

NEUE PSYCHOLOGISCHE STUDIEN

HERAUSGEGEBEN VON

FELIX KRUEGER

O. Ö. PROFESSOR, DIREKTOR DES PSYCHOLOGISCHEN INSTITUTS
AN DER UNIVERSITÄT LEIPZIG

ZWEITER BAND

C. H. BECK'SCHE VERLAGSBUCHHANDLUNG
MÜNCHEN 1926



LICHT UND FARBE

HERAUSGEBEN VON
FELIX KRUEGER
UND
AUGUST KIRSCHMANN

C. H. BECK'SCHE VERLAGSBUCHHANDLUNG
MÜNCHEN 1926

INHALT

	Seite
FELIX KRUEGER , Dr. phil. et litt. Professor der Philosophie, Direktor des Psychologischen Instituts und des Forschungsinstitutes für Psychologie bei der Universität Leipzig: Vorbemerkungen	1
EMIL BERGFELD , Dr. phil. Privatgelehrter, Leipzig: Die Streckeneinteilung und die gebräuchlichsten Zahlensysteme. Neue Versuche zur Dezimalgleichung	15
THORLEIF SCHJELDERUP-EBBE , Dr. phil. Privatdozent in Kopenhagen: Der Kontrast auf dem Gebiete des Licht- und Farbensinnes. Erster Teil	61
AUGUST KIRSCHMANN , Dr. phil. Professor der Philosophie, Abteilungsvorstand am Psychologischen Institute bei der Universität Leipzig: Farbeterminologie	127
FRIEDRICH DONATH , Dr. phil. Studienrat am Nicolai-gymnasium Leipzig: Die funktionale Abhängigkeit zwischen Reiz und Empfindung bei der Farbensättigung	139
FRITZ EHRLER , Dr. phil. Studienassessor, Leipzig: Über das Farbengedächtnis und seine Beziehungen zur Atelier- und Freilichtmalerei	209
FRIEDRICH WEISSENBORN , Professor an der Akademie für Graphische Künste, Studienrat am Schillerrealgymnasium, Leipzig: Die Lage der Qualitäten im Farbenkreis und ihre Komplementärverhältnisse, nach der Schwellenmethode untersucht	309
KURT FIEDLER , Dr. phil. Diplomvolkswirt, Dahlen: Das Schwarz-Weiß-Problem	343
AUGUST KIRSCHMANN , Dr. phil. Professor der Philosophie, Abteilungsvorstand am Psychologischen Institute der Universität Leipzig: Das umgekehrte Spektrum und seine Farben sowie seine Bedeutung für die optische Wissenschaft	411

AUGUST KIRSCHMANN
DAS UMGEGEHRTE SPEKTRUM
UND SEINE FARBEN, SOWIE SEINE BEDEUTUNG
FÜR DIE OPTISCHE WISSENSCHAFT

1. Das umgekehrte Spektrum ist die Umkehrung des gewöhnlichen Spektrums, das durch die Dispersion des Lichts entsteht. Es zeigt die Farben in der Reihenfolge, die dem menschlichen Auge nicht natürlich vorkommen.

2. Der Begriff der Mischung der Farben ist ein zentraler Bestandteil der Fartheorie. Er erklärt, wie durch die Überlagerung verschiedener Lichtstrahlen neue Farben entstehen können.

Verlag von Kirschmann, Neudamm und andere Verlage, Bonn, Berlin, etc.
Erste Auflage, 1871. 2. Auflage, 1872.
Zweiter Teil, das umgekehrte Spektrum und seine physikalischen Eigenschaften.
Physikalische Zeitschrift, 1872, S. 123 ff.

Das umgekehrte oder negative Spektrum ist, trotzdem ich mich seit über dreißig Jahren bemühe, ihm die gebührende Beachtung in der optischen Wissenschaft zu verschaffen, bisher wenig bekannt und beachtet worden, obgleich es ein nicht zu unterschätzendes Hilfsmittel der optischen Forschung zu werden verspricht.¹ Dem Psychologen sollten die in ihm im Gegensatz zum gewöhnlichen Spektrum enthaltenen und fehlenden Lichtqualitäten zu denken geben und dem Physiker, Chemiker und Astronomen dürfte es noch wertvolle Dienste zu leisten imstande sein, in Fällen, wo das gewöhnliche Spektrum ihn im Stiche läßt.

An der bisherigen Vernachlässigung dieser ganzen optischen Frage durch die Naturwissenschaft ist ein Vorurteil, ein logisch-mathematischer Irrtum schuld, den ich am besten zu illustrieren imstande bin, wenn ich die Einwände hier kennzeichne, die man mir entgegenhielt, als ich vor 30 Jahren zum ersten Male das umgekehrte Spektrum (das ich dort „the inverted Spectrum“ nannte) vor der Physical and Mathematical Society der Universität von Toronto demonstrierte. Man sagte mir so etwa: Dein umgekehrtes Spektrum ist weiter nichts als „die Enden des Spektrums übereinandergeworfen“, also das Produkt einer Superposition, und die so entstehenden Farben sind keine „reinen Farben, sondern Mischfarben“. Worauf ich folgendes zu erwidern hatte:

1. Das umgekehrte Spektrum ist keineswegs eine bloße Übereinanderlagerung der Spektralenden; denn jede Stelle des gewöhnlichen Spektrums hat ein Äquivalent, eine ihr zugeordnete und sie zu farblosem Lichte ergänzende Stelle im umgekehrten.

2. Der Begriff der Mischfarbe ist, physikalisch betrachtet, zum mindesten sehr unklar und oberflächlich, da Ihr unter Farbe das eine Mal Farbstoff oder Färbemittel, das andere Mal aber Ort im Spektrum, und ein drittes Mal empfundene Lichtqualität versteht und diese drei Bedeutungen oft kritiklos durcheinanderwerft, und da ihr ferner den Begriff der Mischung, der sich, vom erkenntnistheoretischen Standpunkte betrachtet, als ein mit Widersprüchen behafteter Scheinbegriff erweist, ganz unkritisch aus der vorwissenschaftlichen Denkweise übernommen habt.

¹ Siehe auch: Kirschmann, Normale und anomale Farbensysteme. Archiv für die gesamte Psychologie, Bd. VI, S. 397 ff. und

Kirschmann, Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse. Physikalische Zeitschrift 18 (Jahrgang 1917), S. 195 ff.

3. Daß das umgekehrte Spektrum das Produkt einer Superposition ist, gebe ich gerne zu. Aber darin unterscheidet es sich nicht, oder doch nur dem Grade nach von dem gewöhnlichen Spektrum.¹

Die genannten Einwände beruhen alle auf der irrtümlich als gewiß betrachteten Voraussetzung, daß die Farbe eine eindeutige Funktion der Wellenlänge sei, was aber bisher niemand nachgewiesen hat. Es ist zwar ganz richtig, daß die physikalische Reinheit des Spektrums, d. h. die Beschränkung der an einem Spektralorte zusammenwirkenden Wellenlängen der Weite des Spaltes umgekehrt proportional ist. Aber ein absolut reines Spektrum setzt dann einen Spalt von der Weite Null voraus, und ein solcher ergibt kein Spektrum mehr. Der mathematische Hilfsbegriff der Annäherung an die Null, der schon dem Prinzip der Relativität aller Größen widerspricht, wird aber hier gerade zur Absurdität, da das Maximum der Farbenreinheit hier mit dem Nullpunkt, d. h. dem Nichtvorhandensein jeglicher Lichtintensität zusammenfallen müßte. Da jedes Spektrum aus einer Reihe von Superpositionen von Spaltbildern besteht, so hat noch niemand ein absolut reines Spektrum oder Licht von nur einer Wellenlänge gesehen. Denn auch bei sehr engem Spalte und sehr großer Länge des Spektralbandes, sind an jeder linearen Stelle des letzteren doch immer noch viele Wellenlängen übereinander gelagert, von denen die größte und die kleinste sich noch um Tausende oder gar Millionen von Schwingungen per Sek. unterscheiden. Man kann daher besten Falles sagen, daß man nicht wisse, ob die Wellenlänge selbst oder die Art der Superposition von Wellenlängen für die Farbe verantwortlich sei. Das letztere aber ist aus Gründen, die wir gleich erörtern werden, wahrscheinlicher.

Wenn man unter „Farben“ die gesehenen, von der linearen Reihe der nur quantitativ variablen farblosen Helligkeiten verschiedenen Lichtqualitäten versteht², dann ist das linear angeordnete Band der Wellenlängen keine adäquate Darstellung der Farbenmannigfaltigkeit. Denn während die für den Gesichtssinn in Betracht kommenden Wellenlängen eine zwischen zwei Grenzen sich bewegende lineare Reihe bilden,

¹ American Journal of Psychology. Vol VII (1895), S. 387 ff.

² Der gewöhnliche Sprachgebrauch des täglichen Lebens, wonach auch die verschiedenen Sättigungsstufen, Tinten und Schattierungen, schon als verschiedene Farben gelten, ist wissenschaftlich nicht zu empfehlen; ebensowenig die Ostwaldsche Bezeichnung der farblosen Helligkeitsstufen als *u n b u n t e* Farben im Gegensatz zu den *b u n t e n*, da das Wort *b u n t* doch sonst die Bedeutung von *m e h r f a r b i g* hat.

ist das System der Farbenqualitäten ein geschlossenes, in sich zurücklaufendes, das nicht durch eine Gerade, sondern nur durch eine geschlossene stetige Kurve dargestellt werden kann. Der Einfachheit halber wählen wir den Kreis. In diesem Farbenkreise hat jede Qualität zwei nächste Nachbarn und ein Gegenüber, die Komplementäre. Reißen wir den Kreis an irgendeiner Stelle auf und strecken ihn zu einer Geraden aus, dann berauben wir die an die Enden zu liegenden Qualitäten ihrer Nachbarn. Wenn die Farbenqualität lediglich von der Wellenlänge direkt abhinge, würde das allerdings nichts ausmachen. Anders aber wenn das Zusammenwirken der benachbarten Wellenlängen irgendeine Rolle spielt. In diesem Falle müssen an der Trennungsstelle Qualitäten ausfallen. Und das ist auch tatsächlich der Fall bei jedem linear angeordneten Spektrum. Im gewöhnlichen Spektrum fehlen die purpurnen Farbentöne, und das Grün hat keine Komplementärfarbe. Im umgekehrten Spektrum fehlt das Grün, die Gegenfarbe des Purpur; und in jedem durch ein Prisma aus anomal dispergierendem Material erzeugten Spektrum ist irgendeine andere Farbe abwesend. Das spricht doch sehr dafür, daß für die Farbenqualität nicht die Wellenlänge, oder zum mindesten nicht nur die Wellenlänge selbst, sondern in irgendeiner Weise, deren Gesetzmäßigkeit uns heute noch nicht bekannt ist, auch der Modus der Superposition der Wellenlängen verantwortlich ist. Dazu kommt noch die nicht wegzuleugnende Tatsache, daß man dieselbe Farbe, die durch eine ganz bestimmte, beschränkte Stelle des Spektrums bewirkt wird, auch durch Kombination zweier oder mehrerer, von jener ganz verschiedener Spektralregionen, und endlich sogar durch Zusammenfassung des ganzen Spektrums unter Beseitigung einer beschränkten Region (der komplementären) erzeugen kann.

Wenn es sich bei jeder Lichtqualität physisch um eine Zusammenwirkung von Lichtquellen verschiedener Schwingungsfrequenz handelt, dann hat aber die Unterscheidung von Grundfarben oder Urfarben einerseits und „Misch“-Farben andererseits, wenigstens physikalisch, keinen rechten Sinn mehr. Physikalisch betrachtet sind dann alle Farben „gemischt“, und man könnte höchstens von graduellen Unterschieden reden. Überdies haftet dem Begriff der Mischung ein gewisser logischer Widerspruch an: Eine Mischung soll doch immer eine Addition sein; die Komponenten sollen in der „Mischung“ erhalten bleiben. Und zugleich sollen sie eben verschwunden sein; denn sie sollen ja

einer neuen Qualität, eben der Mischqualität, Platz machen. Wenn aber die Komponenten verschwunden sind, dann ist es doch keine Addition mehr. Offenbar ist es unmöglich Qualitäten zu mischen, denn alle Qualitäten sind disparat. Da das Qualitative fast überall in irgendeiner Beziehung die quantitative Betrachtungsweise zuläßt, so lassen sich qualitative Mannigfaltigkeiten nach Ähnlichkeitsbeziehungen stets auch quantitativ ordnen. Das ist auch der Fall bei der Farbenmannigfaltigkeit, genau so wie bei den Qualitäten des Geschmacksinnes oder des Geruchsinnes oder bei den Klangfarben und den Vokalen, oder endlich bei den Richtungen im Raume, die, soweit sie unabhängig von der metrischen Behandlung betrachtet werden, Qualitäten sind (Projektive Geometrie). Einem Wesen, dem diese Raumqualitäten nicht gegeben wären, könnte man durch keine quantitative Betrachtung, sei es in Gradzahlen, in Hundertteilen oder mittelst der Zahl π zum Verständnis dessen bringen, was wir als Winkel, als Ebene, als einfach oder mehrfach gekrümmte Fläche, als Körper bezeichnen. Und wie die Diagonale im Parallelogramm der Kräfte durchaus nicht eine Mischung der beiden Seitenrichtungen ist, ebenso wenig ist Gelb eine Mischung von Rot und Grün, oder Orange eine solche von Rot und Gelb. Selbst rein physisch betrachtet gibt es nirgends in der Welt eine Mischung, d. h. eine Kombination bei welcher die Komponenten verschwunden sind und doch noch bestehen sollen. Es beruht auf einem aus dem vorwissenschaftlichen Denken stammenden Irrtum, wenn man glaubt, daß man zwei Stoffe oder zwei Empfindungen im Raume so verteilen könne, daß beide sich überall, d. h. an allen Punkten befinden. Die Chemiker, die früher die Lösungen als ideale Mischungen betrachteten, haben diese Ansicht längst aufgeben müssen. Die einzige erkenntnistheoretisch annehmbare und technisch einwandfreie Definition wäre die folgende: Unter Mischung versteht man ein mehr oder minder grobes Gemenge von Bestandteilen, die im Raume getrennt bleiben, aber, von gewissen Standpunkten aus betrachtet, nicht mehr gesondert wahrgenommen werden können. Nehmen wir diese Definition einmal an, dann müssen wir uns aber bei der Farbenmischung schon sehr in Acht nehmen, daß wir die drei Bedeutungen des Wortes Farbe nicht durcheinanderwerfen. Ist Farbe = Färbemittel oder Farbstoff, dann braucht eine solche technische Farbenmischung keineswegs auch physikalisch eine Mischung zu sein. Wenn wir zwei oder mehrere farbige transparente Flüssigkeiten mischen, dann fehlt ja physikalisch dem optischen Pro-

BUNTTAFEL V

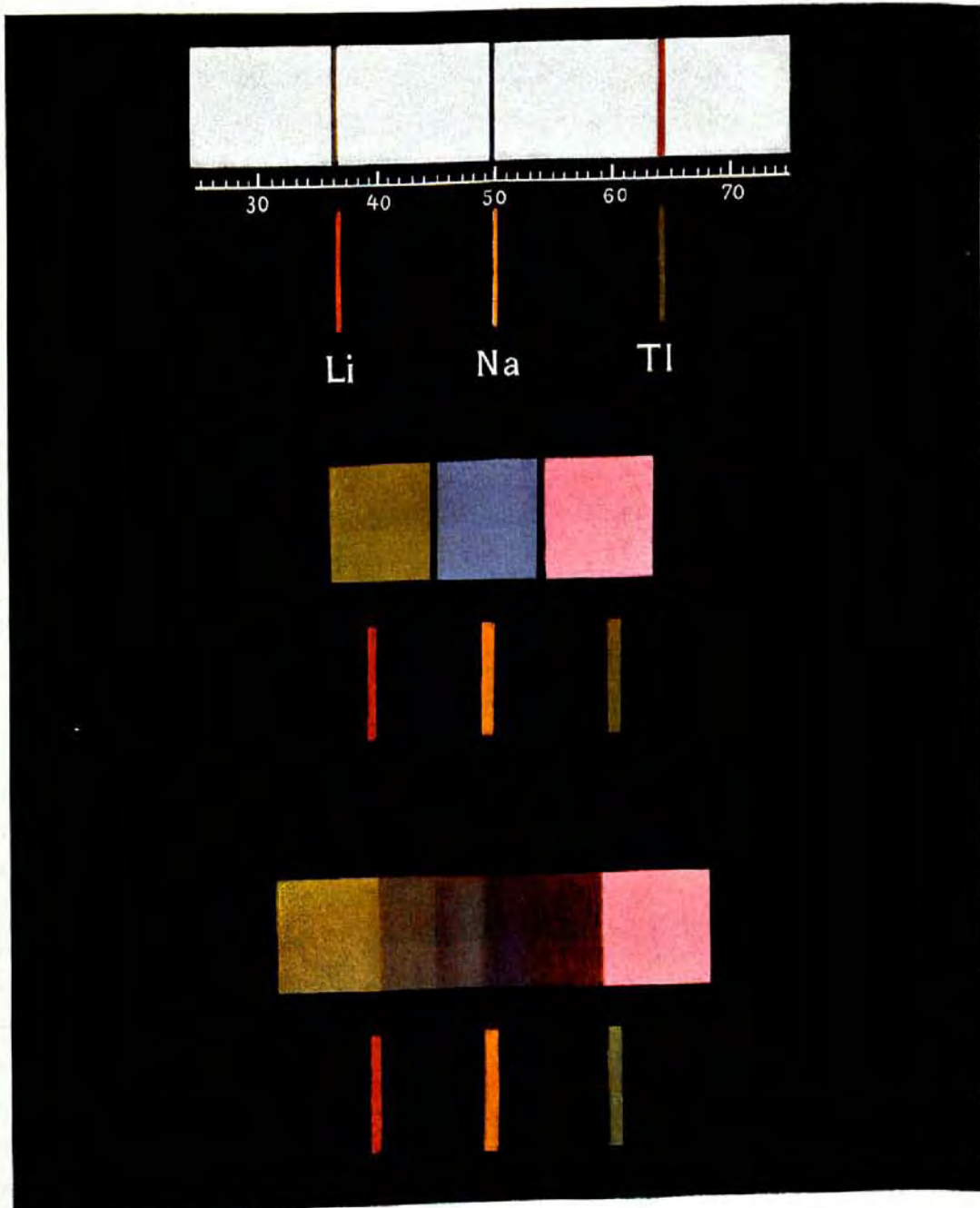


Fig. 1. Oben umgekehrtes, unten gewöhnliches Spektrum von Lithium, Natrium und Thallium; enger Spalt. (Negativer Spalt: ein Haar.) Fig. 2. Größere Spaltweite ($1\frac{1}{4}$ mm). Fig. 3. Große Spaltweite ($2\frac{1}{4}$ mm).

dukte das notwendigste Merkmal einer Mischung, nämlich die Eigenschaft einer Summe, denn die so entstehenden Farben sind ja ein Subtraktionsprodukt. Wenn ich farbige Glasplatten hintereinander schalte, dann ist der technische Vorgang allerdings eine Addition (von Glasplatten) aber das Licht, das durch sämtliche Platten geht, ist das Resultat einer Subtraktion, und die Helligkeit der Resultante ist die Differenz der Helligkeiten der Komponenten. Man spricht daher tatsächlich auch, allerdings sehr unlogisch, von subtraktiver Farbenmischung.

Wenn man vollständig deckende Farben in Form von Pulvern oder in einer Flüssigkeit suspendierten Pulvern „mischt“ oder wenn man Farben auf dem Farbkreis „mischt“, dann bleiben die Komponenten — in dem ersteren Fall räumlich, im letzteren räumlich und zeitlich — getrennt. Aber auch hier ist die „Mischung“ auch rein quantitativ nicht einfach die Summe der Komponenten sondern nur der Durchschnitt derselben. Bei den Malerfarben, die ja nur in wenigen Fällen annähernd vollständig lasieren oder decken, handelt es sich daher fast stets um eine Kombination von subtraktiver (also verdunkelnder) und additiver (aber nur Durchschnittshelligkeit ergebender) Mischung. Um wenigstens bei der Mischung des Weiß mit Lasurfarben diesen verdunkelnden, subtraktiven Effekt loszuwerden, haben Maler wie Segantini u. a. das pointilistische Verfahren mit Vorteil angewandt. Volle additive Mischung, bei der die Lichtintensität der Resultante gleich der Summe der Intensitäten der Komponenten ist, läßt sich nur erreichen, wenn man dieselbe Fläche von zweien oder mehreren Lichtquellen bestrahlen läßt. Es gibt aber auch noch eine Art der additiven Farbenmischung, bei der die Resultante hinsichtlich ihrer Lichtintensität weder der Summe, noch der Differenz, noch endlich dem Durchschnitt der Komponenten entspricht. Das ist die binokulare Mischung, bei welcher sowohl der Wettstreit der Sehfelder wie auch das Fechnersche Paradoxon in Betracht gezogen werden muß. Hier soll uns aber diese Vereinigung der Eindrücke des optischen Doppelorgans nicht weiter beschäftigen.

Während physisch jede Lichtqualität als ein Produkt der „Mischung“, nach der angedeuteten Definition dieses Begriffes, angesehen werden kann, muß andererseits daran festgehalten werden, daß psychisch, d. h. vom Standpunkte der tatsächlich, also absolut gewissen und unleugbaren Gegebenheiten betrachtet, alle Farben und ebenso die farblose Qualität das gleiche Recht auf die Bezeichnung als einfache Lichtqualitäten besitzen. In einer qualitativen Mannigfaltigkeit gibt

es entweder nur eine Qualität, also keine qualitative sondern nur quantitative Differentiation, oder zwei antagonistische Qualitäten oder endlich eine unbeschränkte, also unendliche Anzahl von Qualitäten. Im erstgenannten Falle bildet die Mannigfaltigkeit ein lineares System, das sich durch eine von 0 bis ∞ gehende Gerade darstellen läßt. Ein solches System ist die Reihe der physischen Temperaturen, die Reihe der Schallstärken, der Druckempfindungen und auf optischem Gebiete die Reihe der farblosen Lichtempfindungen. In dem zweitgenannten Falle läßt sich die Mannigfaltigkeit ebenfalls durch eine Gerade darstellen; aber diese erstreckt sich hier von $-\infty$ durch einen indifferenten Nullpunkt hindurch bis $+\infty$. Solche aus zwei antagonistischen Qualitäten, von denen jede nur intensiv variabel ist, bestehende Mannigfaltigkeiten sind beispielsweise die Reihe der Temperaturempfindungen, die der Lust- und Unlustgefühle und auf optischem Gebiete die dichromatischen Farbensysteme, die nur aus den quantitativen Variationen eines Paares von Komplementärfarben bestehen. Eine solche antagonistische lineare Reihe besteht also einfach aus zwei Reihen der ersten Art, die sich in entgegengesetzte Richtungen erstrecken. Es handelt sich also um die Quantitäten zweier maximal verschiedener Qualitäten. Wenn es reine Sättigungsreihen der Farben, also reine Gradabstufungen der Farbigkeit gäbe, dann wären dieselben gleichzeitig Intensitätsreihen. Da aber die Farbqualität nur eine für sich allein nicht mögliche Eigenschaft des Lichtes ist, sondern stets neben der Farbenintensität (Sättigung) auch eine Lichtintensität (Helligkeit) haben muß, so muß für die fehlende Farbenstärke immer eine Intensität jener anderen, zu dieser Farbenmannigfaltigkeit gar nicht gehörenden und außerhalb derselben bestehenden Qualität eintreten, das ist die farblose Lichtqualität. Wenn man daher unter Vermeidung von Helligkeitsunterschieden eine Farbenstärken- oder Sättigungsreihe zweier antagonistischer Farbqualitäten herstellen will, so muß diese immer zugleich eine vom neutralen Punkte (dem Nullpunkt der Sättigungen) in umgekehrter Richtung nach beiden Seiten verlaufende Helligkeitsreihe der farblosen Empfindungsqualität sein.¹ So kommt es, daß die reinen (keinen Helligkeitsunterschied aufweisenden) Sättigungsreihen einer Farbe doch zwei Qualitäten, die farbige und die farblose, und die Doppelreihe der möglichen Sättigungen eines Paares

¹ Siehe auch die Arbeiten von Dr. Donath und Dr. Schjelderup-Ebbe in diesem Bande.

von Komplementären drei Qualitäten aufweisen muß, nämlich neben den beiden antagonistischen noch die farblose, die ihr Maximum, der Helligkeit der gesättigten Farben entsprechend, im neutralen Mittelpunkt der Reihe hat. Diese dritte Qualität aber steht außerhalb des antagonistischen Systems und bildet eine — da wir an keiner Stelle des Raumes ein Nichts wahrnehmen können — nicht zu umgehende Beigabe, ähnlich wie die Geruchsempfindungen, die eine schwer auseinanderzuhaltende Komplikation mit den Geschmacksqualitäten eingehen oder wie die Tonhöhen, die das ähnlich dem Farbensystem als geschlossene Mannigfaltigkeit bestehende System der Klangfarben notwendig begleiten. Die farblose Lichtqualität ist kein Teil des Farbensystems, aber sie ist stets gleichzeitig mit dieser gegeben. Die Sättigungsgrade einer Farbe sind daher keineswegs als Mischungen von Farbengrad und Helligkeitsgrad aufzufassen.

Sobald eine Mannigfaltigkeit mehr als zwei Qualitäten aufweist so müssen es viele, ja wenn man in Betracht zieht, daß die Unterschiedsschwelle, mag sie auch groß sein, von jedem Punkt des Systems aus gerechnet werden kann, unendlich viele sein, oder was dasselbe bedeutet, die Qualitäten bilden ein System mit stetigen Übergängen, das auf keinen Fall durch eine gerade Linie dargestellt, sondern graphisch nur durch eine in sich zurücklaufende stetige Kurve veranschaulicht werden kann. Jede dieser Qualitäten ist als solche einfach. Sie steht aber in Verwandtschafts- oder Ähnlichkeitsbeziehungen zu allen andern. Sie hat auf beiden Seiten je eine benachbarte Qualität, die ihr am ähnlichsten ist, und eine ihr diametral entgegengesetzte von maximaler Verschiedenheit, zu der sie in antagonistischer Beziehung steht. So ist es bei dem System der Geschmacksqualitäten, bei den keineswegs nur eine bipolare lineare Reihe bildenden Gefühlen¹, ja sogar bei den Richtungen im Raume. Es ist nicht wahr, daß es drei Grundrichtungen im Raume gibt, und daß man durch Hinzufügung einer neuen Grundrichtung von einer Dimension in die nächste gelange. Wenn ich von der Geraden zur Ebene übergehe, so habe ich nicht eine sondern eine unendliche Zahl von neuen Richtungen zugefügt. Der Übergang von einer Raumdimension zur nächsten ist, wie auch Riemann deutlich erkannt hat, ein qualitativer Schritt. Ich glaube diese Verhältnisse

1 Vgl. F. Krueger, Die Gegensätzlichkeit und die Tiefendimension der Gefühle. Festschrift für Joh. Volkelt. München 1919.

in meinem Beitrag zur Wundt-Festschrift 1902 klargelegt zu haben.¹ Die Raumdimensionen sind nicht vertauschbare Grundrichtungen, und das orthogonale Koordinatensystem Descartes ist zwar sicher vom denkökonomischen Standpunkte die einfachste und vielleicht praktischste, aber nicht die einzig mögliche Methode, um die unendliche Zahl der möglichen Richtungen im Raum, der Einfachheit der Darstellung halber, auf eine beschränkte Anzahl von Grundrichtungen zurückzuführen. Ähnlichem praktischem Zwecke dient auch die Zurückführung der Farbenmannigfaltigkeit auf drei Grund- oder vier Urfarben. Diese Übertragung des Prinzips der Einfachheit, das nur für unsere Darstellung durch die Sprache oder andere Symbolsysteme gilt, auf die Natur selbst, ist ein überaus folgenschwerer Denkfehler auf mathematisch logischem Gebiete und hat besonders bei der Diagnose der Anomalien des Farbensinnes schon manches Unheil angerichtet. Mit Recht sagt Wundt: „Die Geschichte der Farbentheorien in Verbindung mit der Geschichte der Farbenblindheit ist ein belehrender Beleg für die Baconsche Warnung vor den *idola theatri*.“ Man zwingt die Dichromaten in die beiden Klassen der Rotgrünblinden und Blaugelbblinden oder in die der Protanopen, Deutanopen und Tritanopen hinein, obgleich die Lage der neutralen Stellen im Farbkreis deutlich zeigt, daß große Verschiedenheiten zwischen den zu einer dieser Klassen gerechneten bestehen, und daß es ebensoviele Arten von Dichromasie gibt, als Durchmesser im Farbkreis möglich sind; die bei spektralen Verkürzungen und Verlängerungen eintretenden Abweichungen der Komplementärverhältnisse noch gar nicht gerechnet. Bei dieser Gelegenheit möchte ich noch darauf aufmerksam machen, daß jeder Dichromat zwei solcher neutralen Stellen in seinem linear-bipolaren Farbensysteme hat. Die eine derselben wird bei den am häufigsten vorkommenden Fällen, die einen Durchmesser in dem Teil des Farbenkegels² mit schiefer Basis betrifft, bei welchem bei voller Sättigung volle oder annähernde Helligkeitsgleichheit möglich ist, meist vernachlässigt, da sie im Spektrum, wegen des Ausfalls der purpurnen Zwischenqualitäten zwischen Rot und Violett gar nicht oder nicht leicht nachzuweisen ist. Dazu muß eben das umgekehrte Spektrum, das diese Farbentöne in schönster

1 Kirschmann, Die Dimensionen des Raumes (Leipzig 1902). Auch Bd. XIX der Philosoph. Stud.

2 Kirschmann, Colour-Saturation and its quantitative Relations. American Journal of Psychology. Vol VII (1902), S. 385 ff.

Sättigung zeigt, herangezogen werden. Man tut das am einfachsten, indem man im Spektroskop ein gewöhnliches und ein umgekehrtes Spektrum direkt neben- oder übereinander, auf dieselbe Skala bezogen, erzeugt. Hat man dann im Okular des Spektroskops einen durch das ganze Feld beweglichen und nach seiner Weite beliebig variierbaren Spalt, so kann man den zu Untersuchenden das doppelte Farbenband nach Belieben durchwandern und die Stelle suchen lassen, wo die beiden Spektren, die an jeder Stelle für den Farbentüchtigen genau komplementär sind, ihm gleich erscheinen. Ich habe einen solchen Apparat auf dem Psychologenkongreß 1923 vorgeführt.¹ Die Spalteinrichtung, die übrigens auch an der Projektionslampe verwandt werden kann, und die für den Fall von Abweichungen in den Komplementärverhältnissen auch noch eine gegenseitige Verschiebung der beiden Spektren erlaubt, ist als Fig. 4 auf Bunttafel VI abgebildet.

Kommen wir jetzt zum umgekehrten oder negativen Spektrum selbst. Wie entsteht es? Als Newton zum Zwecke der Isolierung eines beschränkten Lichtbündels eine Öffnung in einer undurchsichtigen Wand, einen Spalt, wählte, betrachtete er diese Einrichtung als eine einfache Maschine, die keiner weiteren Zerlegung fähig ist. Das ist aber ein Irrtum. Der Spalt besteht aus zwei Halbspalten, zwei undurchsichtigen Kanten, von denen jede allein schon ein Spektrum erzeugen läßt, das, je nachdem man die helle oder die dunkle Seite dieser linearen Grenze zwischen Lichtdurchlässigkeit und Undurchlässigkeit der brechenden Kante des Prismas zukehrt, entweder aus einem blau-violetten oder einem rot-orange-gelben Farbenband besteht. Nun kann man die beiden Halbspalte aber in zweierlei Weise zu einem komplexen Instrumente kombinieren, nämlich einmal so, daß sie dem Lichte einen Weg zwischen sich offen lassen, den Spalt, und das andere Mal so, daß sie dem Licht zwischen sich den Durchgang verwehren, es aber überall sonst frei durchlassen. Man hat dann einen undurchsichtigen Streifen oder Balken oder wenn derselbe schmal ist, eine undurchsichtige Linie, den negativen Spalt. Führt man einen solchen negativen Spalt anstatt des gewöhnlichen beim Spektroskop oder bei einer Projektionsspektraleinrichtung ein, so wird durch denselben ein Spektrum erzeugt, das bei einiger Breite des Spaltes sehr schöne gesättigte Farben zeigt, die bei Verringerung der Spaltbreite matter werden und, wenn der Spalt zur

¹ Bericht des Psychologenkongresses in Leipzig 1923: Das umgekehrte Spektrum und seine Verwendung in der Diagnostik der Farbenblindheit.

schmalen schwarzen Linie wird, vollständig zu verschwinden scheinen — ich sage scheinen, denn der physische Effekt, auch wenn der Spalt nur aus einem Spinnwebfaden besteht, ist immer noch vorhanden, trotzdem der psychische Farbeffekt unter die Wahrnehmungsschwelle gesunken ist.

Wer hat denn nun die Halbspaltspektren und das negative oder umgekehrte Spektrum entdeckt? Etwa Goethe, der das große Verdienst besitzt, zum ersten Male energisch darauf hingewiesen zu haben, daß die auf diese Weise entstehenden Farben ebenso schön und gesättigt erscheinen wie die des gewöhnlichen Spektrums und dasselbe Recht besitzen, wie diese, als integrierende Teile des in sich zurücklaufenden Kontinuums der farbigen Qualitäten zu gelten? „Entdeckt“ dürfte das umgekehrte Spektrum wohl jeder haben, der einmal eine nicht zu schmale dunkle Linie auf hellem Grunde, etwa ein Fensterkreuz, mit einem Prisma betrachtete. Sicher ist das auch Newton nicht entgangen. Aber weder er noch seine Nachfolger haben dieser Seite der Farbenentstehung Beachtung geschenkt, weil sie das einmal gefaßte Vorurteil nicht los werden konnten, daß die durch die Verengerung des Spaltes zu bewirkende größere physische Reinheit des Spektrums auch unbedingt die erhöhte psychische Reinheit der entsprechenden Empfindungsqualitäten zur Folge haben müßte. Es mußten ihnen daher die Farben des umgekehrten Spektrums als Mischfarben erscheinen, die bei Verengerung des negativen Spaltes, umgekehrt wie die des gewöhnlichen, immer unreiner werden und bei sehr engem Spalte ganz verschwinden mußten. Ob aber beim umgekehrten Spektrum, auch wenn alle Farbenercheinungen unter die Wahrnehmungsschwelle fallen, doch noch auf Umwegen wahrnehmbare, genau lokalisierbare Veränderungen in der Wellenlängenverteilung stattfinden, das hat ja bisher kein Physiker versucht. Ich selber aber habe folgendermaßen überlegt: An jedem Orte eines positiven Spektrums handelt es sich, da der Spalt von der Weite 0 eine Unmöglichkeit ist, nicht etwa um eine Wellenlänge, sondern um eine Übereinanderlagerung von Spaltbildern, vorausgesetzt, daß die Wellenlängen, die in einem sog. kontinuierlichen Spektrum vorhanden sind (es können, weder vom erkenntnistheoretischen, noch vom physikalisch-quantentheoretischen Standpunkte betrachtet, unendlich viele zwischen 400 und 800 $\mu\mu$ sein)¹ noch außer-

¹ Siehe meine Abhandlung über das umgekehrte Spektrum in der Physikal.-Zeitschrift, 18. Jahrgang (1917), S. 205.

ordentlich viel näher beisammenliegen als die kleinste anwendbare Spaltbreite beträgt. Wenn aber das Vorhandensein einer benachbarten Schar von Wellenlängen eine genau lokalisierte Wirkung hervorbringt, dann muß es auch ihre Abwesenheit tun. Das umgekehrte Spektrum ist an jedem punktuellen Orte die Wirkung einer Übereinanderlagerung von Spaltschatten (Schatten des negativen Spaltes). Das heißt an der betreffenden Stelle müssen die betreffenden Wellenlängen fehlen. Ist der negative Spalt verhältnismäßig breit, so muß ein mehr oder minder deutliches Farbenband sichtbar werden. Ist der Spalt aber nur eine feine Linie, ein Haar, ein feiner Metallfaden oder ein Spinnfaden, so wird die Färbung weit unter die Wahrnehmungsschwelle fallen, und man wird, solange die Lichtquelle aus einer kontinuierlichen Wellenlängenfolge besteht, von einem umgekehrten Spektrum direkt nichts erkennen können. Die Sachlage wird aber sofort eine andere, sobald eine Lichtquelle vorliegt, die aus scharf begrenzten Wellenregionen, also aus positiven Linien besteht. Dann wird das ganze Gesichtsfeld des Spektroskops durch die Kombinationsfarbe der Linien erhellt sein, aber die Linien selbst müssen dunkel erscheinen. Sind mehrere Linien vorhanden so beleuchten sie sich ja gegenseitig und erscheinen daher farbig aber dunkel auf hellem Grunde, und genau an derselben Stelle der Skala, wo im gewöhnlichen Spektrum die entsprechenden positiven Linien gesehen werden. Ist nur eine Linie vorhanden, so erscheint sie, sofern die Flamme, in der die betreffende Substanz als glühendes Gas vorhanden ist, selbst ganz farblos ist, schwarz. Wenn man die gewöhnliche Spalteinrichtung vom Spektroskop entfernt und vor die nunmehr völlig freie Kollimatoröffnung senkrecht einen feinen Faden spannt, so kann man mit dieser Einrichtung vor einer Bunsenflamme Spektralanalyse treiben, genau wie mit dem positiven Spalte; nur kommen hier alle Linien der spektralanalytisch reagierenden Substanzen dunkel auf hellem Grunde zum Vorschein. Bunttafel V, Fig. 1 zeigt die Linienspektren von Lithium, Natrium und Thallium. Der negative Spalt bestand hier aus einem Haar, der positive hatte die diesem entsprechende Weite. Bei Fig. 2 und 3 beträgt die Weite des positiven Spaltes ungefähr $\frac{1}{3}$ mm, die Weite des negativen, in Fig. 2 $1\frac{1}{4}$ mm und in Fig. 3, wo die drei Farben bereits zum Teil übereinanderfallen, $2\frac{1}{4}$ mm. Es muß besonders darauf aufmerksam gemacht werden, daß die negativen Linienspektren trotz der Weite des Spaltes ganz scharf begrenzt erscheinen. Die Farben, in denen die breiten Streifen erschei-

nen, sind den Streifen nicht eigen, sondern lediglich das Produkt der Beleuchtung durch die gleichzeitig vorhandenen anderen positiven Linien. Diese Farben wechseln auch ganz erheblich, je nach der jeweiligen Helligkeit der positiven Linien. Die Thalliumlinie, die, wenn sie allein vorhanden ist in nicht leuchtender Bunsenflamme, schwarz aussehen muß, wird in unserem Falle durch die helle Natriumlinie und die rote Lithiumlinie schön rosa bis lachsfarben gefärbt, ebenso die dunkle Lithiumlinie des umgekehrten Spektrums, durch die Thallium- und Natriumlinie, gelbgrün. Ändert sich die Intensität einer der positiven Linien, so tritt sofort auch eine Änderung der Farbenverhältnisse des durch den ausgedehnten Spalt erzeugten umgekehrten Spektrums ein. Es ist sehr wohl möglich, daß man die gesetzmäßigen Beziehungen zwischen Breite des negativen Spaltes, Intensität der Lichter und Farbe der negativen Spektra, einmal für die wissenschaftliche Technik der Farbenchemie nutzbar machen wird.¹

Der Apparat, mittelst dessen die in Fig. 2 und 3 wiedergegebenen Spektra erzeugt sind, ist in Fig. 4 abgebildet. Es ist derselbe den ich auf dem Leipziger Psychologenkongreß demonstrierte. Er besteht im Wesentlichen aus einem gewöhnlichen Spalt mit bilateraler Variierbarkeit und einem dicht daneben liegenden umgekehrten Spalte. Die beiden Spektra können daher direkt nebeneinander auf die gleiche Skala bezogen, beobachtet werden, und zwar sowohl subjektiv am Spektralapparat, wie objektiv, durch Projektionslampe an die Wand geworfen. Der umgekehrte Spalt besteht aus einer rechteckigen Metallplatte, die um ihre Längsmittellinie mikrometrisch gedreht werden kann und so durch ihre Projektion eine nach ihrer Breite innerhalb gewisser Grenzen beliebig variierbare undurchsichtige Fläche bildet. Durch eine dritte Mikrometerscheibe können die beiden Spalte noch gegeneinander verschoben werden.

Mit derselben Spalteinrichtung kann auch das umgekehrte Spektrum in voller Farbenpracht erzeugt werden. Dazu gehört aber ein breiterer negativer Spalt. In Fig. 5 auf Bunttafel VI sind beide Spektra nebeneinander dargestellt, wie sie erscheinen, wenn man dem positiven Spalt etwa die Weite von $\frac{2}{3}$ mm, dem negativen aber eine Breite von $4\frac{1}{2}$ bis 5 mm gibt. Bei solcher Breite des Spaltes zeigen sich die Farben des umgekehrten Spektrums in voller Sättigung. Selbstverständlich muß

¹ Kirschmann, Das umgekehrte Spektrum und die Spektralanalyse. Zeitschrift für Instrumentenkunde 44, S. 176 ff. (1924).

BUNTTAFEL VI

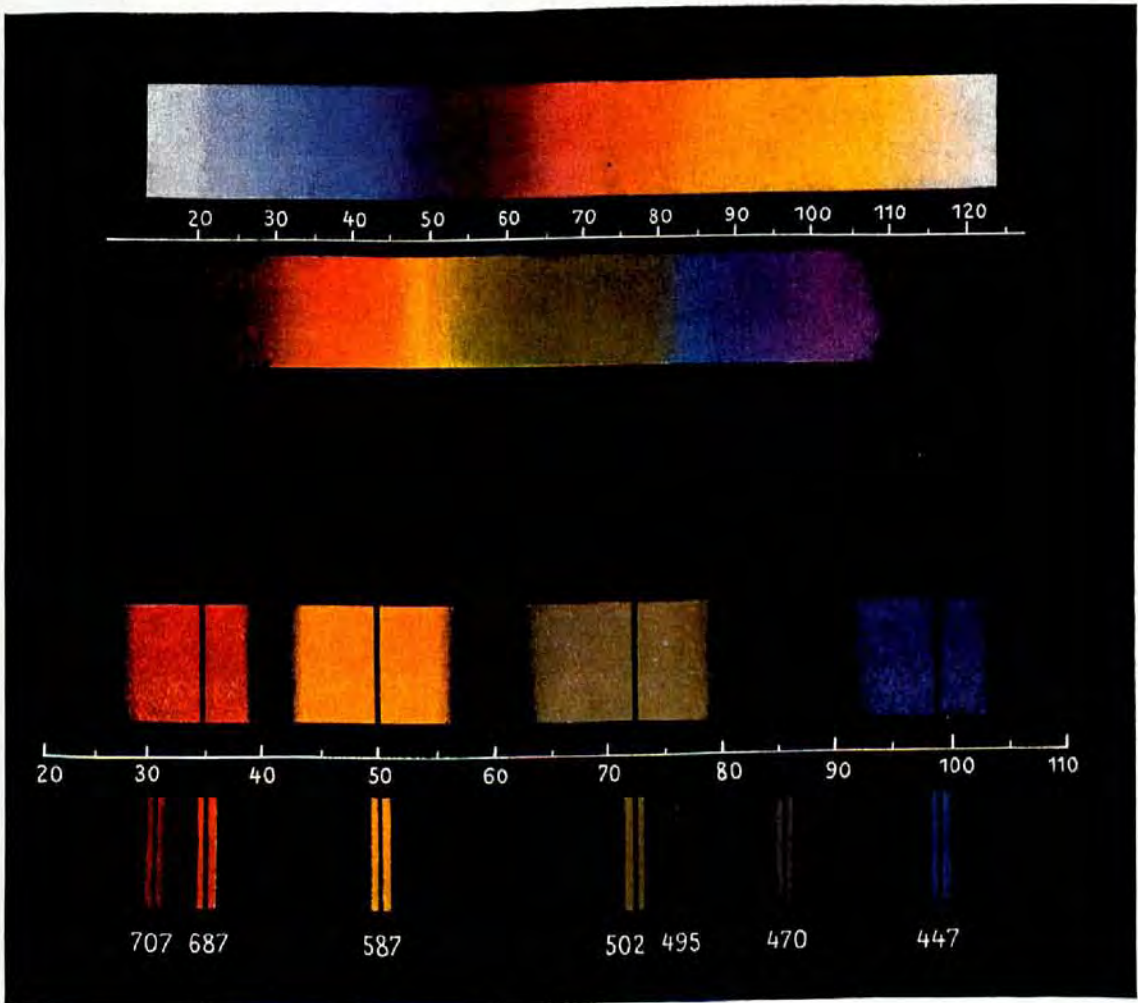


Fig. 5: a) umgekehrtes Spektrum; b) gewöhnliches Spektrum. Fig. 6: a) umgekehrtes Helium-Spektrum bei schmalen Spalt (ein Haar) und völlig offener Kollimatoröffnung; b) dasselbe bei kombiniertem positiven und negativen Spalt. (Ein Haar als Zentralfaden eines etwas über $\frac{1}{2}$ mm weiten positiven Spaltes.) Unten Wellenlänge in $\mu\mu$.

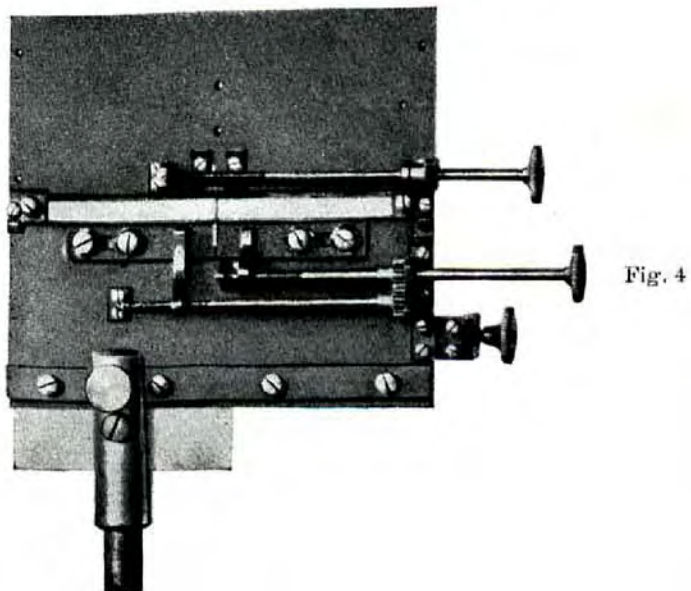


Fig. 4

bei stärker dispergierendem Prisma, z. B. Schwefelkohlenstoffprisma, die Spaltweite viel geringer sein. Gibt man dem positiven und dem negativen Spalte gleiche Weite, so erweisen sich die beiden Spektren im ganzen und in allen ihren homologen Teilen genau komplementär. Man kann das leicht am Projektionsapparat zeigen, wenn man sie mittelst um die Längsachse drehbarer Planspiegel auf dieselbe Fläche wirft. Sie ergänzen sich dann zu einem vollkommen farblosen Bande. Das tun übrigens auch die weiter oben erwähnten, mittelst Halbspaltes erzeugten Kantenspektren schon, bei denen bekanntlich Grün und Purpur fehlen. Es ist demnach das reine, weder grünliche noch nach dem Violett neigende Blau dem spektralen Rot genau komplementär. Ebenso das spektrale Violett dem reinen Gelb des umgekehrten Spektrums. Das weicht allerdings etwas ab von den üblichen Angaben der Komplementärverhältnisse, nach welchen das Rot des spektralen Endes dem Blaugrün komplementär sein soll. Übrigens halte ich die Angaben über den Komplementarismus von Farbenpaaren des gewöhnlichen Spektrums für ziemlich fragwürdig, und zwar aus folgenden Gründen: Erstens: Wenn man für eine gewisse Spaltbreite zwei Spektralregionen durch Angleichung an ein Weiß als Gegenfarben festgestellt hat, so gilt die Gleichung nicht mehr, wenn man die Spaltbreite verändert, trotzdem die Bestimmung der Wellenlängen (d. h. selbstverständlich der mittleren der in Frage kommenden) dieselbe bleibt. Zweitens: Die Qualität des Farblosen (sog. weißes Licht) kann niemals mit absoluter Sicherheit fest bestimmt werden, sondern ist, gerade wie der Nullpunkt der Temperaturempfindung von dem Gesamthalt des optischen Bewußtseins (Erinnerungsbilder nicht ausgeschlossen) abhängig und daher bis zu einem gewissen Grade labil. Diese Labilität der farblosen Qualität ist allerdings viel geringer als die des Indifferenzpunktes zwischen Warm und Kalt, da es sich im letzteren Falle um die neutrale Stelle einer einzigen bipolaren, antagonistischen Reihe handelt, bei der Qualität Farblos (Weiß) aber um einen gemeinsamen Nullpunkt der zahlreichen dichromatischen Systeme. Was wir gewöhnliches weißes Licht nennen, ist häufig doch etwas gefärbt. Man vergleiche einmal genauer verschiedene sog. weiße Papiere oder vom direkten Sonnenschein beleuchtete farblose Gegenstände mit der diffusen Tagesbeleuchtung bei bedecktem Himmel. Die Sonne soll weißes Licht aussenden, ist aber doch ein gelblicher oder gar gelber Fixstern. Der Komplementarismus der homologen Stellen des umgekehrten und des gewöhnlichen Spek-

trums bleibt bei allen durch gleiche Spaltweiten unter Ausschaltung störender Irradiationsverhältnisse erlangten Intensitäten der beiden Spektren erhalten, auch wenn das umgekehrte nur noch eine schwache rosa und blaue Färbung zeigt, vielleicht sogar, wenn alle Farben des letzteren unter der Wahrnehmungsschwelle liegen.¹ Es ist dies aber auch vom rein physikalischen Standpunkte betrachtet nicht nur leicht verständlich sondern geradezu notwendig. Denn jede Stelle des einen Spektrums verdankt ihre spezifische Färbung ja gerade dem Umstande, daß in ihr die Wellenlängen fehlen, deren Zusammenwirken die Qualität der entsprechenden Stelle des andern hervorruft. Ja, man darf geradezu sagen: Es gibt keinen vollkommeneren Komplementarismus als den der homologen Stellen des gewöhnlichen und umgekehrten Spektrums. Ihre Kombination ergibt ja nicht allein farbloses Licht, sondern das volle „Weiß“ der Lichtquelle mit allen seinen ursprünglichen Komponenten. Darum hat die auf solche Weise hergestellte Farbgleichung den Vorzug, daß sie für alle Intensitäten und Spaltweiten in gleicher Weise gültig ist, was man für die aus Regionen eines Spektrums hergestellten farblosen Mischungen keineswegs behaupten kann. An dieser Stelle sei nochmals darauf aufmerksam gemacht, daß es durchaus nicht richtig ist, wenn man behauptet, daß die Sättigung der Spektralfarben mit der physischen Reinheit, d. h. mit der Verminderung der Spaltweite wachse. Das ist, auch abgesehen von den Erscheinungen des Purkinjeschen Phänomens und der bei geringer Lichtintensität zu beobachtenden Tatsache, daß die absoluten Farbenschwellen viel höher liegen als die Lichtschwelle, falsch. Es gilt nur von gewissen Farben, und auch hier nur innerhalb gewisser Grenzen. Im gewöhnlichen Spektrum sind bei engem Spalte die Farben Rot, Grün und Violett vorherrschend. Gelb und Blau sind nur in geringer Ausdehnung sichtbar und zeichnen sich nicht durch besondere Sättigung aus. Je mehr man aber den Spalt erweitert, desto mehr Raum nehmen sie ein auf Kosten des Grün und Violett und desto schöner und gesättigter werden sie, bis bei sehr weitem Spalt das Grün nahezu oder ganz verschwindet und das Gelb unmittelbar in ein liches Ultramarin übergeht. Ob aber daran die Spaltbreite allein schuld ist, oder ob auch die Lichtintensitätsverhältnisse beteiligt sind, das steht mir keineswegs fest. Denn auch wenn man bei sehr engem Spalt das Spektroskop auf eine Lichtquelle von sehr großer

¹ Siehe auch die hochinteressante Arbeit von Prof. Pulfrich. Zeitschrift für Instrumentenkunde 44 (1924), S. 269 und 270.

Helligkeit, beispielsweise die Sonnenscheibe, richtet, verschwindet das Grün. Ich will auch nicht entscheiden, wieweit hier die Tatsache in Betracht kommt, daß das einen Spalt passierende Licht aus zwei Teilen besteht, die sich ganz verschieden verhalten. Der eine Teil geht in der durch die Lichtquelle bedingten geradlinigen Richtung weiter, als ob die Backen des Spaltes nicht vorhanden wären. Der andere Teil aber geht auf Grund der Lichtbeugung vom Spalte aus in allen Richtungen weiter, so als ob der Spalt selbst eine Lichtquelle wäre. Dieser, mit der Verengung des Spaltes im Verhältnis zum andern wachsende Teil macht die Anwendung der Kollimatorlinse nötig. Wenn man diesen, diffus vom Spalte ausgehenden Teil des Lichtes durch einen in einiger Entfernung hinter dem ersten angebrachten Spalt von etwas größerer Weite annähernd vollständig abblendet, bedarf es keiner Linse, um bei Verwendung direkten, mittelst Heliostats in konstanter Richtung gehaltenen Sonnenlichtes ein objektives Spektrum zu entwerfen, in welchem die hauptsächlichsten Fraunhoferschen Linien deutlich zu sehen sind.¹ Ob die beiden Teile des durch einen Spalt gehenden Lichtes, der geradlinig passierende und der diffuse, sich bei der Zerstreuung im Prisma wirklich gleich verhalten, ist m. W. noch nicht experimentell festgestellt.

Im umgekehrten Spektrum sind gerade die Farben Blau und Gelb (und zwar ein Blau, das weder nach Grün noch nach Violett neigt, und ein Gelb, das gleichweit von Orange wie von Grün verschieden ist) die ausgedehntesten; und ihre Sättigung nimmt mit wachsender Breite des negativen Spaltes zu. Dasselbe ist der Fall für das die Mitte des umgekehrten Spektrums einnehmende Purpur, das aber, wenn die Breite des Spaltes eine gewisse Grenze überschreitet immer dunkler wird und zuletzt in Schwarz übergeht, so wie beim gewöhnlichen Spektrum bei starker Erweiterung des positiven Spaltes das Grün in Weiß übergeht. Bei einer gewissen Breite der Spalte, die von der Stärke der Refraktion und Dispersion abhängt, gehen eben beide Spektren einfach in die Kantenspektren über, die für beide ganz gleich sind und nur räumlich eine andere Lage zueinander haben.

Der Übersichtlichkeit halber lassen wir eine kurze Vergleichung der beiden Spektren nach ihren übereinstimmenden und ihren unterscheidenden Eigenschaften folgen:

1 Siehe auch meine Abhandlung: Beiträge zur Kenntnis der Farbenblindheit. Philos. Stud. VIII, S. 201.

Übereinstimmendes

1. Beim gewöhnlichen (positiven) wie beim umgekehrten (negativen) Spektrum handelt es sich an jeder Stelle um eine Superposition von Wellenlängen.

2. Bei beiden hat die Änderung der Spaltweite, wie auch die Änderung der Intensität der Lichtquelle auch Änderungen der Farbenqualitäten zur Folge.

3. Bei beiden aber hat die Änderung der Spaltweite über eine gewisse, vom Dispersionsvermögen des Prismas abhängige Größe hinaus keinen Effekt mehr auf die wahrzunehmenden Farbenqualitäten. Über diese Größe hinaus bestehen beide Spektren aus denselben Elementen, den nur nach ihren gegenseitigen Lageverhältnissen variablen und in ihren homologen Teilen genau komplementären Kantenspektren.

4. Bei äußerster Verengung der Spalte nähern sich beide Spektren in allen ihren Teilen der Farblosigkeit.

5. Die Sättigung der vorherrschenden Farben ist in beiden Spektren am größten bei einer mittleren Spaltweite.

6. Die Sättigung der wahrgenommenen Farben ist bei gleichgünstigen Spalt- und Intensitätsbedingungen bei beiden Spektren gleichwertig.

Unterscheidendes

1. Das ordentliche Spektrum ist in allen seinen Teilen das Produkt einer Übereinanderlagerung von Spaltbildern von verschiedener Wellenlänge. Das umgekehrte dagegen überall das Resultat einer Superposition von Spaltschatten (Schatten des negativen Spaltes).

2. Da ein geradlinig angeordnetes Spektrum immer auch eine Zerreißung der geschlossenen, in sich zurückkehrenden Farbenmannigfaltigkeit bedeutet, so müssen, vorausgesetzt daß nicht die Wellenlänge selbst, sondern irgendein in der Art des Zusammenwirkens von Wellenlängen liegendes Moment für die Farbe verantwortlich ist, in einem solchen Spektrum stets gewisse, den übrigen vollständig gleichberechtigte Qualitäten fehlen. Im ordentlichen Spektrum fehlt das Purpur, im umgekehrten das Grün; in den Kantenspektren fehlen beide.

3. Das ordentliche Spektrum zeigt bei günstigsten Sättigungsbedingungen die Farben Rot, Grün und Violett in größter, Gelb und Blau nur in geringer Ausdehnung. Das umgekehrte Spektrum dagegen

zeigt unter gleichen Verhältnissen Blau, Purpur und Gelb als dominierende Farben, während spektrales Rot und Violett nur in geringer Ausdehnung auftreten.

4. Das ordentliche Spektrum hat seine größte Lichtintensität in den mittleren Regionen (etwa bei *D*, bei sehr geringer Lichtstärke und für den Totalfarbenblinden im Grün, in der Nähe von *E*); das umgekehrte hat sein Helligkeitsmaxima an den Enden.

5. Im gewöhnlichen Spektrum werden bei Verengerung des (positiven) Spaltes alle Farben lichtschwächer und nähern sich dem „Schwarz“. Im umgekehrten werden sie bei Verschmälerung des (negativen) Spaltes lichtstärker und nähern sich dem Weiß, d. h. der Farblosigkeit.

6. Bei Erweiterung des Spaltes über ein gewisses Maß hinaus tritt beim gewöhnlichen Spektrum das Weiß an die Stelle des Grün, beim umgekehrten das Schwarz an die Stelle des Purpur.

7. Bei dem beim binokularen Betrachten eines farbigen Bildes durch eine Konvexlinse auf Grund der chromatischen Aberration sich ergebenden sehr deutlichen stereoskopischen Effekt¹ herrscht bei dunklem (schwarzem) Grunde die Ordnung des gewöhnlichen Spektrums; d. h. die roten Farben rücken am weitesten nach vorn, die blauen und violetten am weitesten zurück. Auf hellem (weißem) Grunde ist es aber nicht etwa umgekehrt, sondern hier herrscht die Ordnung des umgekehrten Spektrums, d. h. Blau (nicht Violett) tritt am stärksten nach vorn, Gelb am weitesten zurück.

Wenn man das Spektrum lediglich als eine Reihe von mehr oder minder komplexen Wellenlängenkombinationen betrachtet, dann ist das gewöhnliche Spektrum „reiner“ als das umgekehrte. Aber sonst gibt, auch vom rein physikalischen Standpunkte betrachtet, das umgekehrte dem gewöhnlichen hinsichtlich der Genauigkeit und Bestimmtheit seiner der messenden Untersuchung zugänglichen Eigenschaften nichts nach. Photographiert man beispielsweise die beiden Spektren auf derselben Platte, so zeigt das umgekehrte, genau in derselben Ausdehnung wie der ultraviolette Teil des gewöhnlichen eine ultragelbe Fortsetzung (Abwesenheit ultravioletter Strahlen). Benutzt man als Lichtquelle ein von einem dünnen Glimmerblättchen reflektiertes Lichtbündel, so zeigen sich die durch die Phasendifferenz des von Vorder- und Rück-

¹ Siehe Kirschmann, Wundts Philosoph. Studien Bd. 18, 1903, S. 114 ff, und Tafel VI
„Zum Problem der Grundlagen der Tiefenwahrnehmung“.

fläche des Blättchens zurückgeworfenen Lichtes erzeugten Interferenzstreifen im umgekehrten Spektrum eben so scharf und deutlich wie im gewöhnlichen. Sehr interessant werden solche Versuche, wenn das Glimmerblättchen so dünn gewählt wird, daß es die Farben dünner Blättchen zeigt.¹

Eben so scharf und bestimmt wie die weiter oben geschilderten umgekehrten Spektren der in der Bunsenflamme brennenden Substanzen fallen auch die Gasspektren der Geislerschen Röhren aus. Fig. 6, Bunttafel VI zeigt das Helium-Spektrum, und zwar in zwei Ausführungen. Bei der oberen bestand der Spalt aus einem Haare, das vor die sonst ganz freie Kollimatoröffnung gespannt war. Hier ist der leuchtende Faden der Heliumröhre zugleich Lichtquelle und positiver Spalt; sie erzeugt die vier hellen Linien in Form großer aber noch getrennter Flächen, auf denen sich dann die schwarzen Linien des umgekehrten Spektrums mit ausgezeichneter Schärfe abheben. Zuweilen sieht man auch noch schwach die Linie $470 \mu\mu$. Meist aber bleibt sie wegen der großen Helligkeit der den positiven Linien entsprechenden Flächen unsichtbar wie die anderen beiden noch schwächeren Linien. Schränkt man aber das Kollimatorfeld durch bilateral verstellbare Backen bis auf eine kleinere Umgebung des Haares ein, so werden auch die schwächeren Linien deutlich sichtbar. Der untere Teil der Figur zeigt das Heliumspektrum, wie es sich bei einem solchen, aus breiterem positiven und schmalen negativen, kombinierten Spalte präsentiert. Der positive Spalt ist in diesem Falle etwas über einen halben Millimeter weit, der negative ist das einen Zentralfaden bildende Haar. Die Weite des positiven Spaltes ist hierbei ziemlich belanglos; sie muß nur gering genug sein, um zu verhindern, daß sich benachbarte Linien durch ihre Helligkeit gegenseitig stören. Die genaue Lage der positiven Linien wird jetzt nicht durch das positive Spaltbild, sondern durch die Lage der negativen schwarzen Spaltschatten auf der Skala angezeigt. Diese neue Spaltanordnung dürfte sowohl für die chemische wie für die astronomische Spektralanalyse von Bedeutung werden, und zwar überall da, wo es sich um sehr lichtschwache Objekte handelt, die eine starke Verengerung des positiven Spaltes nicht mehr vertragen. Hier wird der genügend verbreiterte positive Spalt die Lichtquelle verstärken, während die genaue Lokalisation durch die dunklen Linien des negativen Spektrums erfolgt.

¹ Siehe auch meine Arbeit in der *Physikalischen Zeitschrift*, Jahrg. 1917. Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse, S. 199.

Da aber kontinuierliche Spektralteile (Banden) keine scharfen schwarzen Linien erzeugen, so wird der Befund des umgekehrten Spektrums bei schwachen Himmelsobjekten geradezu als Kriterium für die Entscheidung der Frage dienen können, ob kontinuierliche Spektralteile (unauflösbare Sternhaufen) oder Linienspektren (echte Nebel usw.) vorliegen.

Bei dem in Fig. 6 abgebildeten Heliumspektrum war der negative Spalt ein menschliches Haar. Aber ein Haar ist immer noch ein verhältnismäßig grobes Objekt. Wenn man statt dessen einen sehr feinen Metallfaden oder einen Spinnfaden anwendet, erhält man viel genauere Resultate. Durch die dankenswerte Hilfe der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft in Berlin ist es mir möglich gewesen, durch die Firma Zeiss in Jena einen neuen Spektralapparat für gleichzeitige Beobachtung beider Spektren bauen zu lassen (derselbe liegt vorläufig erst in einem noch zu verbessernden Prüfungsexemplar vor), bei welchem der negative Spalt aus einem Spinnfaden besteht. Mit diesem Spektroskop beobachtet, erscheint die Natriumlinie im umgekehrten Spektrum eben so scharf als Doppellinie wie im gewöhnlichen und lassen sich überhaupt mehrfache Linien in beiden Spektren mit gleicher Schärfe auflösen. Ich möchte an dieser Stelle erwähnen, daß Herr Prof. Pulfrich meine an Dispersionsspektren gemachten Beobachtungen auch am Gitterspektrum bestätigt hat.

Zum Schlusse wollen wir noch die Frage erörtern: Wie lassen sich die am umgekehrten Spektrum gemachten Beobachtungen mit den bisherigen Lichttheorien in Einklang bringen? und: Was „wissen“ wir überhaupt über die physische Natur des Lichtes?

Licht ist eine Bewußtseinstatsache; also, so weit wir etwas darüber „wissen“ können, etwas Psychisches. Für den Physiker, der das Naturgeschehen in Vorgänge rein objektiver, von allem Psychischen unabhängiger Art zerlegen will, gibt es eigentlich kein Licht. Denn die objektiven Vorgänge, die wir als unseren Lichtwahrnehmungen parallelgehend vermuten, unterscheiden sich gar nicht oder höchstens dem Grade nach von andern periodischen Vorgängen, die entweder gar kein Äquivalent in unserem Bewußtsein haben oder die wir nur direkt oder auf Umwegen durch andere Sinne wahrnehmen. Was Licht und Farbe ist, entscheidet nicht die Physik, sondern der Gesichtssinn des Menschen, und nicht einmal in gleicher Weise für verschiedene Individuen, ja zuweilen nicht einmal in gleicher Weise für die beiden Augen desselben

Individuums. Es gibt total und partiell Farbenblinde. Es gibt Leute, für die ganze Partien des Spektrums (besonders an den Enden) kein Licht sind (verkürztes Spektrum) und andere, die ein verlängertes Spektrum haben. Ich habe in Toronto einen Dichromaten untersucht, der die langwelligen Strahlen noch ein ganzes Stück ins infrarote Spektrum hineinsah.¹ Ich kann nicht recht begreifen warum diese Eventualität eines verlängerten Spektrums in der einschlägigen Literatur so ganz vernachlässigt worden ist. Für manche Tiere sind auch die ultravioletten Strahlen, die wir nicht sehen und nur auf Umwegen feststellen können, Licht. Von den 50 Oktaven elektro-magnetischer Schwingungen von den Herzschen Wellen bis zu den γ -Strahlen, wählt unser Gesichtssinn knapp eine einzige aus, für alle anderen ist er unempfindlich. Man könnte sich Wesen denken, deren Gesichtssinn nur für Röntgenstrahlen empfindlich wäre. Was würden sie von aller menschlichen Schönheit erblicken? Außer verschwommenen nebligen Massen nicht viel mehr als Knochen, Geldstücke und Hausschlüssel.

Durch die Feststellung des Zeitverbrauchs und der Geschwindigkeit der Lichtfortpflanzung sind die alten Theorien, die das Sehen als eine Art Tastbetätigung durch vom Sinnesorgane ausgehenden Fühlerstrahlen betrachteten, als völlig absurd erwiesen. Durch die Entdeckung der Interferenz wurde auch die Emissionstheorie und durch die Entdeckung der Polarisation des Lichtes auch die Longitudinal-Wellentheorie endgültig ausgeschlossen. Das farblose Licht muß auf einem periodischen Vorgange beruhen, der Zeit gebraucht, nicht einfach ist, sondern sich aus einer großen (nicht unendlichen) Anzahl von Teilvorgängen zusammensetzt, die in irgendeiner Weise verschieden sind, und sich im Raume im wesentlichen in einer zur Fortpflanzungsrichtung transversalen Richtung vollziehen. Wenn der sich in gerader Richtung fortpflanzende komplexe Lichtvorgang unter schiefer Inzidenz an der Grenze zweier Mittel von verschiedener „optischer“ Dichte ankommt, dann trennen sich die Teilvorgänge und gehen in verschiedener Richtung weiter. Bei senkrechtem Eintritt in ein Mittel von anderer Dichte tritt dies nur in gewissen Fällen von anisotropen und doppelbrechenden Medien ein. Während allen diesen physischen Vorgängen, den komplexen wie den Teilvorgängen, psychisch eine nur quantitativ variable Helligkeitsempfindung entspricht, tritt nur bei den Teilvorgängen die Farbenempfindung ein, und zwar scheint diese weniger von dem Vor-

¹ University of Toronto Studies, Psychological Series, Vol I, S. 97.

handensein als von der Abwesenheit von Teilvorgängen abhängig zu sein. Sobald eine Gruppe von Brechbarkeitsstufen oder Wellenlängen fehlt, wird die Lichtempfindung farbig. Soweit ist die „Wellentheorie“ des Lichtes oder, da die Analogie mit den Wellen an der Oberfläche einer Flüssigkeit keineswegs einwandfrei, und die mit den Verdichtungen und Verdünnungen der longitudinalen Schallwellen offenbar falsch ist, sagen wir lieber die „Periodizitätstheorie“ des Lichtes, einwandfrei und widerspruchlos erwiesen. Licht und Farbe müssen physisch in periodischen Bewegungsvorgängen bestehen. Alle Versuche aber, uns diese Vorgänge in Analogie mit molaren mechanischen Bewegungen vorzustellen, müssen mißlingen und sich in unlösbaren Widersprüchen verlieren. Der erkenntnistheoretische Grund hierfür besteht darin, daß die Naturwissenschaft es für möglich hält, eine konsequente rein objektive Weltanschauung zu konstruieren unter Verneinung der Begriffe der Fernwirkung und der Freiheit. Seit Jahrtausenden bemüht sich die Physik, die Tatsache der Fernwirkung zwischen Lichtquelle und empfindendem Sinnesorgan hinwegzuerklären. Sie hat zu diesem Zwecke den Äther erfunden, jenen unwägbaren, stahlfesten und doch keinerlei Widerstand leistenden Stoff, dem sie in naiver Weise die widersprechendsten Eigenschaften zuschreiben muß. Ist er, wie bei Cartesius alle Materie, ein den Raum ganz ausfüllendes Etwas, dann ist nicht einzusehen, wie in einem solchen Kontinuum überhaupt eine Bewegung stattfinden kann, da an keiner Stelle für eine solche Platz gemacht werden kann. Sind aber alle Bewegungen so ewig und unveränderlich wie die Materie selbst, dann kann kein ursächlicher Zusammenhang zwischen ihnen bestehen und es kann keinerlei Änderung in der Bewegung stattfinden. Daß ein materielles und überhaupt ein objektives Kontinuum undenkbar ist, das beweist uns heute, von ganz anderem Standpunkte ausgehend, die Quantentheorie. Es gibt überhaupt nur eine Kontinuität, von der wir etwas „wissen“ können, das ist die Kontinuität des eigenen Ichs, und die ist dieselbe wie die des Raumes und der Zeit. Überall wo wir in der von uns konstruierten objektiven Welt (die niemals Gegenstand des Wissens, d. h. der absoluten Gewißheit, sondern nur des Glaubens sein kann) Kontinuität setzen, da haben wir sie aus unserem eigenen Bewußtsein hineingetragen, selbst in die Mathematik, wenn wir diese als etwas anderes denn als „die Psychologie unserer Raum- und Größenanschauung“ betrachten.

Wenn aber der Äther kein Kontinuum sein kann und den Raum nur

teilweise ausfüllt, dann muß er aus durch leere Zwischenräume getrennten Teilchen bestehen. Wie wirkt aber dann ein Teilchen auf das nächste, seine Bewegung auf dasselbe übertragend? Offenbar nur durch irgendeine den leeren Raum durchsetzende Anziehung oder Abstoßung. Das wäre aber wieder eine Fernwirkung, wenn auch nur eine Wirkung in eine geringe Ferne. Dann hat man aber das große Wunder der Fernwirkung zwischen Lichtquelle und empfindendem Auge nicht aus der Welt geschafft, sondern nur in Myriaden von kleinen Fernwirkungswunderchen zerlegt und das ursprüngliche Problem nicht gelöst, sondern nur in den Keller oder auf den Speicher getragen, wo es von dem vor- und außerwissenschaftlichen Denken für gewöhnlich nicht bemerkt wird.

Nun könnte man aber noch zu dem Einwand seine Zuflucht nehmen, die Ätherteilchen wirkten durch mechanischen Druck und Stoß aufeinander, denn sie sind ja, trotz der Eigenschaft des Äthers als vollkommenes Fluidum, so überaus elastisch. Das wäre aber ein *Circulus vitiosus* ärgster Art. Denn die Elastizität pflegt die Physik zu definieren und zu erklären, als das Bestreben eines Körpers, die durch irgendeinen Angriff gestörte Anordnung seiner durch leere Zwischenräume getrennten Teilchen wieder mehr oder minder vollkommen herzustellen. Dann müßten aber die Ätherteilchen, wenn sie selbst elastisch sein sollen, wieder aus kleineren, ebenfalls durch Zwischenräume getrennten Teilchen bestehen usw. in infinitum; man steht dann immer wieder vor dem ursprünglichen Problem und kommt von ihm nicht los. Dazu kommt noch ein weiteres: Druck und Stoß setzen, wenn sie das Fernwirkungsproblem lösen sollen, Kontakt voraus. Nun machen es aber die Errungenschaften der modernen Physik im höchsten Grade unwahrscheinlich, daß es in einer objektiven Welt überhaupt so etwas wie Kontakt geben kann. Der Kontakt ist wie die Kontinuität eine rein psychische Tatsache. Ich berühre den Tisch mit meinem Finger, das ist Kontakt. Aber es ist nicht anzunehmen, daß irgendein Molekül, Atom oder Elektron meines Fingers wirklich mit einem entsprechenden Teilchen des Tisches an dem gleichen Orte zusammentrifft, auch wenn man annimmt, daß die Elektronen und positiven Kerne, die in Entfernungen umeinander herumwirbeln, die im Verhältnis zu ihrer GröÙen den Planeten im Sonnensysteme entsprechen, die letzten Teilchen sind. Das ist aber höchst unwahrscheinlich, denn auch, wenn man annimmt, daß die Materie nur einen außerordentlich kleinen Teil des Raumes wirklich kontinuierlich ausfüllt, gelangt man zu unlösbaren

Widersprüchen. Der Begriff der „Dichte“ ist nur vereinbar mit der Annahme, daß die Materie gar keinen Raum ausfüllt und nur aus unausgedehnten „Kräftepunkten“ besteht. Da es aber keine benachbarten Punkte geben kann (der Begriff des benachbarten Punktes ist ein streng logisch unerlaubter mathematischer Hilfsbegriff, der nur zur denkökonomischen Abkürzung der Darstellung dienend, weder in den Voraussetzungen noch in dem Resultat einer wissenschaftlichen Deduktion auftreten darf), so muß die Wissenschaft von vornherein das Wunder der Fernwirkung zugeben, denn es kann ja überhaupt keine andere Wirkung als Fernwirkung geben, und die so oft geübte Gegenüberstellung von Fernwirkung und Nahewirkung muß als eine Verletzung des erkenntnistheoretisch absolut geforderten Grundprinzips der Relativität aller Größen dastehen.¹ Wenn aber die elementaren Entitäten der objektiven Welt nur mathematische Punkte im Raum sind, von denen Wirkungen ausgehen, und zwar Wirkungen in kleine und größere Entfernungen, dann kann man aber auch gerade so gut ehrlich zugestehen, daß solche Kräftezentren, die man mit Wundt ebensogut Willensatome nennen könnte (das Wort Atom hier in seiner ursprünglichen Bedeutung genommen) nur, in Analogie mit dem eigenen Ich, als unteilbare psychische Wesen betrachtet werden müssen. Und wenn man dann weiter bedenkt, daß die sog. Naturgesetze nur insofern absolute Gewißheit mit sich führen, als sie sich auf rein mathematische, von der Zeit unabhängige, notwendige Beziehungen zurückführen lassen², und daß die Kausalität nur Notwendigkeit besitzt, so weit sie sich auf von

1 Siehe auch meine Schrift: „Die Dimensionen des Raumes“, und meinen Beitrag zum Wundtwürdigungsheft: „Wundt und die Relativität“, 2. Aufl.

2 Selbst die Gesetze der Kinematik sind nicht rein mathematisch, da sie auf der bis jetzt nicht bewiesenen Annahme beruhen, daß man die Zeit nach Analogie mit einer geraden linearen Strecke behandeln dürfe. Die Gegenwart entspricht aber keineswegs einem Punkte in einer Strecke. Die Gegenwart ist vielmehr die alleinige und ganze Zeit, von der wir etwas „wissen“, d. h. mit voller Gewißheit aussagen können. Die Vergangenheit und Zukunft sind Gewißheit nur, soweit sie als sog. Erinnerungs- oder Phantasievorstellungen Teile der Gegenwart sind. Im übrigen sind sie Gegenstand des G l a u b e n s. Die Geschichte ist darum viel mehr das Weltgerücht als das Weltgericht. Wo die Zeit eine Rolle spielt, hört die Gewißheit auf und fängt der Glauben an. Jeder Naturvorgang, der Zeit gebraucht, birgt ein Element in sich, das sich nicht auf notwendige Abhängigkeit, auf die exakte Grund- und Folgebeziehung zurückführen und in eine deterministische Weltanschauung einreihen läßt. Solange die Wissenschaft es ablehnt, die als Ausdruck von Willensfreiheit und Fernwirkung zu betrachtenden psychischen Gegebenheiten unter ihre unveräußerlichen Voraussetzungen aufzunehmen, wird sie nicht zu einer konsequenten und widerspruchlosen Weltanschauung gelangen können.

der Zeit unabhängige Beziehungen von Grund und Folge reduzieren läßt, im übrigen aber „Glaubens“-Sache ist und bleibt, dann wird man sich der Einsicht nicht verschließen können, daß zwischen „freiem Willen“ und „Fernwirkung“ in letzter Instanz kein fundamentaler Gegensatz besteht. Die moderne elektromagnetische Lichttheorie, die die früher angenommenen Undulationen durch Veränderungen oder Verschiebungen von Feldzuständen ersetzen zu können glaubt, obgleich für das räumliche Verhalten dieser Felder und Feldzustände dieselben Schwierigkeiten bestehen bleiben wie für die Vibrationen von kleinsten Teilchen, ist auf die Herz-Maxwellschen Differential-Gleichungen aufgebaut. Differentialgleichungen können aber auf eine von allem Psychischen unabhängig gedachte objektive Welt, in der es, wie wir gesehen haben, keine Kontinuität geben kann, keine exakte Anwendung finden. Die magnetelektrische Lichttheorie ist eben auch nur ein logisch inkonsequenter Notbehelf, um die Schwierigkeiten und Widersprüche, in denen sich jede rein objektive Weltanschauung unweigerlich verfangen muß, möglichst zu verstecken. Der Glaube an eine von jedem Psychischen unabhängige, einen objektiven Raum ausfüllende und an Quantität oder Masse absolut konstante Materie ist seit den neusten Errungenschaften der physikalischen Wissenschaft schon stark ins Wanken geraten. Ist doch die Masse nach Einstein von der Geschwindigkeit abhängig (die Geschwindigkeit selber aber, die nach Einstein ein Maximum, die Lichtgeschwindigkeit, nicht übersteigen kann, darf aber dann dem psychischen Grundprinzip der Relativität aller Größen nicht restlos unterworfen sein). Der alte längst als entschieden geltende Streit zwischen Emissions- und Undulationstheorie mag sich daher in der Folge einmal als gegenstandslos herausstellen, denn was wir Körper, ponderable Masse, nennen, erweist sich vielleicht als aus besonders konstanten Bewegungskomplexen (Helmholtz-Lord Kelvinsche Wirbel) oder gar aus Löchern in der imponderablen Masse, dem Äther, bestehend. An der Wellentheorie des Lichtes, soweit sie nicht mehr zu sein vorgibt als eine reine Periodizitätstheorie, wird durch alle diese durchgreifenden Änderungen in den Grundanschauungen der Physik aber nicht gerüttelt. Daß man sich dabei aber nicht den grob mechanischen, der gewöhnlichen „Erfahrung“ nachgebildeten Vorstellungen hingeben darf, das möchte ich im Folgenden durch Ausführung einiger Schwierigkeiten, die bestehen bleiben, einerlei ob man sich die periodischen Vorgänge als Vibrationen von Ätherteilchen oder als Wanderung von Feldzuständen denkt, noch zeigen:

1. Man denke sich irgend einen erhellten Raum, draußen in der Natur oder in einem Zimmer, und einen bestimmten Punkt im Innern dieses Raumes. Von jedem andern Punkte an den Grenzen oder innerhalb dieses Raumes kann man in der Richtung durch diesen Punkt hindurch irgendeinen andern in dem Raum befindlichen Punkt samt dessen Umgebung sehen. Und zwar können Millionen an Intensität, Farbe und Gestalt verschiedene Flächenteile gleichzeitig durch diesen Punkt hindurch gesehen werden. Nun frage ich: Wie macht es die an diesem Punkt stationierte Äthereinheit, oder die dortige Feldstelle, daß sie alle die unzähligen an Intensität und Farbe so verschiedenen Strahlen gleichzeitig durchläßt und weiterbefördert?

2. Nach den optischen Gesetzen ist die Amplitude der transversalen Lichtschwingungen der Ätherteilchen oder der Wanderungen des Feldzustandes umgekehrt proportional der Entfernung von der Lichtquelle. Wir können am Sternhimmel noch Spiralnebel sehen, die tausendmal weiter von uns entfernt sind als die Grenzen des Milchstraßensystems. Trotzdem das Licht von dort aus viele Millionen von Jahren braucht, um zu uns zu gelangen, muß es noch eine genügende Amplitude besitzen, um einen Reizvorgang auf der Retina auszulösen. Das Licht legt in der Sekunde 300 000 km zurück und macht bei mittlerer Wellenlänge in dieser Zeit 600 000 000 000 000 Schwingungen. Es bewegt sich also während einer Transversalschwingung in seiner Fortpflanzungsrichtung um $\frac{1}{2000}$ mm weiter. Nehmen wir an, daß die transversale Komponente seiner Bewegung, also seine Schwingungsamplitude, bei seiner Ankunft an unserem Auge noch tausendmal schwächer sei, also nur $\frac{1}{2000\,000}$ mm betrage, und setzen wir die Entfernung des Nebels auf nur 1 Million Lichtjahre fest, dann berechnet sich die Amplitude der Lichtschwingung in einer Entfernung von 1 km von der Lichtquelle auf $4\frac{1}{2}$ Mill. km und diese Strecke hat das Teilchen oder der Feldzustand in $\frac{1}{600\,000\,000\,000}$ einer Sekunde zurückzulegen. Wo bleibt da die Einsteinsche Maximalgeschwindigkeit des Lichtes, wenn dasselbe transversal millionenmal größere Räume durchheilen muß als in seiner Fortpflanzungsrichtung. Irgend etwas muß falsch sein an der Amplitudenrechnung.

3. In einem Strahle farblosen Lichtes marschieren die unzähligen Wellenlängen vom äußersten Rot bis zum äußersten Violett alle auf

derselben Linie, angeblich ohne sich zu stören. Wenn sie unter schiefer Inzidenz an einem neuen Mittel ankommen, trennen sie sich und bilden eine Reihe. Bei ihrer großen Zahl darf man aber nicht sagen: Sie marschieren in Korporalschaftsfront, sondern muß mindestens Bataillons- oder Regimentsfront annehmen. Sie marschieren aber nicht in gleichem Schritt und Tritt, sondern jeder Mann mit anderer Schrittlänge und Schrittzeit. Bei jeder Änderung der Dichte des Mediums, in dem sie sich bewegen, müssen sie eine Schwenkung machen, bleiben dabei aber immer tadellos gerichtet. Wie ist das möglich? Aber Tatsache ist es. Muß man da nicht auf den Gedanken kommen, daß doch etwas nicht richtig sei mit der Annahme, daß das farblose (weiße) Licht nur das Produkt einer Summierung, um nicht zu sagen Mischung, der verschiedenen Wellenlängen sei.

4. Wie kommt es, daß bei schiefer Durchgang durch ein Mittel mit planparallelen Grenzflächen keine Spur von Farbenzerstreuung eintritt. Ich habe mir seinerzeit zur Untersuchung dieser Frage für mein Institut in Toronto bei Zeiss einen Flintglasblock von mehr als 10 cm Durchm. mit zwei exakt geschliffenen planparallelen Flächen herstellen lassen. Aber es zeigte sich auch bei schiefer Inzidenz keine Spur von Dispersion. Die üblichen Physiklehrbücher behandeln ja meist die Refraktion zuerst. Wenn dann nachher die Dispersion drankommt, wird auf diese Frage nicht mehr eingegangen. In einer Ausgabe von Müller-Pouillet steht in einem Anhang zwar eine Erklärung. Aber sie ist falsch. Sie könnte bestenfalls Anspruch auf Gültigkeit erheben für den Fall eines dunklen Punktes in heller Umgebung, nicht aber umgekehrt. Wird ein heller oder leuchtender weißer Punkt auf dunklem Grunde durch ein Glas mit planparallelen Flächen unter schiefer Einfallsrichtung gesehen, so werden die weißen Strahlen des Lichtbündels nach der Theorie bei dem Eintritt in das Glas gebrochen und dispergiert. Beim Austritt werden die farbigen Komponenten zwar alle wieder in ihre ursprüngliche Richtung zurückgebrochen, aber nicht wieder vereinigt. Sie gehen parallel weiter und bleiben um so weiter auseinander, je weiter ihr Weg in dem Mittel ausfiel. Oder hat jemand etwa bewiesen, daß parallele farbige Strahlen vom Auge vereinigt werden, auch wenn sie millimeter- oder gar zentimeterweit auseinander sind?

5. Wie kommt es, daß bei schiefer Inzidenz bei nur einmaliger Brechung keine Dispersion stattfindet. Wenn man auf dem Grunde einer Flüssigkeit (Wasser) eine punkt- oder linienförmige Lichtquelle befestigt,

dann sollte man doch meinen, die Strahlen derselben müßten bei schieferm Durchgange durch die Oberfläche nicht bloß gebrochen, sondern auch dispergiert werden. Man merkt aber nicht die Spur von farbigen Rändern. Ebenso hört die Dispersion vollständig auf, wenn die Lichtquelle in die eine Fläche des Prismas rückt (wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man die eine Fläche eines größeren Prismas berußt und dann mit einer Nadel ein paar Punkte oder eine der brechenden Kante parallele Linie in die Berußung ritzt. Wie kommt es, daß das Licht der nicht in der Nähe des Zeniths befindlichen Gestirne bei seinem schieferm Durchgang durch die Atmosphäre, trotz der starken Brechung, die es erfährt, keine Dispersion erleidet?

6. Wie kommt es, daß die Länge des Weges, den die Strahlen im Innern des Prismas zurücklegen, gar keinen Einfluß auf die Stärke der Dispersion hat? Auch bei einem recht großen Prisma macht es keinen Unterschied, ob man das Lichtbündel in der Nähe der brechenden Kante oder in großer Entfernung von ihr passieren läßt.

7. Warum beginnen die Kantenspektren mit Gelb und mit Blau, anstatt, wie es nach der Theorie sein müßte, mit einem mittleren Grün. Ebenso beginnen die Farben der rotatorischen Polarisation nicht, wie es sein müßte, wenn die Farbe wirklich eine eindeutige Funktion der Wellenlänge wäre, mit einem Grün, sondern mit dem Gelb erster Ordnung.

8. Wenn das Auftreten gewisser heller Linien bei $589 \mu\mu$ die Anwesenheit glühender Natriumdämpfe in der Lichtquelle beweisen und andere Linien das Vorhandensein von Kalium, Indium, Thallium usw. anzeigen soll; warum gilt dies nur, wenn ihre nächsten Nachbarn fehlen? Warum spricht man bei weißglühenden Körpern von einem kontinuierlichen Spektrum, obgleich man doch gar nicht sicher ist, ob es ein vollständig kontinuierliches Spektrum in einer objektiven Welt geben kann. Warum sagt man nicht wahrheitsgemäß: Die Photosphäre eines weißglühenden Körpers benimmt sich genau so, als ob in ihr alle bekannten und unbekanntes Elemente vorhanden wären.

Die Versuche neuerer Zeit¹, die Goethesche Farbenlehre an die Stelle der Newtonschen zu setzen, können, soweit sie sich gegen die Dispersions- und Periodizitätslehre richten, ebenso wenig auf ernstem Erfolg

¹ Zum Beispiel von E. Barthel, Goethes Relativitätstheorie der Farbe, Bonn 1923.

rechnen, wie es der heftige Kampf, den Goethe selbst in seiner Farbenlehre gegen diese Theorie geführt hat, konnte. Auf den, wie wir weiter oben gesehen haben, auch in einem gewissen Sinne ganz richtigen alten Satz, daß die Farbe etwas Schattiges sei, fußend, will man alles Farbige auf den Gegensatz zweier Grundqualitäten, Schwarz und Weiß zurückführen und sucht möglichst aus dem komplementären Gegensatz der Farben Kapital zu schlagen. Man sagt, wie die Farben selbst, seien auch die Komplementarverhältnisse etwas physikalisch Objektives.¹ Man bedenkt dabei nicht, daß die physischen Eigenschaften des Lichtes und der Farben für den partiell oder total Farbenblinden doch genau dieselben sind wie für den mit normalem Farbensinn Begabten, und daß die Physik noch nicht imstande gewesen ist, auch nur das geringste, exakter Untersuchung zugängliche, physische Äquivalent des Komplementarismus vorzuweisen. Ja es ist sogar höchst unwahrscheinlich, daß ein solches physisches Äquivalent jemals entdeckt wird, da der bei dem Komplementarismus eine Hauptrolle spielende Indifferenzpunkt zwischen je zwei Gegenfarben, die Qualität Farblos, ganz ähnlich wie der Nullpunkt unserer Temperaturempfindungen gar nicht genau festgelegt werden kann, sondern bis zu einem gewissen Grade labil ist. Auf Schwarz und Weiß als Grundphänomene läßt sich keine Qualitätenmannigfaltigkeit aufbauen, denn Schwarz und Weiß sind überhaupt keine Wahrnehmungselemente, keine nicht weiter zerlegbaren Empfindungsmerkmale, sondern ganz komplizierte Vorstellungen, in die nicht nur Bestandteile der Wahrnehmung, sondern auch reproduzierte Elemente und anderes eingehen. Nur „Dinge“, d. h. Teile der mit Hilfe von Abstraktion, Begriffsbildung, Analogieschlüssen usw. konstruierten und niemals absolute Gewißheit mit sich führenden, sog. „objektiven“ Welt, können schwarz, weiß oder grau sein, nicht aber wahrgenommene Flächen im Raume. Wenn ein Beobachter auf die direkt gegebenen optischen Daten angewiesen ist, und seine Wahrnehmung nicht durch irgendwelches „Wissen“ um die „Dinge“ usw. korrigieren darf, dann „sieht“ er zwar noch Rot, Blau, Grün usw., aber nicht mehr Schwarz, Weiß und Grau, sondern nur noch: Farblos, mehr oder weniger hell.² Wenn wir eine Wandtafel vor uns haben, die einen gewissen Teil des farblosen Lichtes reflektiert, dann sagen wir, es sei eine schwarze Tafel. Wenn aber eine Fläche, von der wir wissen, daß sie einem Zy-

1 Barthel, Die oben zitierte Abhandlung, S. 17.

2 Siehe auch die Arbeit von Dr. Fiedler in diesem Bande.

linderhut oder einem Tuchrock angehört, genau dieselbe Lichtqualität und Intensität zeigt, wie jene Wandtafel, dann nennen wir sie nicht mehr „schwarz“. Und wenn Sammt dieselbe „Schwärze“ zeigt wie schwarzes Tuch, dann ist er eben kein „schwarzer“ Sammt, sondern höchstens dunkelgrauer. Und selbst auf schwarzem Sammt sieht man noch Schatten, und selbst diese sind nicht so dunkel wie eine (nicht zu große) Öffnung in einen lichtlosen Raum. Die gar kein Licht zurückwerfende Oberfläche des „absolut schwarzen Körpers“ der Physik ist nur möglich, wenn sie überhaupt keine Oberfläche, sondern ein Loch in der Wand eines im Innern vollständig dunklen Raumes ist. Wenn man die absolute Lichtlosigkeit (und was durch den Kontrast dazu gemacht wird) Schwarz nennen will, so möge das gelten; aber dann ist Schwarz als Qualität keine Licht-Empfindung mehr. Ebenso wenig gibt es eine Empfindungsqualität „Weiß“. Farblose Gegenstände, deren Oberfläche bei uns bekannten gleichmäßigen Beleuchtungsverhältnissen die Höchst-Albedo zu besitzen scheinen, nennen wir weiß, solche die im Vergleich zu ihrer Umgebung geringere Lichtreflexion zeigen, heißen grau. Das ist aber keine direkte Wahrnehmung, sondern das Resultat einer, bei genügender Erfahrung zwar schnell vollzogenen aber doch sehr komplexen Erschließung, die uns auch, sobald Spiegelung, Glanz, Durchsichtigkeit, Selbstleuchten und ähnliche Umstände dabei in Frage kommen, oft zu groben Fehlern führt oder ganz im Stiche läßt. Den Schnee geben wir immer vor, weiß zu sehen, auch da wo er im tiefen Schatten ist, und sogar auf einer gemalten Landschaft, auch wenn sie nicht einen einzigen „weißen“ Farbenstrich enthält. Wenn an einem trüben Wintertag der ganze Himmel gleichmäßig bedeckt und jede andere Lichtquelle ausgeschlossen ist, dann bietet er die hellste Fläche im ganzen Gesichtsfeld und ist immer noch heller als irgendeine, doch nur durch das diffuse Licht des Himmels beleuchtete Schneefläche, sie mag liegen, wie und wo sie wolle. Trotzdem behaupten die Menschen dann, sehen, d. h. wahrnehmen zu können, daß der Himmel grau, der Schnee aber weiß sei. Läßt man sie aber dann mittels eines astronomischen (d. h. umkehrenden) Fernrohrs, ohne daß sie von der Umkehrung etwas wissen, und unter Ausschluß aller sonstigen Gesichtsjobjekte (totale Reduktion), nebeneinander ein Stückchen grauen Himmels und ein Stückchen der Schneefläche in bester Belichtung sehen, dann sagen sie, der Himmel (das hellere Objekt) sei der Schnee, und der Schnee sei der graue Himmel.

Zusammenfassung:

1. Die Periodizitätstheorie des Lichtes ist unangreifbar und unabhängig davon, ob man die Farbe direkt als Funktion der Periodizitätsfrequenzen oder des Zusammenwirkens derselben ansieht.

2. Die Erscheinungen des umgekehrten Spektrums sprechen mit ziemlicher Entschiedenheit für die letztere der beiden Möglichkeiten. Der Modus der Superposition ist für die Lichtqualität verantwortlich. Die Gesetzmäßigkeit dieser Abhängigkeit zwischen Farbe und Superposition der periodischen Lichtvorgänge ist heute noch nicht zahlenmäßig und exakt erforscht. Vielleicht gelingt es der Physik, mit Hilfe von quantentheoretischer Elektronenlehre und Zahlentheorie das Rätsel zu lösen.

3. Die Farben des umgekehrten Spektrums haben genau dasselbe Recht wie die des gewöhnlichen, als einfache Lichtqualitäten zu gelten. Die landläufigen Theorien über Reinheit der Spektralfarben und Farben-„Mischung“ sind erkenntnistheoretisch unhaltbar.

4. Das umgekehrte Spektrum läßt sich wie das gewöhnliche in den Dienst der Spektralanalyse stellen. Bei lichtschwachen Objekten dürfte eine Verbindung von positivem und negativem Spektrum (breiterer Spalt mit als negativem Spalt wirkendem Zentralfaden) besondere Vorteile bieten.

5. Bei geeigneter Wahl des negativen Spaltes steht das umgekehrte Spektrum hinsichtlich der Schärfe der Lokalisation seiner (den Fraunhoferschen entsprechenden) Linien dem gewöhnlichen Dispersions- und Gitterspektrum nicht nach. Als engster negativer Spalt kann hier eine einzige, nach Art der feinsten Gitter geritzte Linie verwandt werden.¹

6. Da das umgekehrte Spektrum kontinuierliche nicht scharf begrenzte oder nicht in Linien aufzulösende Spektralteile gar nicht oder nur sehr schwach zeigt, positive Linien dagegen auch bei ganz geringer Lichtstärke sehr deutlich erkennen läßt, so dürfte es in Fällen, wo die Lichtschwäche des zu beobachtenden Objektes die Reduktion des positiven Spaltes auf sehr geringe Weite nicht erlaubt, der Wissenschaft noch wertvolle Dienste leisten.

¹ Ich habe neuerdings mit einem solchen, von der Firma Dr. Steg & Reuter in Hamburg gelieferten negativen Spalt von minimaler Breite gute Erfolge erzielt.