daher pflegen Mischungen zweier Farbestoffe von etwa gleicher Helligkeit auch dunkler zu seyn, als ihre Constituenten, namentlich dann, wenn letztere solche Farben darbieten, welche in der prismatischen Reihe weit aus einander liegen, und deshalb wenig gemeinsame Farbstrahlen enthalten. So giebt Zinnober und Ultramarin statt des Rosa, welches der Zusammensetzung ihres Lichts entspricht, ein etwas in das Violette ziehendes Schwarzgrau.

Die vorstehende Theorie der Farben gemischter Farbstoffe ist einfach abgeleitet aus allgemein anerkannten physikalischen Vorstellungen, erklärt die Erscheinungen, so weit ich sie sehen kann, vollständig und weist nach, daß Mischung der Farbstoffe und Zusammensetzung der Farben zwei durchaus verschiedene Vorgänge sind, und daß die durch die erstere gewonnenen Erfahrungen durchaus keinen Schluß auf die letztere gestatten. Nur wenn wir es mit zwei im Spectrum wenig von einander abstehenden Farben

zu thun haben, giebt die Zusammensetzung des farbigen Lichts fast dieselben Resultate, wie die Mischung der Pigmente, weil dann die zusammengesetzte Farbe den zwischenliegenden Farbentönen des Spectrums ähnlich ist.

Es giebt aber zwei andere Methoden das von Pigmentfarben kommende Licht zusammenzusetzen, bei denen man Resultate erhält, welche ganz den bei der Zusammensetzung ähnlicher prismatischer Farben erhaltenen entsprechen. Die erste dieser Methoden ist die Vereinigung der Farben auf dem Farbenkreisel. Man hat längst bemerkt, daß sie andere Resultate giebt, als die Mischung der Pigmente. Ich wiederholte die Versuche mit Gelb und Blau. Für ersteres wendete ich entweder Gummi-Gutti oder Chromgelb an, für letzteres Bergblau oder Ultramarin. Bei schneller Umdrehung erhält man ein reines Grau. Sehr frappant stellt sich der Unterschied beider Methoden heraus, wenn man die Mitte der Scheibe mit der Mischung beider Pigmente anstreicht, am Rande dagegen Sektoren mit den reinen Pigmenten. Dann sieht man beim schnellen Umdrehen der Scheiben in der Mitte Grün, am Rande Grau. Jenes ist viel dunkler als letzteres, wie es nach der oben gegebenen Theorie erwartet werden mußte.

Die andere Methode habe ich noch nicht beschrieben gefunden, kann sie aber als sehr bequem empfehlen. Sie ist zugleich von dem Uebelstande frei, daß die Mischfarben das graue Ansehen wie auf den Farbenscheiben bekommen; man kann durch sie vielmehr wirklich Weiß aus complementär gefärbten Pigmenten erzeugen. Man stelle eine Glasplatte mit planen und parallelen Flächen senkrecht auf einer Tischplatte auf, und lege vor ihr eine gefärbte Oblate hin. Diese sieht man in der Glasplatte gespiegelt, und der scheinbare Ort ihres Spiegelbildes ist jenseits der Platte und ebenfalls auf der Oberfläche des Tisches. Man kann nun genau an dieselbe Stelle, wo sich scheinbar die gespiegelte Oblate befindet, eine andere eben so große aber anders gefärbte hinlegen, welche der Beobachter durch das spiegelnde Glas hindurch sieht. Sein Auge wird dann

von zweierlei Strahlen getroffen, welche beide von ganz demselben Körper auszugehen scheinen, die einen dem durchgegangenen, die anderen dem gespiegelten Lichte angehörig. Es erscheint ihm deshalb eine Oblate, deren Farbe aus denen der beiden wirklich vorhandenen Oblaten zusammengesetzt ist. Um den Versuch bequemer anzustellen, braucht man nur ein ganz kleines, möglichst dünnes planparalleles Glasplättchen anzuwenden, welches man etwa in der Entfernung des deutlichen Sehens über der Tischplatte und senkrecht gegen diese befestigt. Man sieht von oben schief durch das Plättchen nach der Tischplatte hin, und legt sich die Oblaten an passende Stellen, um die Vereinigung ihrer Farben hervorzubringen. Je näher man beide der imaginären Durchschnittlinie der Ebene des Tisches und der Glastafel schiebt, desto schiefer fallen die Strahlen auf die Platte, desto weniger gehen durch, desto mehr werden reflectirt, so dafs dann die Farbe des reflectirten Lichts die überwiegende wird. Umgekehrt überwiegt die Farbe des durchgehenden Lichts, wenn man die Oblaten von jener Durchschnittlinie entfernt, und man kann auf diese Weise sämtliche Abstufungen der relativen Stärke in der Zusammensetzung hervorbringen. Man giebt bei diesem Versuche entweder beiden Oblaten einen schwarzen Grund, oder wenn man weifsliche Farbenverbindungen hervorbringen und mit reinem Weifs vergleichen will, der einen, am besten der helleren von beiden, einen weissen, der anderen einen schwarzen Grund. Bei der Beobachtung durch das Glasplättchen erscheint die Oblate in der zusammengesetzten Farbe auf weissem Grunde. Es versteht sich, dafs man so die Farben von allen beliebigen gefärbten Flächen, auch von gefärbten Gläsern zusammensetzen kann.

So zusammengesetzte Farben zeichnen sich durch Helligkeit und Klarheit sehr vor denen durch Mischung der Farbstoffe erhaltenen aus, und stimmen auch nicht immer der Art nach mit diesen überein, sondern geben vielmehr dieselben Resultate, welche wir aus der Vereinigung prismatischer Farben gewonnen hatten. Namentlich geben Blau

und Gelb nicht Grün, sondern Weifs. Als Repräsentanten des Gelb brauchte ich Papierscheibchen, welche ich mit hellem Chromgelb oder Gummi-Gutti getuscht hatte. Unter den blauen Farbstoffen gab, ebenfalls auf solche Scheibchen aufgetragen, ein schön himmelblaues Kobaltblau mit den beiden Arten des Gelb reines Weifs, künstliches Ultramarin röthliches Weifs, und helles Berlinerblau ein schwach grünliches Weifs. Zinnoberroth mit Blau combinirt giebt Rosa, dasselbe Roth mit Grün giebt Gelb u. s. w. Kurz es weisen diese Versuche nach, dafs nicht blofs die einfachen Farbenstrahlen des Spectrums andere Gesetze des Zusammenwirkens haben, als man bisher allgemein angenommen hatte, sondern dafs ganz ähnliche Gesetze auch für die zusammengesetzten Farben der Pigmente gelten, und es scheint mir nicht zweifelhaft zu seyn, dafs diese neuen Gesetze an die Stelle der älteren, auf die Mischung der Farbstoffe gegründeten zu setzen seyen.

Man wird dabei am besten von der Vereinigung einfacher Farben des Sonnenspectrums ausgehen, weil diese den reinsten und vollkommensten, schon bei geringer Lichtintensität fast blendenden Eindruck von Farbe machen, gegen den alle Pigmentfarben matt und grau aussehen. Schon Newton hat als Regel aufgestellt, dafs eine jede einfache Farbe durch eine Vereinigung ihrer beiden nächsten Nachbarfarben wiedergegeben werden könne. Meine eigenen Untersuchungen bestätigen diefs; ich mufs aber zugleich hinzufügen, dafs der Abstand der combinirten Farben nicht sehr grofs seyn darf, wenn die zusammengesetzte der zwischenliegenden Abstufungen des Spectrums ähnlich sehen soll. Namentlich ist diefs im mittleren Theile des Spectrums der Fall. Roth und Gelb giebt ein Orange, dessen Ansehen dem des einfachen Orange vollständig gleich erscheint, und ebenso können die aus Blau und Violett zusammengesetzten Arten des Indigoblau wohl kaum vom einfachen Indigoblau unterschieden werden. Dagegen giebt schon Gelbgrün und Blaugrün ein Grün, dessen Farbenton dem des prismatischen mittleren Grün zwar entspricht,

welches aber entschieden weifslicher und matter ist, so dafs das einfache Grün nur aus solchen Farben gemischt werden kann, die sich fast gar nicht im Ansehen von ihm unterscheiden. Gelb und Blau erscheinen in dieser Beziehung weniger empfindlich, als Grün. Ersteres setzt sich noch ziemlich gut aus Orange und Gelbgrün zusammen, wird aber sehr fahl aus Roth und Grün, letzteres wiederum läfst sich gut aus Blaugrün und Indigo zusammensetzen, wird aber sehr matt aus Grün und Violett. Was die Endfarben des Spectrums, Roth und Violett betrifft, so läfst sie Newton in seinem Farbenkreise sich an einander schliessen, und unterwirft sie dann auch der besprochenen Regel der Vereinigung von benachbarten Farben. In der That kann man aus Indigoblau und sehr wenig Roth eine Art Violett erzeugen, welches aber immer mehr in Weifs oder Rosa zieht, als das einfache Violett. Viel unvollkommener noch erscheint meinem Auge die Nachahmung des Roth durch Orange und Violett; ihre Combination geht immer in die carminrothen Töne oder in Weifs hinüber, und es ist mir nicht gelungen, eine erträgliche Nachahmung des reinen Roth zu erhalten.

Stellten wir uns also die Aufgabe, sämmtliche Farbtöne des Spectrums durch Zusammensetzung möglichst weniger einfacher Farben nachzuahmen, so brauchen wir dazu mindestens fünf der letzteren, nämlich: Roth, Gelb, Grün, Blau, Violett. Indessen mufs ich es noch dahingestellt seyn lassen, ob diese ganz vollständig genügen und ob nicht bei vortheilhafteren Apparaten, wo es möglich wäre, gröfsere Felder neben einander mit den entsprechenden zusammengesetzten und einfachen Farben zu erleuchten, ein geübtes Auge Unterschiede erkennen würde, welche in meinem Apparate nicht mehr erkennbar waren. Wollte man sich aber auf drei Farben beschränken, so würde man dazu am besten die drei einfachen Farben wählen, welche sich am wenigsten gut nachahmen lassen, nämlich Roth, Grün und Violett, dann aber ein Gelb und Blau erhalten, welches den Farben unserer Pigmente gegenüber allerdings
noch

noch gesättigt erschiene, mit dem Gelb und Blau des Spectrums aber nicht verglichen werden könnte. Es sind die drei Grundfarben, welche Thomas Young als solche vorgeschlagen hat. Weniger gut würde Roth, Grün und Blau passen; das gemischte Violett würde bei dieser Auswahl schlechter werden, als das gemischte Blau bei der ersteren. Die gewöhnlich gewählten drei Grundfarben Roth, Gelb und Blau sind aber durchaus unzureichend, weil man aus ihnen nimmermehr Grün erzeugen kann.

Wir werden demnach auch die Lehre von den drei Grundfarben, als den drei Grundqualitäten der Empfindung, wie sie Thomas Young aufgestellt hat, fallen lassen müssen. Entstände die Empfindung des Gelb durch die gelben Strahlen des Spectrums nur deshalb, weil dadurch gleichzeitig die Empfindung des Roth und Grün angeregt würde, und beide zusammenwirkend Gelb gäben, so müßte genau dieselbe Empfindung auch durch eine gleichzeitige Einwirkung der rothen und grünen Strahlen erregt werden können; indessen wird durch die letzteren niemals ein so glänzendes und lebhaftes Gelb erzeugt, wie es die gelben Strahlen geben. Ebenso ist es mit dem Blau, welches aus Grün und Violett, oder dem Violett, welches aus Blau und Roth zu mischen wäre. Um in diesem Sinne die Lehre von den Grundfarben festzuhalten, müßte man mindestens fünf solche hinstellen. Dagegen würden die drei Grundfarben wohl genügen, um in dem Sinne von Lambert und Forbes die matten und verhältnismäßig unreinen Farben der Naturkörper wiederzugeben und zu classificiren. Nur würde es für eine sichere, wissenschaftliche Classification doch nöthig werden, eine andere Methode für die Zusammensetzung der Farben zu gebrauchen, als die Mischung der Pigmente.

Bei der Vereinigung von je zwei einfachen Farben treten uns zwei neue Farbeindrücke entgegen, nämlich Weiß und Purpurroth, mit ihren Uebergangsstufen in die vorher genannten einfachen Farben. Das Purpurroth gehört zu den gesättigten Farben, welches nicht anders als

aus dem äußersten Roth und Violett dargestellt werden kann, ohne an seinem Glanze zu verlieren. Das Weiß dagegen kann auf unendlich verschiedene Weise dargestellt werden, ohne daß das Auge ein Weiß von dem anderen zu unterscheiden vermöchte. Wir erhalten es z. B. aus einfachem Gelb und Blau, aus einfachem Roth, Grün und Violett, oder aus diesen fünf einfachen Farben zusammengenommen; und außerdem aus den mannigfaltigsten complicirteren Combinationen. Es wird deshalb als indifferentes Licht den Gegensätzen der Farben gegenübergestellt. Die übrigen Combinationen je zweier einfacher Farben erscheinen dem Auge als Uebergänge der einfachen Farben und das Purpur in Weiß, aber sie verhalten sich doch in weiteren Zusammensetzungen, wie oben angeführt ist, wesentlich anders als es die Spectralfarben durch hinzugefügtes weißes Licht abgeschwächt thun würden.

Zum Schluß gebe ich folgende kleine Tabelle zur Uebersicht über die Combinationen je zweier Farben, bei welcher ich die fünf Farben zu Grunde lege, durch deren Vereinigung die Farben des Spectrums genügend gut wiedergegeben werden können. In der ersten Horizontal- und ersten Verticalreihe stehen die einfachen Farben, welche vereinigt worden sind; die daraus zusammengesetzten Farben finden sich, wo sich die betreffende Horizontal- und Verticalreihe schneiden.

	Violett.	Blau.	Grün.	Gelb.	Roth.
Roth	Purpur	Rosa	Mattgelb	Orange	Roth.
Gelb	Rosa	Weiß	Gelbgrün	Gelb	
Grün	Blaußblau	Blaugrün	Grün		
Blau	Indigblau	Blau			
Violett	Violett				