

# Der Fechner-Helmholtz'sche Satz über negative Nachbilder und seine Analogien.

Von

**Wilhelm Wirth.**

(Fortsetzung und Schluss.)

Mit 7 Figuren im Text.

## Die Reaction homogener Farben auf Helligkeits- und Farbennachbilder.

### 1. Einleitung.

1. Der zweite Theil der bisherigen Untersuchung<sup>1)</sup>, der den Betrag der negativen Farbennachbilder, sowohl der reinen, als auch der mit Helligkeitsnachbildern combinirten, in seiner Abhängigkeit von dem Tone, der Sättigung und Helligkeit der reagirenden Farben darzustellen hatte, bedarf vor allem noch nach zwei Seiten hin einer ausführlichen Ergänzung. Da beide Fragen die Verwendung möglichst homogener Farbenreize und somit die nämliche Umgestaltung der gesammten Anordnung erforderlich machten, so sollen sie hier als Nachtrag und werthvolle Controlle für alles Bisherige gemeinsam behandelt werden. Nach der Feststellung der directen Proportionalität des Nachbildwerthes zu der reagirenden Intensität überhaupt blieb zunächst noch eine gewisse Schwierigkeit hinsichtlich des Helligkeitsverhältnisses derjenigen Quantitäten der verschiedenen Farbentöne, welche auf ein gegebenes Nachbild mit dem nämlichen Werthe reagiren, d. h. welche die gleiche Beimischung der ursprünglich fixirten Reize für die entsprechenden Stellen des Sehfeldes ver-

<sup>1)</sup> Philos. Studien XVII, S. 311 ff.

langen, wenn eine subjective Ausgleichung des Nachbildes erfolgen soll. Es war mir bei der Messung der Farbennachbilder auf verschiedenen Reactionsfarben zum ersten Male aufgefallen, dass der gleiche Nachbildwerth nicht einfach denjenigen Reizquantitäten zufällt, welche bei unmittelbarer Vergleichung gleich hell erscheinen. Die hinsichtlich ihres Nachbildwerthes »äquivalente« Helligkeit für reagirendes Roth und Gelb erschien vielmehr bei unmittelbarer Vergleichung größer als diejenige für Grün und Blau. Es fragt sich nun, ob sich diese Abweichungen zwischen »scheinbarer« und »äquivalenter« Helligkeit nur auf Farbennachbilder beziehen, also auf das Maß der Verschiebung von Farbenton und Sättigung nach Fixation von Farbendifferenzen, oder ob die für Farbennachbilder äquivalenten Intensitäten verschiedener Wellenlänge auch für Helligkeitsnachbilder mit gleichen Werthen reagiren, so dass also z. B. nach Fixation von Weiß auf schwarzem Grunde ein hierauf betrachteter blauer Grund zur subjectiven Ausgleichung des Nachbildes mehr von dem Weiß zugemischt erhalten muss, als eine gelbe Fläche von gleicher »scheinbarer« Helligkeit. Sobald das Aequivalenzverhältniss der verschiedenen Wellenlängen einer bestimmten mittleren Intensitätsstufe für die Reaction auf jedes beliebige Farben- oder Helligkeitsnachbild Gültigkeit besitzt, ist u. a. auch mit einem Male der vermeintliche Widerspruch beseitigt, der sich unter der Voraussetzung einer Uebereinstimmung von Aequivalenz und Gleichheit der scheinbaren Helligkeit für Helligkeitsnachbilder aus der Thatsache ergeben hätte, dass das gleichzeitige Helligkeitsnachbild z. B. nach Fixation eines Gelb neben Blau in einem für das Farbennachbild äquivalenten Verhältnisse auf reagirendem Gelb und Blau durch den nämlichen Ueberschuss an Gelb, bezw. Blau ausgeglichen wurde (bezw. zugleich mit dem Farbennachbild verschwand, insofern bei geringeren Differenzen ein Zerfall von Helligkeits- und Farbeneinstellung überhaupt nicht zu beobachten war). Meine früheren Messungen über farbige Helligkeitsnachbilder, welche zunächst einmal die Gültigkeit des Fechner-Helmholtz'schen Satzes überhaupt auch nach dieser Seite hin feststellen sollten, reichten zu einer Entscheidung in dieser Specialfrage nicht aus, da die Versuchsbedingungen im einzelnen für die zunächst noch nicht actuelle Einzelfrage nicht die günstigsten waren. Dies gilt vor allem von

der ersten Gruppe, im ersten Theile der Arbeit <sup>1)</sup>, wo das Nachbild von Grün neben Weiß auf verschiedenen Intensitätsstufen des Weiß gemessen und mit einem Nachbild eines »scheinbar« gleich hellen Grau neben dem nämlichen Weiß verglichen wurden. Allerdings hätte bei idealer Genauigkeit der Messungen der auf gleiches Helligkeitsmaß reducirte Proportionalitätsfactor für das Nachbild von Grün-Weiß ein anderer, und zwar ein kleinerer sein müssen als für Grau-Weiß, wenn die für das Nachbild wirksame Intensität des Grün relativ unterschätzt würde. Denn die wirksame Differenz Grün-Weiß würde in diesem Falle kleiner sein, während die reagirenden Intensitäten die nämlichen bleiben. Indessen ist der relative Unterschied zwischen den das Nachbild bewirkenden Differenzen Grün-Weiß und Grau-Weiß bei einer bestimmten Abweichung der äquivalenten Intensitäten des scheinbar gleich hellen Grau von Grün um so geringer, je dunkler Grau und Grün beide im Verhältniss zu Weiß sind. Dieses Verhältniss betrug nun seinerzeit ca. 1 : 10 und war somit groß genug, um die einzig mögliche Wirkung der in Frage stehenden Abweichung, die bei der Projection auf die nämliche Reactionsfarbe hätte vorhanden sein können, hinreichend zurücktreten zu lassen. Ein besseres Hervortreten einer etwaigen Differenzirung der wirksamen Intensitäten der verschiedenen Farbtöne sollte man allerdings dann erwarten, wenn man die von gleichen scheinbaren Helligkeitsdifferenzen gewonnenen Nachbilder Grün-Weiß, Roth-Weiß u. s. w. nicht auf der nämlichen reagirenden Intensitätsstufe, sondern auf den verschiedenen zu vergleichenden Farbenintensitäten selbst misst. So ist in der ersten Horizontalreihe von Tab. XVI des zweiten Theiles das Nachbild von Grün-Weiß auf Grün, das von Roth-Weiß auf Roth u. s. w. verzeichnet. Hierbei werden aber nun wegen der technischen Einfachheit ebenso wie bei jenem Vergleich Grau-Weiß und Grün-Weiß auf die verschiedenen Farben auch immer wieder andere Nachbilder projicirt, und die Richtung ihrer Unterschiede müsste bei der fraglichen Abweichung offenbar die von der Verschiedenheit der reagirenden Intensitäten abhängigen Differenzen der Nachbildwerthe für die verschiedenen Farben wenigstens theilweise wieder compensiren. Trotzdem scheint gerade diese erste Horizontalreihe noch am ehesten der

1) Philos. Studien XVI, S. 553.

vermutheten Abweichung zwischen den einzelnen Farben zu entsprechen. Im übrigen sollte aber auch diese ganze Versuchsgruppe, wie schon seinerzeit erwähnt, nur zu einer Vergleichung der Mittelwerthe farbiger Helligkeitsnachbilder mit farblosen Verwerthung finden, um zu zeigen, dass die Combination des Helligkeits- mit einem Farbenachbild die nämlichen Helligkeitswerthe ergibt, als wenn überhaupt nur farblose Helligkeitsdifferenzen von gleichem Werthe fixirt wurden. Gerade diese überall vorhandene Verbindung eines Farben- mit einem Helligkeitsnachbild macht aber jene Anordnung für die jetzige Frage wenig geeignet. Wenn der Proportionalitätsfactor der verschiedenen reagirenden Farben für ein Helligkeitsnachbild überhaupt in Frage kommt, so ist ein reines Helligkeitsnachbild vorzuziehen, wie es durch Fixation von Weiß auf schwarzem Grunde entsteht. In diesem Falle muss ja ebenfalls für alle reagirenden Farben eine subjective Ausgleichung des Nachbildes durch Beimischung eines bestimmten Quantums Weiß an der ursprünglich weißen Stelle möglich sein. Es fallen dann die Schwierigkeiten der Einstellung bei der Verbindung mit einem Farbenachbilde hinweg, die gerade für die relativ brauchbarsten Messungen der genannten Tabelle in der ersten und dritten Horizontalreihe, wo das Nachbild auf der Farbe selbst gemessen wird, am störendsten wirken und für eine kleinere Versuchszahl feinere Unterschiede nicht zur Geltung kommen lassen. Bei einem reinen Helligkeitsnachbilde von Weiß neben Schwarz wird aber auch außerdem für alle Messungen das nämliche Nachbild verwendet und dieses ist bei der Vergrößerung der ursprünglich fixirten Helligkeitsdifferenz auch noch ausgeprägter als dasjenige von Weiß-Farbe.

Der wichtigste Gesichtspunkt bei dieser Erwägung der Möglichkeit einer Differenz zwischen der bei Nachbildern wirksamen Intensität und der beim unmittelbaren Vergleich hervortretenden Helligkeit musste jedoch offenbar darin bestehen, das Verhältniss einer etwaigen Abweichung zu der Unterscheidung der reinen und der sog. specifischen Helligkeit von Farben nach der Hering-Hillebrand'schen Definition zu prüfen, welche wenigstens eine Abweichung nach der nämlichen Richtung darstellen würde. War schon im zweiten Theil<sup>1)</sup> darauf hingewiesen worden, dass die quantitativen

<sup>1)</sup> Philos. Studien XVII, S. 424.

Unterschiede dieser Abweichungen für die verschiedenen Farben in unserem Falle viel kleinere seien, so konnte doch immer noch der directe Beweis verlangt werden, dass man die Abhängigkeit der Nachbildwerthe nun thatsächlich für diejenigen reagirenden Farben untersuchte, deren Helligkeit von der specifischen am unabhängigsten erscheine. Es musste also der Untersuchung für eine mittlere Helladaptation, wie sie zunächst zum Vergleiche mit den bisherigen Resultaten nothwendig war, eine solche bei Dunkeladaptation hinzugefügt werden. Da die Dunkeladaptation eine besonders große Verschiebung der Intensitätsverhältnisse für gleich hell erscheinende Farben mit sich bringt und insbesondere die bei Helladaptation relativ stärker reagirende brechbarere Seite des Spektrums zur Herstellung subjectiver Helligkeitsgleichheit ganz unverhältnissmäßig abzuschwächen nöthigt, so würde andererseits eine auch nur annähernde Erhaltung der bei Helladaptation gefundenen Verhältnisse der Nachbildwerthe auf den verschiedenen gleich hellen Farben immerhin die Verwandtschaft der wirksamen Intensitäten mit den »scheinbaren« Helligkeiten und damit den Werth der directen Helligkeitsvergleichen groß genug erscheinen lassen. Insbesondere diese Vergleichung der verschiedenen Adaptationslagen machte aber nun schon für diese erste Gruppe der neuen Versuche die Verwendung möglichst homogener Farben nothwendig, womit dann zugleich ein weiteres Hinderniss, das der Verwerthung jener früheren Versuche für unsere Specialfrage im Wege stand, die mangelnde Differenzirung der verschiedenen Reactionsfarben, aufgehoben wurde.

1a. Es ist ferner selbstverständlich, dass auch nur diese quantitative Bestimmung des Helligkeitsnachbildes auf den verschiedenen Farben selbst und nicht irgendwelche indirecte Bestimmung die Frage des Aequivalenzverhältnisses für die Reaction auf Nachbilder zu lösen vermag. So kann also z. B. auch die Prüfung der Messungen der »scheinbaren« Helligkeit gesättigter Farben durch den Vergleich der unmittelbaren Helligkeitsbestimmung eines aus diesen gesättigten Farben gemischten Grau einerseits mit dem aus den Componenten berechneten Werthe andererseits nicht hinter die Abweichung von äquivalenter und scheinbarer Helligkeit führen. Denn erstens braucht der reagirende Nachbildwerth für das Grau nicht nach der nämlichen

einfachen Mischungsregel aus den Nachbildwerthen für die Componenten ableitbar zu sein; zweitens aber würde wenigstens bei der vermutheten Abweichung des Roth und Gelb einerseits und des Grün und Blau andererseits in entgegengesetzter Richtung sogar diese Berechnung des Nachbildwerthes aus denjenigen der Componenten mit dem für die Mischung unmittelbar gemessenen Nachbildwerth übereinstimmen, da dieser thatsächlich zwischen denjenigen der Complementärfarben in der Mitte liegt.

Selbst wenn man die Martius'sche Methode der indirecten Helligkeitsvergleichung gesättigter Farben verschiedenen Tones anwendet, wonach man nicht die Farben selbst, sondern ihre weniger gesättigten Nachbilder auf einer gleichmäßig grauen Fläche auf ihre Helligkeit hin vergleicht und somit bereits die quantitativen Verhältnisse der Helligkeitsnachbilder selbst bezieht, wird man nicht auch schon a priori behaupten können, die reinen Aequivalenzverhältnisse an Stelle der scheinbaren Helligkeiten aufgefunden zu haben, weil man eben doch noch nicht ein und das nämliche Helligkeitsnachbild auf den verschiedenen Farben selbst durch subjective Ausgleichung gemessen, sondern wiederum Helligkeiten von verschiedenem, wenn auch wenig gesättigtem Farbentone, miteinander unmittelbar verglichen hat. Wenn die äquivalenten Intensitäten der Complementärfarben wirklich in entgegengesetzter Richtung von der scheinbaren Helligkeitsgleichheit abweichen, wird ja die Schätzung des complementären Nachbildes gerade in entgegengesetzter Richtung von der äquivalenten Helligkeit abweichen. Dabei kann die Abweichung von der »scheinbaren« Helligkeitsgleichheit auf Grund der verschiedenen Färbung beider Seiten des Nachbildes durch die Veränderung der absoluten Helligkeit auf Grund des Nachbildes gerade ausgeglichen sein, so dass also wirklich ein äquivalentes Helligkeitsverhältniss im Urbild zur Erzielung der von Martius gesuchten scheinbaren Helligkeitsgleichheit im Nachbilde nothwendig wäre, oder es kann die letztere Gleichheit auch wiederum gerade bei der »scheinbaren« Helligkeitsgleichheit im Urbilde eintreten, oder endlich kann auch ein Mittleres aus beidem zutreffen. Auch hier kann keine Probe durch Mischungen, sondern eben nur die Vergleichung der Werthe mit den beiden anderen in ihrer Weise gewonnenen Werthen entscheiden. Da in dieser Arbeit nur »äquivalente« und »scheinbare« Helligkeiten ver-

glichen werden sollen, sind überhaupt noch keine Messungen nach der Martius'schen Methode ausgeführt worden. Mit dieser Abgrenzung ist natürlich gar nichts gegen die Brauchbarkeit und Feinheit der Methode selbst eingewandt. Die erstere wird wie gesagt bei einer thatsächlichen Abweichung von »scheinbarer« und für Nachbildreactionen »äquivalenter« Helligkeit durch eine Feststellung des Verhältnisses der Werthe nach der Martius'schen Methode zu diesen beiden anderen durch ausdrücklich hierauf bezügliche Versuche vervollständigt werden können. Die Präcision aber hängt nur von der relativen Deutlichkeit und Eindeutigkeit ab, mit welcher sich der specielle dieser Methode zugeordnete Werth aus den benachbarten Helligkeitsstufen heraushebt, und diese sichere Abgrenzung ist durch die bisherigen Versuche von Martius selbst bereits hinreichend dargethan worden.

2. Neben dieser ersten Aufgabe einer Bestimmung der äquivalenten Helligkeitsverhältnisse der verschiedenen möglichst homogen gewählten Farben für Helligkeitsnachbilder bei Hell- und Dunkeladaptation steht aber nun als zweites ungleich schwierigeres Problem der Abschluss der Untersuchung über den Betrag des negativen Farbennachbildes nach »Ermüdung« durch eine homogene Farbe, wenn beliebige andere homogene Farben von einer bestimmten Intensitätsstufe reagiren, also die Ausarbeitung der Analogie zum Fechner-Helmholtz'schen Satze für die Abhängigkeit des farbigen Nachbildes von der reagirenden Wellenlänge. Hier war zunächst erst noch die Vorfrage endgültig zu entscheiden, ob das Farbennachbild auf einem von der Ermüdungsfarbe beliebig verschiedenen Farbentone nur als constante Beimischung existirt oder nach dem Fechner-Helmholtz'schen Satze eine der reagirenden Intensitätsstufe proportionale Verschiebung bedeutet. Es waren also zunächst noch weiterhin verschiedene Intensitäten einer von der Ermüdungsfarbe selbst und ihrem Complementary gleich entfernten Farbe beizuziehen, was bisher nur durch Messung eines Nachbildes von Blau auf verschiedenen Stufen des Roth geschehen war<sup>1)</sup>. Außerdem mussten aber dann auch die Nachbilder ihrem absoluten Werthe nach auf einer bestimmten Intensitätsstufe möglichst vieler homogener

<sup>1)</sup> Philos. Studien XVII, S. 406.

Farben bestimmt werden, um zu entscheiden, ob die vielleicht für die eine oder die andere bei der Ermüdung unbetheiligte Farbe wirklich aufgefundene Befolgung des Fechner-Helmholtz'schen Satzes nicht doch bloß auf zufälligen unvermeidlichen Beimischungen der bei der Ermüdung selbst betheiligten Farbe bzw. ihrer »Gegenfarbe« beruhe, in welchem Falle für eine von der Ermüdungsfarbe und ihrem Complemente gleich weit entfernte Reactionsfarbe ein beträchtlich geringerer Betrag des zur reagirenden Intensität proportionalen Werthes zu erwarten wäre. Hierin berührt sich dieses Problem aber dann auch wiederum mit dem vorigen, das sich auf die äquivalenten Helligkeitsverhältnisse bezog. Es fragt sich nämlich, welche Intensitätsverhältnisse der verschiedenen Wellenlängen für jene Vergleichung des Betrages der farbigen Nachbilder als »äquivalent« zu betrachten sind, und werden sich die entsprechenden Folgerungen auch hier am besten dadurch ergeben, dass für sämtliche reagirende Farben der verschiedenen Wellenlängen wiederum durchweg das nämliche Verhältniss der »scheinbaren« Helligkeitsgleichheit beibehalten wird. Dabei war denn auch diese Frage hinsichtlich des farbigen Nachbildes ebenso für beide Adaptationsarten zu untersuchen.

In einem wesentlichen Punkte musste ich allerdings hinter dem noch im zweiten Theile ausgesprochenen Plane zurückbleiben. Längere Vorversuche, welche sogar die Fortsetzung dieses dritten Theiles einigermaßen mit verzögern halfen, hatten die ursprünglich hergestellte Uebertragung der Versuchsanordnung auf objectiv projecirte Spektralfarben als unzweckmäßig erscheinen lassen, da nicht nur die Ausdehnung der homogenen und gleichmäßig hellen Flächen, sondern auch die Reinheit der einzelnen Stellen bei hinreichender Intensität der Einzelfarben eine zu geringe war. Die subjective Beobachtung war hingegen bei der zeitlichen Ausdehnung solcher Versuche für das Auge allzu angreifend. Demgegenüber kam der große Vortheil in Betracht, den eine beliebige Ausdehnung der gleichmäßig hellen farbigen Flächen und ihre präzise Aneinanderfügung bei Verwendung von Strahlenfiltern vor der elektrischen Projectionslampe darbietet, endlich auch die Leichtigkeit einer entsprechenden, das Auge wenig ermüdenden Anordnung zu objectiver Beobachtung der projecirten Farben. Dabei bewährte sich insbesondere eine Fortbildung der

bisher noch allzu wenig ausgenützten Verwendung von Gelatine-combinationen nach Kirschmann zugleich unter Einbeziehung farbiger Gläser und flüssiger Medien, bei größter Freiheit in der Combination in Folge des Verzichts auf die Aufnahme dieser Objecte in die Episkotister, die in diesem Falle ausschließlich die vom Strahlenfilter bereits gefärbten Lichter abzdämpfen hatten. Die beliebige Auswahl der Stellen des Spektrums ist damit natürlich einigermaßen beschränkt und wird eine solche ohne Verzicht auf die hinreichende Ausdehnung der Farbenfelder überhaupt nur noch von der an sich ja wohl möglichen Uebertragung der Methode auf eine Anordnung mit subjectiv betrachteten Spektralfarben erreicht werden können, welche nach dem hier gebotenen ausführlichen Ueberblick über das gesammte Gebiet speciellere Einzelfragen ohne Ueberanstrengung des Auges wird controlliren können. Die Hauptfrage, die uns hier indessen beschäftigt, ob eine etwaige Einschränkung der dem Fechner-Helmholtz'schen Satze folgenden Farbenverschiebungen auf einen engeren Bezirk um die ermüdende Farbe u. dergl. besteht, sowie die Frage nach den besonderen Reactionsconstanten im Falle einer Ausdehnung über das gesammte Spektrum, muss ja schließlich auch bei der Verwendung beliebiger Stellen innerhalb des Spektrums gelöst werden können, wenn nur diese Stellen weder bei der Ermüdungs- noch bei der Reactionsfarbe im einzelnen nicht über eine zu große Strecke ausgedehnt sind und von den Grund- oder Urfarben, für welche eine gegenseitige Unabhängigkeit in Frage kommen könnte, wenigstens nicht allzu weit abliegen, und wenn diese Farben außerdem noch mit ebenso eng begrenzten Stellen verglichen werden, die von solchen Theorien ausdrücklich als Zwischenfarben anerkannt werden. Eine in dieser Weise über das ganze Spektrum passend vertheilte Reihe ermüdender und reagirender Farben wird die von uns gesuchten Functionen einstweilen hinreichend genau überblicken lassen. Nachdem übrigens der erste Theil dieser zweiten Frage einmal in bestimmtem Sinne beantwortet war, erschien diese ganze Frage der Auswahl bestimmter Stellen des Spektrums in einem ganz anderen Lichte, und handelte es sich neben der oben charakterisirten Auswahl möglichst homogener Farbentöne vor allem nur noch um die genaue Einhaltung bestimmter Intensitätsstufen. Für diese letzteren aber wurden nach Erreichung einer großen Uebung

in der Helligkeitsvergleichung sehr sichere Werthe gewonnen, die auch durch die ganze Arbeit hindurch völlig constant erhalten werden konnten. Dabei kam es weniger auf den absoluten Betrag dieser ein für alle Mal festgehaltenen Intensitätsstufe, als eben auf die sichere Bestimmung des gegenseitigen Verhältnisses an. Bei den früheren Messungen negativer Farbennachbilder, z. B. denjenigen von C. Hess, war stets die Ermüdungsfarbe auf dunklem Grunde fixirt, und dann die reagirende Farbe an der ermüdeten Stelle und ihrer Nachbarschaft dargeboten worden, um die ermüdete und eine unermüdete Stelle miteinander auszugleichen. Wie schon früher erwähnt wurde, war hierdurch natürlich kein reines Farbennachbild, sondern ein aus Helligkeits- und Farbenveränderung combinirtes Nachbild entstanden, während bei meinen eigenen ersten Versuchen reine Farbennachbilder durch Fixation der Farbe neben einem gleich hellen grauen oder andersfarbigen Felde erzeugt worden waren. Besondere Versuche hatten aber gezeigt, dass auch bei der Ausgleichung des Nachbildes, welches von der Farbe auf schwarzem Grunde abgeleitet worden war, im allgemeinen eine einheitliche Helligkeits- und Farbensausgleichung gefunden wurde, wenn das Nachbild auf der Farbe selbst mit ihrer an sich stets nur mittleren Helligkeitsstufe gemessen wurde. Nur bei der Projection auf Weiß war der Zerfall der Helligkeits- und Farbensausgleichung besonders deutlich. Wegen der Einfachheit der Anordnung für die Erzeugung und Messung des Nachbildes von der in dunkler Umgebung betrachteten Farbe wurden daher auch diesmal die farbigen Nachbilder in den meisten Reihen in dieser Weise hergestellt. Dabei entschied die Erwartung, dass z. B. jene in Frage stehende Herabsetzung des Farbennachbildes bei der Reaction der an der Entstehung der Ermüdung zunächst unbetheiligten Farben auch trotz des gleichzeitigen Helligkeitsnachbildes, das natürlich auf jeder beliebig gefärbten Helligkeit proportional ihrer Stärke zur Geltung kommen musste, darin zu Tage treten müsste, dass eben im Gegensatz zu der Messung auf der Ermüdungsfarbe selbst ein deutliches Auseinanderfallen von Helligkeits- und Farbensausgleichung erfolgen müsste. Für die reinen Helligkeitsnachbilder war diese Entstehung ja ohnehin selbstverständlich, da sie ja durch Fixation von Weiß in schwarzer Umgebung abgeleitet werden sollten. Trotzdem wurde die ganze Frage

für die farbigen Nachbilder wenigstens für den einen Haupttheil der Untersuchung bei Helladaptation noch einmal besonders für reine Farbnachbilder abgeleitet, wobei also wiederum in der ganzen Ausdehnung des zur Messung beigezogenen reagirenden Feldes vom Anfang der Fixation an gleiche Helligkeit herrschte, indem die »ermüdende« Farbe mit Grau oder ihrer Complementärfarbe combinirt wurde.

Dass alle Messungen, über welche in diesem abschließenden Theile berichtet ist, ausschließlich von mir selbst ausgeführt wurden, wird nach allem, was ich früher über solche Nachbildbestimmungen ausgeführt habe, kaum als ein Nachtheil der Arbeit betrachtet werden. Wer weiß, dass eine brauchbare Ausführung derartiger Messungen subjectiver Erscheinungen eine fortwährende große Uebung erfordert, wie sie einem Theilnehmer von einigen Wochenstunden noch dazu bei stetigem Uebergang zu neuen Theilen der Arbeit seitens des inzwischen stets weiter arbeitenden Experimentators niemals zur Verfügung steht, wird das Gefühl der Sicherheit niemals durch solche gelegentliche fremde Controllen, sondern nur durch stets erneute eigene Nachprüfung zu steigern suchen, wie denn auch die meisten Versuche einer dreimaligen Durchprüfung mit jeweils vielen Einzelversuchen entstammen. Als gleichwerthige Controlle seitens fremder Personen können daher für derartige Versuche immer nur ebenso ausgedehnte Beobachtungen von einer Person betrachtet werden.

## 2. Die Versuchsanordnung.

Bei der bisherigen Verwendung von rotirenden Gelatinescheiben vor der Projectionslampe konnte die Messung eines Farbnachbildes leicht in der nämlichen reagirenden Intensitätsstufe erfolgen, in welcher das Nachbild selbst entstanden war. Es brauchte hierzu nur die ermüdende und die reagirende Farbe von gleicher Helligkeit in der seinerzeit ausführlich beschriebenen Weise auf verschiedene Sektoren der Scheibe vertheilt zu werden, die am Marbe'schen Rotationsapparate mit einem Episkotister combinirt war, vor dessen constanter Oeffnung je nach ihrer Verdrehung gegen ihn die Farben in verschiedenen Ausdehnungsverhältnissen zu stehen kamen. Sobald jedoch zur Herstellung möglichst homogenfarbiger Medien complicirtere Strahlenfilter zur Verwendung kommen, die nicht mehr

nebeneinander auf dem Rotationsapparat selbst angebracht werden können, vollzieht man die subjective Ausgleichung des Nachbildes auf der neuen reagirenden Farbe am besten in der Weise, dass man über das ganze zur Messung beigezogene Feld die neue reagirende Farbe gleichmäßig vertheilt und zugleich an jeder Stelle den gleichen entsprechend auszuwählenden Bruchtheil der bei der Ermüdung daselbst wirksam gewesenen Farbe, bezw. farblosen Helligkeit superponirt. Wie schon im Anfang und weiteren Verlauf des zweiten Theiles erwähnt wurde, kann ja auf diesem Wege für jede beliebige Ausfüllung des Sehfeldes bei der Entstehung und Entwicklung des Nachbildes (wenigstens innerhalb eines kleineren Feldes und ohne allzu große Abweichungen von der ursprünglichen Intensitätsstufe) eine vollständige Ausgleichung der subjectiven Differenzen erfolgen. Diese Superposition eines durch die Messung selbst erst zu ermittelnden Bruchtheiles der bisherigen Ermüdungsfarben wurde am einfachsten dadurch bewerkstelligt, dass vor die gesammte Lichtquelle für die ermüdende Farbencombination ein Episkotister am Marbe'schen Rotationsapparat gestellt wurde, dessen Sectorenöffnung nach dem Abschluss der Ermüdung und der Projection der reagirenden Farbe auf das ganze Feld unter Festhaltung der Fixation des Auges bis zur subjectiven Ausgleichung des Nachbildes variirt wurde. Wenn die reagirende Intensitätsstufe die ermüdende nur wenig übertrifft, wird diese Ausgleichung des Nachbildes immer mit einer Herabsetzung der ermüdenden Farbe, also mit einer Verminderung der bisherigen Sectorenöffnung des Episkotisters erreicht werden können, wie es in allen unseren Versuchen möglich war. Uebertrifft jedoch die ermüdende Intensität die reagirende zu sehr, so wird eine zu kleine Oeffnung nothwendig, welche die Differenzen unter den verschiedenen Versuchsbedingungen nicht mehr hinreichend hervortreten lässt. Bei der ungefähren Gleichheit der ermüdenden und reagirenden Intensität konnten hinreichend große Sectorenöffnungen zur Ausgleichung des Nachbildes erreicht werden. Der Episkotister bestand aus zwei Kartonscheiben mit je zwei undurchsichtigen Sectoren von  $90^\circ$ . In der Ausgangsstellung des Einstellungshebels am Marbe'schen Apparate deckten sich die undurchsichtigen Sectoren beider Scheiben genau und ließen somit zunächst immer die Hälfte der gesammten Licht-

menge als ermüdende Intensität nach der vom Beobachter fixirten Projectionsfläche hindurchgehen. Zur Erzielung möglichst homogenen Lichtes war aber vor allem auch die möglichst starke und weiße Lichtquelle der elektrischen Bogenlampe nothwendig, welche möglichst viel Glas, Gelatine und Flüssigkeiten mit verschiedenen Absorptionsspektren ohne ein Herabsinken der Lichtstärke unter die gewünschte Intensität möglich machte. Außerdem musste aber sowohl für das ermüdende, wie für das reagirende Licht möglichst viel Freiheit in

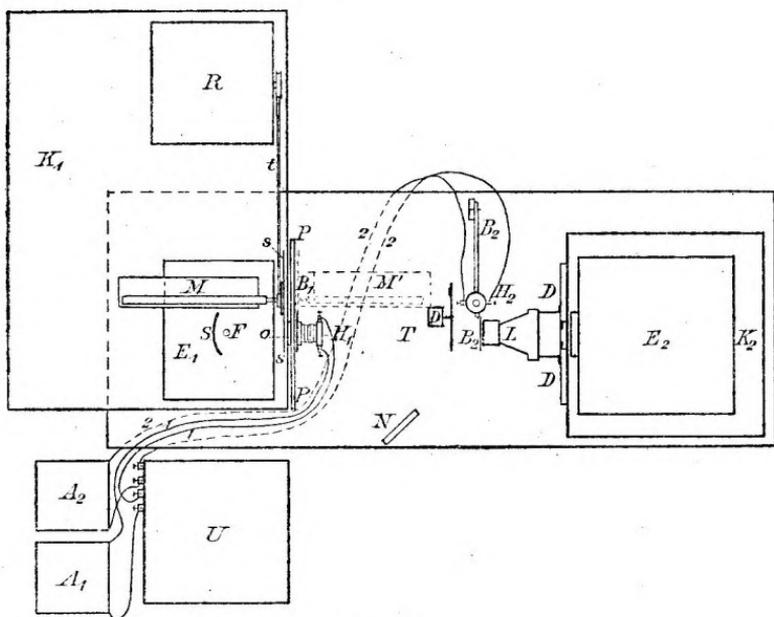


Fig. 1.

der Anordnung der Strahlenfilter erlangt werden und vor allem auch jene zuerst geschilderte Episkotister-Vorrichtung für das ermüdende Licht in bequemster Weise angebracht werden können. Beides wurde am vollkommensten dadurch erreicht, dass für das ermüdende und für das reagirende Licht je eine besondere elektrische Bogenlampe verwendet wurde. Der Grundriss der ganzen Anordnung, Fig. 1, zeigt im Schema mit dem Maßstabe 1 : 20 auf dem Tische *T* die beiden Bogenlampen *E*<sub>1</sub> und *E*<sub>2</sub> je in einem bis auf eine einzige Oeffnung völlig lichtdichten Kasten *K*<sub>1</sub> und *K*<sub>2</sub> verschlossen. Die Differentiallampe *E*<sub>1</sub>, die frei auf ihrer im Grundriss angedeuteten Brettunterlage

stand, wurde für das ermüdende Licht verwendet, die geschlossene Projectionslampe  $E_2$ , die schon in meinen früheren Anordnungen vorkam, für das reagirende. Der Beobachter befand sich an der Kinnstütze  $N$  an der Seite des Tisches  $T$ , und sah nach dem weißen Papierschirm  $PP$ . Auf die dem Beobachter zugekehrte Vorderseite des Schirmes wurde das reagirende Licht aus Lampe  $E_2$  projicirt, das ermüdende Licht schien hingegen von rückwärts durch das Papier von  $PP$  hindurch. Zu diesem Zwecke war das Papier über einen geschwärzten Karton gespannt, in welchen vor der Oeffnung  $o$  des Kastens  $K_1$  ein kleines rechteckiges Fenster von  $2 \times 3$  cm eingeschnitten war, dessen Ränder unmittelbar am weißen Papier auflagen, so dass das durchscheinende Licht mit ganz scharfen Conturen begrenzt war. In der Mitte des linken Randes war ein kleines Kreuz als Fixationsmarke angebracht. Das Fenster befand sich gerade in Augenhöhe des Beobachters. Wie die Figur zeigt, war die Lampe  $E_1$  mit ihrem Lichtbogen in  $F$  möglichst nahe an die Wand ihres Kastens  $K_1$  und den unmittelbar an der Wand anliegenden Schirm herangerückt, um ohne weitere Concentration ihrer Strahlen auf dem Fenster in  $P$  noch hinreichend stark zu leuchten. Doch war auch in dieser geringen Entfernung das kleine Feld ganz gleichmäßig erleuchtet. Vor der Oeffnung  $o$  des Kastens  $K_1$  war ein kleiner Rahmen aus Pappe befestigt, in welchen die Strahlenfilter eingeschoben werden konnten. Dabei kamen für das ermüdende Licht ausschließlich Trockenfilter zur Verwerthung, welche nur einen relativ schmalen Raum einnehmen. Unmittelbar hinter der Oeffnung  $o$  innerhalb des Kastens  $K_1$  rotirten die Scheiben  $ss$  des Episkotisters am Marbe'schen Rotationsapparate  $M$ , der gleich neben den Säulen der Lampe auf einem eigens hierzu ausgeschnittenen Brette angebracht war, damit die Scheibe ohne eine allzu große Ausdehnung die Oeffnung  $o$  vollständig abschließen konnte. Die ganze Vorrichtung war mitsammt der Transmission  $t$  und dem Elektromotor  $R$  zum Betrieb des Episkotisters in den Kasten  $K_1$  aufgenommen, der zu diesem Zwecke besonders groß gewählt und über das Tischbrett von  $T$  hinaus mit einer besonderen Brettunterlage versehen war. Besonders für die Versuche bei Dunkeladaptation war dieser vollkommen lichtdichte Abschluss der ganzen Anordnung bei der Stärke der eingeschlossenen Lichtquelle unerlässlich. Den rückwärtigen Verschluss des Kastens bildete ein gefütterter, völlig

lichtdichter, aber doch leicht zurückschlagbarer Vorhang, der jederzeit im Inneren des Kastens bequem hantiren und die Ablesungen am Episkotister vornehmen ließ. Letztere erfolgten sehr bequem unter der Beleuchtung der Lampe  $E_1$  selbst, die nach rückwärts gegen den Able senden durch den Blechschirm  $S$  abgeblendet war. Die Zügelvorrichtung für die Selbsteinstellung des Marbe'schen Rotationsapparates führte durch möglichst enge und mit Tuch weiterhin abgeblendete Oeffnungen an dem unteren Rande des Kastens heraus nach dem Platze des Beobachters in  $N$ , wo sie durch eine Schraubenvorrichtung in jeder beliebigen Einstellung bequem fixirt werden konnte. An der Vorderseite des Kastens  $K_2$  für das reagirende Licht befand sich zunächst noch vor der äußeren Projectionslinse  $L$ , die ebenfalls durch einen lichtdichten Schacht mit der Oeffnung des Kastens verbunden war, das Diaphragma  $DD$ , dessen rechteckige Oeffnung in allen vier Rändern beliebig verschiebbar war, so dass das Projectionsbild seiner Oeffnung auf dem Schirm  $PP$  ohne sonstige Verschiebung der Apparate innerhalb eines größeren Bezirkes beliebig mit stets genauen Conturen eingestellt werden konnte. Die Strahlenfilter konnten außen vor die Linse  $L$  aufgesetzt werden. Dabei waren hier auch sehr ausgedehnte flüssige Strahlenfilter zu verwerthen, und konnte zur Erzielung eines möglichst homogenen Gelb um die  $D$ -Linie eine Variation des Lippich'schen Strahlenfilters in einem längeren schwarzen Kasten unmittelbar vor der Linse  $L$  angebracht werden. Der projecirte Strahlenkegel konnte bei seiner Concentration in dieser Gegend bei einer Oeffnung dieses Kastens  $5 \times 5$  cm ungehindert und ohne Reflexion an den Seitenwänden der Glaströge sämtliche Medien in einer Ausdehnung von ca. 20 cm passiren. Außerdem konnte vor die ganze Projectionsvorrichtung noch ein besonderer Episkotister  $D$  gestellt werden, welcher die Intensität des reagirenden Lichtes beliebig abzustufen erlaubte. Diese neben ihrer Genauigkeit gleichzeitig bequemste Anordnung, welche zugleich bei Dunkeladaptation benutzt wurde, soll späterhin als Anordnung  $A$  citirt werden. Vor der hier beschriebenen Stellung des Marbe'schen Rotationsapparates innerhalb des Kastens  $K_1$  war derselbe in einer Versuchsgruppe, wo es in der Tabelle besonders angegeben sein wird, vor dem Projectionsschirm  $P$  zur Verwendung gekommen, wobei zugleich für die Lampe  $E_1$  nur ein ganz kleiner

Kasten nöthig war. Der Apparat befand sich dann natürlich in der umgekehrten Stellung, die als  $M^1$  in Fig. 1 schraffirt ist. Dabei war die Scheibe des Episkotisters selbst zugleich Projectionsfläche für das reagirende Licht aus der Lampe  $E_2$ . Die beiden undurchsichtigen Quadrantenscheiben waren mit dem nämlichen weißen Papier überzogen, wie der Schirm  $P$ , vor dem sie bei der Rotation unmittelbar ganz glatt ohne Schatten aufschleiften, und war somit die Stellung des Episkotisters für das reagirende Licht ganz gleichgültig. Dieses wurde stets von einer durchaus weißen Papierfläche reflectirt und kamen die Unebenheiten, die bei ruhendem Episkotister vorhanden gewesen wären, bei seiner Rotation während des ganzen Versuches in Wegfall. Das ermüdende Licht wurde jedoch ebenso wie bei der zuerst beschriebenen Stellung des Episkotisters hinter dem Papierschirm jederzeit der Stellung der Sektoren entsprechend abgedämpft. Hinsichtlich der Reizqualitäten stimmte also diese weiterhin als Anordnung B bezeichnete Vorrichtung mit der vorhin geschilderten vollkommen überein, doch war die Anbringung einer sehr auffälligen (schwarzen) Fixationsmarke auf dem Papierschirme  $P$  nothwendig, die auch noch bei der zur Ausgleichung des Nachbildes vorhandenen Sektorenöffnung hindurchgesehen werden konnte. Außerdem war die reagirende Helligkeit bei Anordnung B um ungefähr ein Drittel derjenigen bei Anordnung A vermehrt, da eine stärker concentrirende Linse mit größerer Oeffnung an Stelle von  $L$  zur Verwendung kam. Das Verhältniss der beiderseitigen mittleren Intensitäten ließ sich aus demjenigen der entsprechenden Nachbildwerthe selbst ermitteln.

Die fortwährend neben den Versuchen zur Controlle parallel gehenden Helligkeitsbestimmungen der reagirenden Farben waren in Anordnung B deshalb nicht auf dem beim Versuche selbst reflectirenden Papiere des rotirenden Episkotisters möglich, weil das auf die rotirende Scheibe projecirte Bild nicht durch hinreichend scharfe Conturen gegen das durchscheinende, zugleich als Photometer dienende Feld abgegrenzt war, wie es ja zwar zur Nachbildmessung bei der Verwendung des reagirenden Feldes in seiner ganzen Breite völlig unnöthig, für die Helligkeitsbestimmungen aber unbedingt erforderlich war. Zu diesen letzteren wurde daher bei dieser Anordnung B ein besonderer, ebenfalls mit Fenster versehener und mit dem nämlichen Papier überzogener Schirm vor die zur Projection verwendete Seite des Rota-

tionsapparates geschoben und der letztere dann wiederum nur als einfacher Episkotister für das variable Vergleichslicht verwendet. Das ermüdende weiße Licht wurde also zugleich als Vergleichslicht gebraucht. Bei der an erster Stelle beschriebenen Anordnung A war hingegen die zum Helligkeitsvergleich nothwendige scharfe Contur zwischen dem projecirten und durchscheinenden Felde ohne irgend eine weitere Abänderung zu erreichen, als dass man die eine Seite des Diaphragmas etwas weiter hineinschob, so dass das Bild eben nicht mehr das Fenster in  $PP$  überdeckte, und an Stelle des Strahlenfilters vor der Lampe  $E_1$  so viel Milchglas einsetzte, dass dieses Vergleichslicht weit genug abgedämpft wurde, um hinreichend große Sectoreneinstellungen am Marbe'schen Apparate für die Herstellung eines der reagirenden Farbe gleich hellen Grau zu ergeben. Es waren dann für die Angleichung sämmtlicher Reactionsfarben an das nämliche Grau die günstigsten Bedingungen für den Vergleich zweier unmittelbar benachbarter Felder gegeben. Und ähnlich konnte umgekehrt zur Schätzung der Intensität des ermüdenden Lichtes verfahren werden. Das gesammte Bild der reagirenden Farbe, welches für die Nachbildmessung beigezogen wurde, war hierbei nicht größer gewählt worden, als dass es das kleine Nachbildfenster bei  $o$  eben überdeckte und nach der linken Seite vom Beobachter aus gerechnet zu einem doppelt so breiten Rechteck ergänzte. Hierdurch war dann vor allem auch für die Helligkeitsbestimmungen der Vortheil erreicht, dass man bei Verwendung des Fensters in  $P$  als Vergleichslicht zunächst keine Herabminderung des Feldes für die reagirende Farbe vorzunehmen brauchte, um die Vergleichung nicht durch ungleiche Größe der Flächen zu erschweren, und dass diese Bestimmungen unter ganz den nämlichen Bedingungen, besonders bei der nämlichen Gesamtausdehnung des gleich hellen Feldes auf dunklem Grunde vorgenommen wurden, wie sie auch für die Nachbildmessung selbst gegeben waren.

Die übrige Einrichtung für eine exacte Abgrenzung der Fixationszeit zur Entstehung des Nachbildes und das gleichzeitige Auftreten der reagirenden Farbe war der im zweiten Theile beschriebenen Anordnung unter Zuhülfenahme des Contactapparates  $U$  mit den Elementen  $A_1$   $A_2$  ganz analog, so dass ich hier nur auf jene früheren Ausführungen zu verweisen brauche. Die Oeffnung des ersten Con-

tactes nach dem vorangegangenen Signal ließ die Blende  $B_1$  vom Magneten  $H_1$  vor dem Schirme  $PP$  herabfallen, so dass das ermüdende Licht sichtbar wurde. Nach Unterbrechung des zweiten Contactes löste sich dann die als einarmiger Hebel drehbare Blende  $B_2$  vom Magneten  $H_2$ , die je nach der Ausdehnung der Strahlenfilter auch weiter von der Linse  $L$  entfernt aufgestellt werden konnte, und ließ das reagirende Licht auf den Schirm  $P$  fallen, womit zugleich ohne weiteres das Signal zur Ausgleichung des Nachbildes gegeben war.

Die ganze Anordnung stand nun im Dunkelzimmer und waren auch alle Theile der Anordnung womöglich schwarz gefärbt, so dass sowohl die verwendeten Farbenreize ausschließlich an den gewünschten Stellen in den gewählten Maßen zur Geltung kamen, als auch wenn nöthig eine vollkommene Dunkeladaptation erreichbar war. Die mittlere Helligkeitsadaptation wurde durch die gewöhnliche Beleuchtung des Zimmers mit elektrischen Glühlampen erreicht, nachdem man sich einige Zeit in dem Zimmer aufgehalten hatte, und wurde während der ganzen Versuchszeit streng festgehalten. Bei Helladaptation war also zugleich eine etwas nach Grünblau hin verschobene Gesamtstimmung des Auges vorhanden. Zwischen je zwei Versuchen einer Reihe waren mindestens 10 Minuten Pause eingehalten und etwaige Reste farbiger Adaptationen durch die reagirenden Farben durch fortwährenden Wechsel derselben innerhalb der Reihe gegenseitig ausgeglichen, was bei der ganzen Versuchsanordnung, die auf möglichst leichte Vertauschbarkeit der Strahlenfilter angelegt war, besonders einfach möglich war. Die ermüdende Farbe wurde hingegen jeweils während einer ganzen Reihe mit dreimaliger Durchprüfung aller reagirenden Farben unverändert beibehalten.

Die Strahlenfilter für die verschiedenen Farben, deren Gelatine-schichten stets zwischen zwei Gläsern in luftdichter Papierumrahmung ausgespannt waren, wurden in ähnlicher Weise combinirt, wie es nun schon mehrfach vom Leipziger Institut aus veröffentlicht wurde. Man kann jedoch bei der Nachahmung solcher Zusammenstellungen niemals einfach wiederum die angegebenen Farben zusammenstellen, sondern muss dieselben wegen der niemals völlig exacten Gleichheit der in den Handel kommenden Gläser und Gelatine von gleicher Bezeichnung jederzeit selbständig bis zur Erzielung der gewünschten Streifen im Spektrum neu combiniren. Deshalb will ich hier nur das

jeweils erreichte Endziel einer jeden Combination in der beim Versuch herrschenden Beleuchtung bei großer Spaltbreite von 9 mm anführen und nur für den zum ersten Male verwendeten Trockenfilter für Gelb noch erwähnen, dass bei ihm vor allem ein blaugrünes Glas und purpurfarbige Gelatine entscheidend war, wobei jenes alle Strahlen des sonst schwer zu beseitigenden äußeren Rothes, dieses aber alles Grün herausnahm. Orange beseitigte vor allem das Blau, während gegen Violett alle Medien zusammenwirkten. Im einzelnen bestand er aus dem

grünen Glas (1 Scheibe),  
1 Lage Purpur-Gelatine,  
4 Lagen Orange-Gelatine,  
2 Lagen Gelbgrün,

so dass der Trockenfilter schließlich einen ganz schmalen Streifen um die *D*-Linie von circa 589 bis 566  $\mu$  Wellenlänge hindurchließ, woran sich auf Seiten des Grüngelb eine im Verhältniss zur Helligkeit des Hauptstreifens sehr dunkle Region bis circa 546  $\mu$  und nach Orange ein schwacher Saum bis nur circa 592 anschloss. Damit war die Variation des Lippich'schen Filters mit einer Flüssigkeitsschicht Kalium-Dichromat von 10 cm, und Urano-Sulfat von 1,5 cm, der übrigens auch bei dieser Dicke der Schichten zu einer auch nur annähernden Erreichung des Trockenfilters noch dessen grünen Glases zur Herausnahme des allerdings sehr schwachen äußersten Rothes bedarf, in dem Hauptspektrum mindestens erreicht. Der ganze Streifen ist auch noch etwas symmetrischer zum reinen Gelb gelagert, in der Gesamtqualität aber von demselben kaum zu unterscheiden. Der Flüssigkeitsfilter für Gelb mit Einschränkung des Spektrums auf circa 589 bis 566  $\mu$  mit dunklen Rändern von circa 604 bis 554  $\mu$  kam nur unter den reagirenden Farben zur Verwendung, weil hier der Trockenfilter wenigstens für die bei Helladaptation verwendete Gesamtintensität etwas zu dunkel war und nur im unmittelbar durchscheinenden Lichte hinter dem Papierschirm *PP* hell genug erschien. Eine Herstellung für größere Helligkeitsstufen wird indessen leicht bei Verwendung eines ganz schwach gefärbten grünen Glases von der hier nothwendigen Art möglich sein, welches allerdings im Handel noch nicht zu haben ist, wie überhaupt gerade diese Sorte bläulich-grünen Glases selten ist. Bei Dunkeladaptation konnte der Trockenfilter

wegen der hier geringeren Gesamttintensität auch als reagirendes Licht Verwendung finden, was die Auswechslung der reagirenden Farben im Dunkeln bedeutend erleichterte. Für die Tabellen und Curven ist weiterhin überall der Kürze halber nur der Mittelwerth der Wellenlängen des gleichmäßig hellen Hauptstreifens angeführt und derselbe für Gelb mit  $578 \mu$  bezeichnet.

Die übrigen Farben wurden nun ebenfalls in 2 Serien einmal als ermüdende und als reagirende Farben hergestellt. Da für die Vergleichung eines und des nämlichen Nachbildes auf den verschiedenen Farben vor allem alle reagirenden Farben von gleicher, nicht zu geringer Helligkeit sein mussten, so wurde hier die Einengung des Absorptionsspektrums zu Gunsten der gleichen Helligkeit eingeschränkt und der Flüssigkeitsstrahlenfilter für Gelb mit je einer Lage Gelb und Grüngelb in Gelatine als Ausgangspunkt genommen. Doch war die Verstärkung der Intensität nur für Blau mit der Hinzunahme eines entlegenen Farbenrestes verbunden, wo ein äußerstes, wenn auch schwaches Roth mitgenommen wurde.

Die reagirenden Farben waren im einzelnen:

- 1) Roth (vom Anfang bis circa  $604 \mu$ ) in den Curven als  $650 \mu$  angegeben.
- 2) Orange circa  $620$  bis  $580 \mu$  (Mitte circa  $600 \mu$ ).
- 3) Gelb (s. o.).
- 4) Grüngelb circa  $554$  bis  $539 \mu$  (vorher von circa  $566$  an dunkler Rand), Mitte circa  $547 \mu$ .
- 5) Grün circa  $530$  bis  $492 \mu$  (Ränder bis  $539$ , bzw.  $480 \mu$ ), Mitte circa  $511 \mu$ .
- 6) Blau (circa  $700$  bis  $662 \mu$  dunkel), außerdem  $500$  bis  $440 \mu$ , Haupthelligkeit  $470$  bis  $450 \mu$ , also Mitte circa  $460 \mu$ .

Für die Helladaptation war die Gleichheit der reagirenden Helligkeiten thatsächlich ohne Hinzunehmen eines Episkotisters ausschließlich durch den Filter selbst erreicht worden, im Nothfalle unter Hinzunehmen farbloser Gläser und Gelatine. Für die Dunkeladaptation wurden die in dieser Weise gewonnenen Filter unverändert verworther und kamen nur noch der Episkotister  $D$  sowie eine oder mehrere Lagen weißen Transparentpapieres in drei Stärken vor der Projectionslampe  $E_2$  hinzu. (Das Papier war natürlich zwischen der

unmittelbar vor dem Bogenlicht befindlichen Linse und dem Diaphragma *DD* angebracht, zur Erhaltung der genauen Conturen im Projectionsbilde auf dem Schirme *PP*.) Es war also der oben genannte Strahlenfilter combinirt bei:

- 1) Roth (ohne Transparenteinlage) mit  $22^\circ$  Sectorenöffnung.
- 2) Orange mit 1 Lage feinem Transparentpapier und  $180^\circ$  Oeffnung.
- 3) Gelb (ohne Transparenteinlage) mit  $32^\circ$  Oeffnung.
- 4) Gelbgrün mit 1 Lage feinem Transparentpapier und  $112^\circ$  Oeffnung.
- 5) Grün mit 1 Lage starkem Transparentpapier ohne Episkotister.
- 6) Blau mit 1 Lage starkem Transparentpapier und  $120^\circ$  Episkotisteröffnung.

Für beide Adaptationslagen kam endlich auch noch ein indifferentes Grau von der nämlichen Helligkeitsstufe als reagirende Helligkeit zur Verwendung. Für die Anordnung zur Helladaptation kam vor die hier größtmögliche Oeffnung des Diaphragmas *DD* eine Milchglasplatte und nach Wegnahme der Linse *L* ein 40 cm langer leerer Kastenschacht mit zwei verstellbaren Diaphragmen auf beiden Seiten. Das am nächsten am Projectionsschirm *PP* gelegene Diaphragma diente zur Einschränkung der Ausdehnung des reagirenden Feldes. Mit dem anderen Diaphragma unmittelbar vor *DD* aber regulirte ich die mit großer Genauigkeit erreichbare Einstellung der Helligkeit, indem von der diffus leuchtenden Milchglasplatte aus je nach der Größe ihrer freigelegten Fläche der Schirm *PP* in verschiedener Stärke gleichmäßig grau beleuchtet wurde. Für Dunkeladaptation wurde jedoch in der gewöhnlichen Anordnung *A* mit der vorderen Linse *L* die richtige Helligkeit des reagirenden Grades einfach mit Hülfe des Episkotisters (mit  $22^\circ$  Oeffnung) gewonnen, nachdem eine dreifache Papierlage noch hinter dem Diaphragma *DD* unmittelbar vor der Oeffnung des Lampenkastens von  $E_2$  eingefügt war.

Für die Ermüdungsfarbe wurde die Einfachheit des Spektrums noch weiter durchgeführt, und deshalb nur annähernde Gleichheit der Helligkeit angestrebt. Die Arbeit sollte ja zunächst nicht etwa über die quantitativen Beziehungen der in verschiedener Weise entstan-

denen Nachbilder eine Entscheidung bringen, sondern nur über das Verhältniss der einzelnen reagirenden Farben zu einem vor allem nur hinsichtlich des Farbtones bestimmten Nachbilde. Dass für den nämlichen Ton der Ermüdungsfarbe die Veränderung von deren Intensität, abgesehen von der Verschiebung der absoluten Nachbildwerthe, das allgemeine Verhältniss zwischen den verschiedenen Reactionsfarben im wesentlichen unverändert lässt, war auch bereits durch besondere Versuche entschieden worden. Eine Herabsetzung der Intensität bei gleichzeitiger Steigerung der Sättigung hatte dabei zugleich den eine absolut geringere Nachwirkung compensirenden Vortheil für die Differenzirung der als Nachbildmaß verwendeten Episkotisteröffnungen, dass die Wirkung hier eine relativ stärkere ist, wie v. Kries schon für die farblosen Helligkeitsnachbilder feststellte. Das Nachbild wurde außerdem hier stets durch eine bestimmte Quantität der fixirten Farbe selbst ausgeglichen und hätte daher auch eine weniger intensive Ermüdungsfarbe sogar schon bei der relativ gleich starken Wirkung die nämliche Episkotisteröffnung beansprucht. Aus diesem Grunde sind auch die absoluten Episkotistergrade für die verschiedenen Ermüdungsfarben im Folgenden nicht ohne weiteres unter sich zu vergleichen, sondern nur die für jede Ermüdungsfarbe bestehenden Verhältnisse der Werthe auf den verschiedenen reagirenden Farben. Gemäß dem Absorptionsspektrum der einzelnen Ermüdungsfarben reicht

- 1) Roth (aus blauem Glas und Gelatine in Roth, Karmin, Violet) vom äußersten Ende des Spektrums bis circa 674  $\mu$ ;
- 2) Gelb (s. o. den Trockenfilter);
- 3) Grün (s. o.);
- 4) Blau von 470 bis 460  $\mu$  mit dunkleren Nebenregionen von circa 484 bis 440  $\mu$  hier also ohne jegliches Roth.

Als farbloser Ermüdungsreiz diente eine Combination von Milchglas sowie complementärer Gelatine aus Roth und Grün. Die Helligkeit betrug ungefähr das dreifache der Helligkeit der reagirenden und deshalb also auch der ermüdenden Farben. Während die Intensität der homogenen Farben überhaupt nicht stärker zu erlangen war, brauchte nicht auch die Messung der reinen Helligkeitsnachbilder auf diese geringe Intensitätsstufe der Ermüdungshelligkeit herabgedrückt zu werden. Zur Helligkeitsgleichheit der letzteren

wurde dieses Weiß vor der Lampe  $E_1$  in der oben beschriebenen Weise zugleich als Photometer verwendet und waren alle Reactionsfarben (nach der Helligkeit des flüssigen Strahlenfilters für Gelb) auf  $66^\circ$  Episkotisteröffnung vor dieser farblosen Helligkeit abgestimmt, welche mit der während der Fixationszeit vorhandenen Episkotisteröffnung von  $180^\circ$  (s. o. S. 576) als farbloser Ermüdungsreiz fixirt wurde. Für Dunkeladaptation wurde die nur mit einer Lage Transparentpapier abgedämpfte Helligkeit des reagirenden Grün als Norm festgehalten und entsprach dieselbe nur einer Episkotisteröffnung von  $48^\circ$  vor demjenigen Lichte, die bei Dunkeladaptation als farblose ermüdende Helligkeit verwendet wurde. Letztere war also hier beinahe das vierfache der reagirenden Helligkeit. Die homogenen Ermüdungsreize mussten natürlich den verändernden Adaptationsbedingungen ebenfalls angepasst werden. Roth und Gelb kam dabei ganz in der nämlichen objectiven Intensität zur Verwendung wie bei Helladaptation. Für Grün und Blau musste hingegen die Beleuchtung zur Wiederherstellung annähernder Helligkeitsgleichheit durch Einlagen bedeutend herabgesetzt werden.

Diese Verhältnisse gelten nun nicht nur für die Fixation einer einzigen Ermüdungsfarbe auf dunklem Grunde, sondern auch für die Combination der Farbe mit einem gleich hellen Grau, sowie der Farbenpaare Roth-Grün und Gelb-Blau, welche letztere wenigstens für Helladaptation beigezogen wurden. Nur musste in diesen Farbenpaaren zur Erzielung der Helligkeitsgleichheit für Blau und Grün wiederum etwas von der Einengung des Spektrums preisgegeben werden. Das Grau wurde auch hier durch Verbindung von Milchglas mit complementärfarbigem Gelatinen und Transparentpapier hergestellt. Auch wurde der Genauigkeit in der gegenseitigen Abgrenzung der benachbarten Felder des Ermüdungsfeldes eine besondere Sorgfalt gewidmet. Gleichzeitig war durch Vergrößerung des transparenten Fensters im Papierschirm  $PP$  eine Ausdehnung der Ermüdungsfläche auf 3,5 cm vorgenommen, wovon jeder der combinirten Farben je die Hälfte zugetheilt war. Der Fixationspunkt befand sich mitten auf der Grenze. Durch entsprechende Einstellung des Diaphragmas  $DD$  wurde zugleich die reagirende Farbe ganz genau der ermüdenden Farbenfläche angepasst, sodass die Gleichheitseinstellung das Bild einer vollständigen gleichmäßig gefärbten reagirenden Fläche auf dunklem

Grunde ergab. Die Nachwirkung eines möglichst homogenen Blau neben Grau war bei der Dunkelheit des Filters zu schwach, um auf der einmal gewählten Intensitätsstufe eine genauere Messung zuzulassen. Da diese Versuche überhaupt nur zur Controlle jener einfacheren nach einer Fixation einer einzigen Farbe auf Schwarz vorgenommen wurden und in den ungefähr feststellbaren Werthen die nämliche Richtung der Abweichung zwischen den verschiedenen reagirenden Farben zu erkennen war, wurde eine erneute Ableitung unter Aenderung aller Intensitätsverhältnisse der verschiedenen Farben, welche man natürlich nicht einfach durch die nämlichen Episkotistergrade erreichen kann, nicht mehr für nöthig erachtet.

Nach den früheren Ausführungen über die specielle Methode der subjectiven Ausgleichung des entstandenen Nachbildes braucht auch kaum etwas Neues zur Vertheidigung dafür angeführt zu werden, dass in allen hier angeführten Versuchen nicht die zwar zu etwas größeren Werthen führende, aber ungleich zeitraubendere Methode der plötzlichen mechanischen Einstellung, sondern die einfache Selbsteinstellung angewandt wurde, deren Resultat unter sonst gleichen Bedingungen zwar nicht die absoluten Werthe im ersten Moment nach Abschluss der Ermüdungszeit wiedergeben, aber doch die für die verschiedenen reagirenden Farben vorhandenen Abweichungsrichtungen mit hinreichender Treue erkennen lassen. Auf die letzteren kam es mir ja bei diesen Fragestellungen zunächst ganz allein an. Indessen wurden wenigstens die verschiedenen Neigungen, die für die einfache Selbsteinstellung bestehen können, nämlich die Einstellung auf die oberste und unterste Unterschiedsschwelle neben der ohne besondere Absicht einfach auf subjective Gleichheit überhaupt abzielenden Einstellung in kritischen Fällen besonders zu compensiren gesucht, wobei dann in der einen Reihe ausdrücklich die obere, in der andern ausdrücklich die untere Schwelle gesucht wurde, d. h. die nach Erreichung einer entgegengesetzten Differenz zur subjectiven Gleichheit eben zurückkehrende Einstellung. Der Einfachheit halber ist in diesen Fällen in den folgenden Tabellen einfach das arithmetische Mittel verrechnet worden, da die Differenzen beider Einstellungen im Verhältniss zum Gesamtwertb stets nur verschwindende Bruchtheile ausmachten. Jedenfalls wird aber die ganze Gewinnung von Differenzen der Nachbildwerthe auf den ver-

schiedenen reagirenden Farben von der Frage der Unterschiedschwelle vollkommen unabhängig, sofern nicht etwa, wegen der hierdurch bedingten Leichtigkeit der Einstellung überhaupt, in mittelbarer Weise die Größe des gemessenen Werthes mitbestimmt ist. Für die Unterstützung bei den Versuchen mit Dunkeladaptation, in denen ich die Bedienung des Apparates nicht selbst übernehmen konnte, bin ich Herrn Dr. Dürr und Herrn Dr. Churchill zu Danke verpflichtet.

### 3. Die Resultate.

#### A. Farblose Helligkeitsnachbilder.

Nach der vorläufigen Trennung der beiden Fragestellungen in der Einleitung sollen auch hier die Messungen des farblosen Helligkeitsnachbildes auf den reagirenden Reizen von verschiedener Wellenlänge und gleicher Helligkeit zuerst betrachtet werden. Die Curve für das reine Helligkeitsnachbild in seiner Abhängigkeit von der reagirenden Wellenlänge ist jedoch der Einfachheit halber jedesmal sogleich in die graphische Darstellung der unter sonst gleichen Bedingungen abgeleiteten farbigen Nachbilder eingefügt. In einer Versuchsreihe nach Anordnung A wurde das oben beschriebene weiße Feld auf schwarzem Grunde als einzige Helligkeit in dem sonst völlig dunklen Raume sogleich nach Ausschaltung der gewöhnlichen Zimmerbeleuchtung, also nach mittlerer Helladaptation 5 Sekunden lang fixirt, ein Zeitmaß, welches für sämtliche Versuche dieser Arbeit einheitlich festgehalten und in der früher beschriebenen Weise vom Contactapparat exact abgegrenzt wurde. Die folgende Tabelle zeigt die Werthe für die vier reagirenden Hauptfarben von den in Capitel 2 angegebenen Wellenlängen in Graden der Episkotisteröffnung vor der ermüdenden farblosen Helligkeit, welche zur reagirenden Farbe für die subjective Ausgleichung des Nachbildes noch hinzuzufügen war.

Tabelle I (Helladaptation).

Anordnung A. Weiß auf schwarzem Grunde fixirt, Projection des Nachbildes auf Farben.

Bezeichnung der reagirenden Farbe	Roth	Gelb (flüss. Filt.)	Grün	Blau
Werth des farblosen Helligkeitsnachbildes	40,6 (m. V. 5,8)	26,6 (m. V. 2,2)	42 (m. V. 4)	43,6 (m. V. 1,6)

Diese Werthe nach Anordnung A stimmen nun mit den folgenden aufs beste überein, welche unter sonst ganz gleichen Bedingungen mit der Variation der Anordnung B (vergl. Capitel 2) zugleich unter Hinzunahme zweier Uebergangsfarben und der nämlichen farblosen reagirenden Helligkeit abgeleitet wurden, und zwar unter den nämlichen Bedingungen wie die Werthe für die verschiedenen Farbenachbilder. Die Maße nach Tabelle II sind deshalb zugleich in die Fig. 2 in der links vorne mit *W* bezeichneten Curve mit aufgenommen.

Tabelle II.

Anordnung B, größere Helligkeit der reagirenden Farben.

Bezeichnung der reagirenden Farbe	Roth	Orange	Gelb (fl. F.)	Gelbgrün	Grün	Blau	Grau
Werth des farblosen Helligkeitsnachbildes	68,6 (m. V. 7)	40,4 (m. V. 3,4)	39,0 (m. V. 0,5)	45,0 (m. V. 3)	61,2 (m. V. 3,2)	71 (m. V. 8,2)	40,4 (m. V. 0,25)

Etwas kleinere Differenzen des Proportionalitätsfactors traten in einer Reihe bei viel geringerer reagirender Helligkeit hervor, die anfangs bei einer viel weiteren Entfernung der Lampe  $E_2$  vom Schirme  $PP$  von der nämlichen ermüdenden Helligkeit für die vier Hauptfarben unter besonderer Herstellung der Helligkeitsgleichheit aller Farben erlangt wurde, wie schon aus dem Verhältniss der mittleren Nachbilder zu ersehen ist, ungefähr den vierten Theil der

sonst verwendeten Helligkeit besaß. Da jedoch wenigstens im allgemeinen die Richtungen der Abweichungen zwischen den verschiedenen vier Farben übereinstimmen, die absoluten Werthe jener Proportionalitätsfactoren in jenen ersten beiden Tabellen aber einstweilen doch nur approximativ gültig erscheinen können, so glaube ich die folgende Tabelle S. 590 als ziemlich gleichwerthig betrachten zu können.

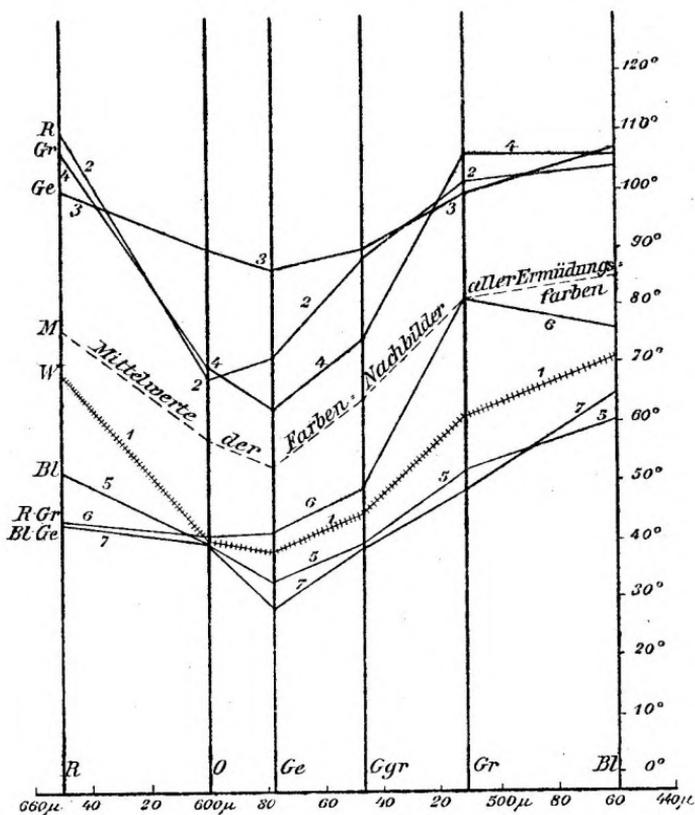


Fig. 2.

Diese Resultate zeigen nun einstweilen für die gewählte Helladaptation mit aller Deutlichkeit, dass thatsächlich eine Abweichung zwischen der »scheinbaren« und »äquivalenten« Helligkeit in dem in der Einleitung dargelegten Sinne besteht, da gleich hell erscheinende Farben mit verschiedenen großen Nachbildwerthen reagiren. Außerdem stimmt aber auch die Richtung der gefundenen Abweichung insofern mit der bereits früher

Tabelle III (Helladaptation).

Anordnung B. Farbloses Helligkeitsnachbild wie in Tabelle II, Intensität der reagirenden Farben auf ca.  $\frac{1}{4}$  herabgesetzt.

Bezeichnung der reagirenden Farbe	Roth	Gelb	Grün	Blau
Werth des farblosen Helligkeitsnachbildes	20 (m. V. 0)	15,2 (m. V. 2,2)	18 (m. V. 1,2)	21 (m. V. 1,5)

für die Farbennachbilder abgeleiteten Differenz überein, als hier wie dort für Gelb ein geringerer Proportionalitätsfactor besteht als für Blau und Grün. Indessen reagirt hier Gelb überhaupt mit dem relativ geringsten Werthe. Das am wenigsten brechbare Ende des Spektrums zeigt hingegen schon wiederum eine bedeutende Steigerung des Factors, der sich sogar mit demjenigen für Grün einigermaßen die Wage hält. Der für die Reaction auf Nachbilder äquivalente Helligkeitswerth ist also hiernach für das reine Roth ungefähr demjenigen von Grün gleich, während Blau und Gelb zwei hiervon etwa gleich abweichende Extreme bilden. Dieses Ergebniss scheint nun zunächst von dem Verhältnisse abzuweichen, das sich auf Grund der früheren Versuche über farbige Nachbilder für die Vergleichung von reagirendem Roth und Grün ergeben hatte. Indessen ist hier vielleicht zu berücksichtigen, dass die ehemalige Verwendung der einfachen oder doppelten Gelatinelagen in der roth aussehenden Farbe die seinerzeit viel höhere Intensitätsstufe fast ganz auf Kosten des noch durchgelassenen Orange und Gelb steigerte, für welche gerade hier mit den homogenen Filtern der relativ geringste Nachbildwerth festgestellt wurde, während die grün aussehende Gelatine vor allem zugleich die blauen Strahlen passiren lässt. Ein sicheres Urtheil über das Verhältniss zu den entsprechenden Resultaten über Farbnachbilder wird sich aber jedenfalls aus den später beschriebenen Versuchen mit homogenen Filtern ergeben, denen gegenüber sich dann die Erklärung etwaiger Abweichungen bei nicht homogenen Farben stets als eine ganz secundäre Frage erweist. Dass die gelbe Farbe

indessen auch schon in den früheren Versuchen ohne Verwendung einer homogenen Combination mit relativ geringen Werthen reagirte, stimmt damit überein, dass hier das Gelb auch innerhalb des gesammten Absorptionsspektrums den Hauptbeitrag zur Gesammtintensität leistet. Für diese Erklärung der früheren Resultate wäre dann freilich überall schon als wahrscheinlich vorausgesetzt, dass der Nachbildwerth für eine Mischung aus denjenigen für die Componenten ableitbar sei oder den je nach der scheinbaren Helligkeit der Componenten berechneten Werthen wenigstens nahe stehe, worüber hinreichende Versuche noch nicht vorliegen. Die Zwischenfarben Orange und Grüngelb zeigen eine zwar geringe, aber doch mit der aus der Nachbarschaft zu erwartenden Richtung übereinstimmende Veränderung des Werthes im Vergleich mit Gelb, und zwar Grüngelb noch deutlicher als Orange, wie es mit der am besten aus der Fig. 2 ersichtlichen Lage beider Farben im Spektrum gut zusammenpasst.

Auffällig ist auch der relativ geringe Werth des Grau im Gegensatz zu den Farben. Bei Helladaptation trägt nun zwar thatsächlich der Theil des Spektrums von Orange bis Gelbgrün mit seinem geringen Aequivalenzwerth ganz besonders zur Gesammtintensität des Grau bei. Indessen könnte dies doch von dem relativ größeren Werthe für die brechbareren Strahlen wieder ausgeglichen werden. Außerdem wäre vielleicht auch noch an die verschiedenen Einstellungsbedingungen zu denken, da ja Grau als empfindlichste Farbe auch am schwersten als ausgeglichen erscheinen wird. Daneben bestünde noch die Möglichkeit, dass die relative Sättigung rein als solche gleichzeitig einen gewissen Einfluss auf die Größe des Werthes ausüben könnte. Dies liegt deshalb besonders nahe, weil die ganze Reihe der Aequivalenzwerthe, wie früher hervorgehoben wurde, zu derjenigen der Sättigungswerthe, wie sie in der Farbentafel dargestellt werden, in einer gewissen Beziehung steht. Es käme also dann für den Aequivalenzwerth einer Mischung nicht bloß auf die Werthe der Componenten an, weil ja dann Grau stets eine mittlere Stellung einnehmen müsste, sondern noch einmal besonders auf die resultirende Sättigung. Nur wenn die Sättigung nicht erheblich beeinträchtigt wird, wie bei der Mischung der unmittelbar benachbarten Theile des Spektrums im Strahlenfilter, können einfach die Aequivalenzwerthe der Componenten verrechnet werden, wie es

oben beim Vergleich der Resultate mit den früheren und den jetzigen Gelatinecombinationen geschah. Auch bleiben die Componenten selbst unter allen Umständen insofern von primärer Bedeutung, als ja Grau sonst überhaupt den relativ geringsten Werth besitzen müsste, wenn die resultirende Sättigung als solche bei gleicher Helligkeit dem Aequivalenzwerth proportional wäre. Doch wären für diese Frage noch weitere Untersuchungen zu den meinigen hinzuzufügen. Unten kommen wir übrigens nochmals auf diese Frage zurück. Das wichtigste Resultat dieser Versuche bleibt also einstweilen erst noch das eine, dass trotz gleicher »scheinbarer« Helligkeit Differenzen der Werthe für reine Helligkeitsnachbilder überhaupt existiren und eine hinreichend deutliche Regelmäßigkeit derselben festgestellt werden kann.

1a. Besonders werthvoll ist aber nun die Vergleichung der bisherigen Resultate mit denjenigen, die nach Einführung vollkommener Dunkeladaptation (20 Minuten Adaptationszeit) für die unter diesen neuen Bedingungen gleich hell erscheinenden Reactionsfarben abgeleitet wurden. Die Zahlen sind aus der folgenden Tabelle zu ersehen, die graphische Darstellung ist in Fig. 3 unter den Curven für die farbigen Nachbilder bei Dunkeladaptation als Curve 1 mit der Bezeichnung *W* links vorne zu finden.

Tabelle IV (Dunkeladaptation).

Weiß auf schwarzem Grunde 5" fixirt. Gleiche Helligkeit der reagirenden Farben für Dunkeladaptation.

Bezeichnung der reagirenden Farben	Roth	Orange	Gelb (Trocken-Filter)	Gelbgrün	Grün	Blau	Grau
Werth des farblosen Helligkeitsnachbildes	20 (m. V. 2)	20,2 (m. V. 3)	22 (m. V. 4)	24,4 (m. V. 4,4)	39,8 (m. V. 6,8)	39,8 (m. V. 4,6)	28 (m. V. 2,6)

Die Differenzen der Nachbildwerthe zwischen den bei dieser Adaptationslage gleich hell erscheinenden Reactionsfarben sind also nicht etwa kleiner geworden oder gar ganz verschwunden, wie es unter Umständen von der Anschauung aus erwartet werden könnte,

dass gerade bei Dunkeladaptation die gleich wirksamen Helligkeitswerthe der Farben möglichst exact auch schon im unmittelbaren Vergleich zur Geltung kommen würden. Der allgemeine Charakter der Curve mit ihren kräftigen Niveauunterschieden ist vielmehr vollkommen erhalten geblieben. Das Maximum scheint das Minimum sogar eher noch etwas mehr zu übertreffen als bei Helladaptation. Dabei ist die Sättigung sämtlicher Farben so viel herabgesetzt, dass die Helligkeitsvergleichung der Farben mit Grau mit besonderer Leichtigkeit vor sich gehen konnte. Auch wurden hier die Farben bei der

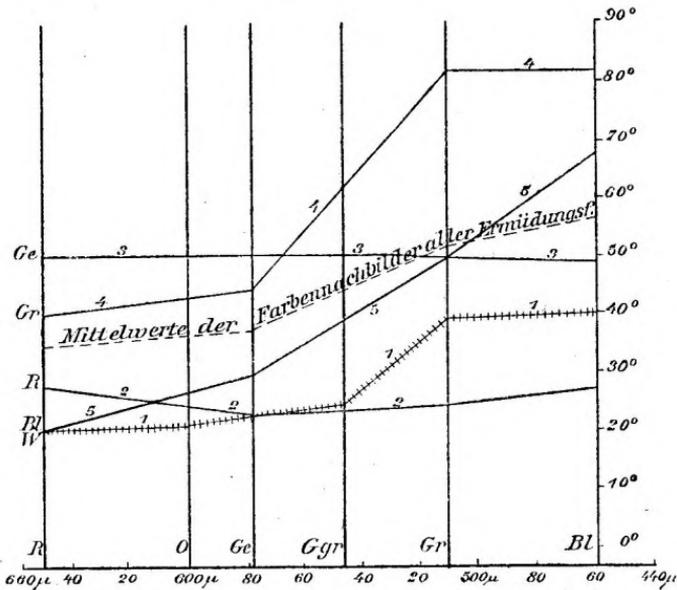


Fig. 3.

Bestimmung ihrer Helligkeit niemals länger als ein paar Secunden betrachtet und das Auge dann erst circa  $\frac{1}{4}$  Minute erholt, auch war die Helligkeit der Farben unter den in Cap. 2 näher angegebenen Bedingungen eine so geringe, dass aus all diesen Gründen auch nicht etwa die Dunkeladaptation während der Vergleichung aufgehoben werden konnte. Die sicherste Controlle für die richtige Einhaltung der Adaptation war ja der außerordentliche Unterschied zwischen den objectiven Intensitätsverhältnissen im Vergleich zur Dunkeladaptation, wie er das charakteristische Merkmal der verschiedenen Stimmungen ausmacht, und außer dieser objectiven quan-

titativen Controlle die Annäherung sämmtlicher Farben an eine fast vollkommen farblose Helligkeit. Die Einstellung auf subjective Gleichheit nach Entstehung des Nachbildes war wegen dieser minimalen Sättigung aller homogenen Farben ebenfalls für sämmtliche Farben viel einheitlicher und durch eine sehr geringe Unterschiedschwelle verfeinert. Andererseits erzwingt auch wiederum die geringere centrale Sehschärfe größere Vorsicht bei der Ausgleichung.

Die wesentlichste Abweichung von den Resultaten bei Helladaptation besteht aber nun darin, dass hier reagirendes Rot den relativ geringsten Werth aufzeigt, und somit noch etwas unter Gelb herabgedrückt ist, während es seinerzeit bei den höheren Intensitäten in Helladaptation sogar nahe an Blau herangerückt war. Dass hier bei Dunkeladaptation keine zufälligen Abweichungen vorliegen, erhellt dabei gleichzeitig aus der entsprechenden Verschiebung der Uebergangsfarbe Orange, welche nun ihrerseits bereits ebenfalls einen etwas geringeren Werth wie Gelb besitzt, während Gelbgrün das Steigen nach Grün hin anzeigt. Auffällig ist ferner auch, dass Grün nun vollständig zum Blau hinaufgerückt ist. Zur Erklärung hiervon ist zunächst zu berücksichtigen, dass der Charakter des Farbenfilters bei seinem z. B. gerade für Grün nach der brechbareren Seite hin weniger eingeengten Absorptionsspektrum hinsichtlich seiner Bedeutung für Dunkeladaptation nicht allein nach der einzigen seiner Gesamtfärbung entsprechenden Linie innerhalb des Spektrums beurtheilt werden darf, sondern nach dem Verhältniss der einzelnen Theile innerhalb der ganzen Breite des Spektrums. Es wird also z. B. wegen der besonderen relativen Helligkeitssteigerung der bläulicheren Theile des Grün auch schon um deswillen ein engerer Anschluss des Grünwerthes an den Blauwerth zu erwarten sein. Das Blau seinerseits repräsentirt hingegen mit den in ihm vor allem vertretenen Strahlen schon an sich das thatsächliche Maximum des Werthes, so dass die Dunkeladaptation mit Steigerung der Helligkeit dieser Hauptbestandtheile keine Verschiebung des Werthes mehr herbeiführen kann. In ähnlicher Weise werden aber nun auch alle anderen weniger brechbaren Farben einen ähnlichen Nachbildwerth erhalten wie die nach der brechbareren Seite hin unmittelbar benachbarten Farben, falls nur der Aequivalenzwerth einer jeden homogenen Farbe zu der scheinbaren, je nach der Adaptation relativ verschiedenen

Helligkeit in einem festen Verhältniss steht und der Nachbildwerth der Mischung, also auch der resultirenden Farbe des Filters, wie oben erwähnt, aus den Aequivalenzwerthen der Componenten berechnet werden kann. In dem Absorptionsstreifen für Gelb werden die grünlichen, in denen für Orange und Roth die gelblichen Theile in ihrem Antheile an dem gesammten constant erhaltenen Maß der »scheinbaren« Helligkeit relativ gesteigert werden. Diese Verhältnisse lassen also gerade bei einer eindeutigen Größenbeziehung zwischen Aequivalenzwerth und scheinbarer Helligkeit einen etwas verschiedenen Verlauf der Curve für Hell- und Dunkeladaptation erwarten, sobald nicht mit ideal homogenen Farben aus einer einzigen Linie des Spektrums gearbeitet wird. Abgesehen von diesen Verschiebungen des »scheinbaren« Helligkeitsantheiles der verschiedenen homogenen Farben an der resultirenden Farbe des Strahlenfilters je nach der Adaptationslage wären dann natürlich auch noch gewisse Farbentonänderungen zu berücksichtigen, welche den einzelnen homogenen Reizwirkungen selbst je nach der Adaptation widerfahren, da ja doch eine wirklich vom Farbenton abhängige Charakterisirung des Aequivalenzwerthes sich jederzeit nach der subjectiven Farbenwirkung richten muss. Bei der einstweilen erreichten Genauigkeit der Messungen dürfte indessen eine detaillirte Ausdeutung kleiner Differenzen der beiden Reihen in diesem Sinne noch verfrüht erscheinen. Es genügt zunächst die Feststellung, dass die Resultate für Dunkeladaptation mit den anderen hinreichend übereinstimmen, um die oben näher bezeichnete Reihenfolge der subjectiven Farbentöne hinsichtlich ihres Aequivalenzwerthes als von der Adaptation im allgemeinen unabhängig erscheinen zu lassen. Auch die Stellung des Grau zu den reagirenden Farben ist etwas verändert. Sein Nachbildwerth liegt zwar immer noch in der unteren Hälfte der ganzen Reihe, er ist jedoch bedeutend mehr in die Mitte gerückt. Dies stimmt aber mit den verändernden Sättigungsverhältnissen bei der neuen Adaptationslage ebenfalls überein. Wenn die Herabsetzung der Sättigung wirklich eine Verminderung des Aequivalenzwerthes der Mischung herbeiführt, wird Grau auch hier zwar zu den geringeren Werthen gehören müssen, insofern die Sättigung der übrigen Farben doch noch nicht ganz auf Null reducirt ist. Es ist indessen doch nur eine minimale Sättigung der übrigen Reactionsfarben vor-

handen, welche auch für Grau den gemäß seinen Farbencomponenten vorhandenen Aequivalenzwerth viel reiner zu Tage treten lässt, der an und für sich schon nach dem oben Gesagten eine mittlere Stellung herbeiführt. Diese Erklärung des scheinbaren Widerspruchs zu den früheren Resultaten über Grau gilt übrigens auf Grund der veränderten Sättigungsverhältnisse überhaupt, gleichgültig ob dieselben den Nachbildwerth an sich herabsetzen, wie es wahrscheinlich der Fall ist, oder nur durch die Veränderung der subjectiven Einstellungsbedingungen die Lage verändern. Auch in letzterer Hinsicht wäre dann Grau in Dunkeladaptation den übrigen Farben ungefähr gleich gestellt.

Neben all diesen speciellen Abweichungen zwischen den verschiedenen Farben, welche durch Vermehrung der Versuche mit immer homogeneren Farben und immer größerer Steigerung der Uebung in der Helligkeitsbestimmung dieser Farben vielleicht noch mannigfache Correcturen erfahren mögen, hebt sich sonach als Hauptresultat die Thatsache heraus, dass die in der unmittelbaren Vergleichung gemessene scheinbare Helligkeit der reagirenden Farben sich wirklich in einer festen Beziehung zu dem außerdem noch vom Farbenton mitbestimmten Nachbildwerthe steht, und zwar im wesentlichen wenigstens unabhängig von der Adaptationslage. Die relativ beste Uebereinstimmung der äquivalenten und scheinbaren Helligkeit aber scheint eher noch für eine mittlere Helladaptation als für Dunkeladaptation vorhanden zu sein, weil hier die Abweichungen zwischen den gleich hell erscheinenden Farben am geringsten sind.

### B. Nachbilder homogener Farben.

1) Die erste Hauptfrage auf diesem Gebiete bezog sich, wie schon im zweiten Theil der Einleitung ausgeführt wurde, auf die Abhängigkeit des Nachbildwerthes von der Intensität solcher reagirender Farben, welche nicht nur der ermüdenden Farbe selbst, sondern auch deren Complementärfarbe ferne liegen. Diese letztere bedeutet ja z. B. nach der Hering'schen Theorie einen Vorgang in dem nämlichen Substrate wie die ermüdende Farbe selbst und müsste man also für sie als Reactionsfarbe schon von dieser Theorie aus sicher eine Befolgung des Fechner-Helmholtz'schen Satzes erwarten, wie

es in den früheren Versuchen bereits als sicher nachgewiesen wurde. Nachdem auch für die Untersuchung der von der Ermüdungsfarbe und ihren Complementen gleich fernliegenden Reactionsfarben wenigstens das reine Farbnachbild eines blauen neben einem gleich hellen Grau gesehenen Gemisches auf reagirendem homogenem Roth von verschiedener Intensität gemessen worden war, soll hier das Nachbild von homogenem Roth neben gleich hellem Grau und dasjenige von homogenem Grün neben Grau auf verschiedenen Intensitätsstufen eines homogenen Gelb gemessen werden. Die vier benutzten Intensitätsstufen werden dabei durch völlige Dunkelheit und Abdämpfung des Flüssigkeitsfilters durch einen Episkotister von der Oeffnung 90° und 180° und den überhaupt nicht verdunkelten Filter des Gelb dargestellt. Außerdem besitzen auch die in den verschiedenen Reihen neben Grau fixirten Ermüdungsfarben Roth und Grün, welche zu diesem Zwecke besonders hergestellt waren, genau die nämliche Helligkeit, so dass hier auch die beiden Reihen für ermüdendes Roth und Gelb unmittelbar miteinander verglichen werden können. In Fig. 4 sind auch die zugehörigen Curven zusammengestellt, welche der folgenden Tabelle V entnommen sind. Die Projection des Nachbildes auf Gelb hatte noch den besonderen Vortheil, dass Gelb trotz seines relativ geringsten

Tabelle V (Helladaptation).

Anordnung A. 5" Fixation von Roth bzw. Grün neben Grau von gleicher Helligkeit in dunkler Umgebung. Messung des Nachbildes auf vier Intensitätsstufen des Gelb.

Bezeichnung der Intensitätsstufe des reagirenden Gelb	0°	90°	180°	360°
Nachbildwerthe nach Fixation von Roth neben Grau	ca. 2 (m. V. 0)	12,6 (m. V. 2,2)	22 (m. V. 0)	40,4 (m. V. 6,4)
Nachbildwerthe nach Fixation von Grün neben Grau	ca. 5 (m. V. 0)	8 (m. V. 0)	18,6 (m. V. 1,8)	32,4 (m. V. 4,4)

Nachbildwerthes unter allen Farben auch in höheren Intensitätsstufen kleine Beimischungen erkennen lässt, wie sie aus den an sich schwächeren Nachbildern von der Farbe neben Grau resultiren. Es gab daher auch die volle Helligkeit noch eine ganz sichere Einstellung.

Wie aus Tabelle und Curve wiederum mit gleicher Sicherheit hervorgeht, zeigt der Nachbildwerth mit der vollkommensten Genauigkeit, wie sie bei der Einrechnung aller überhaupt erhaltenen Einstellungen niemals besser erwartet werden kann, die Gültigkeit des Fechner-Helmholtz'schen Satzes auch für diese der Ermüdungsfarbe und ihren Complementen gleich

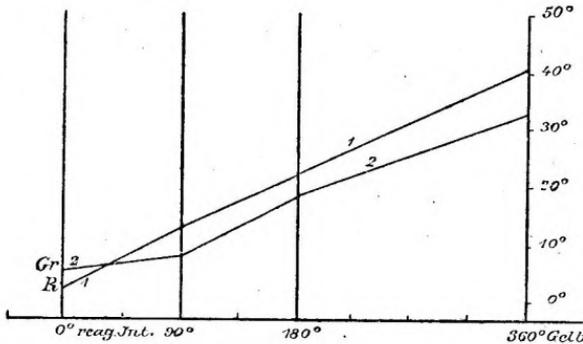


Fig. 4.

fernliegende Reactionsfarbe. Dabei kann auch nicht etwa ein gleichzeitiges Helligkeitsnachbild für diese Uebereinstimmung mit dem Satze verantwortlich gemacht werden, wie es selbstverständlich von der reagirenden Intensität abhängig

ist, da eben die für die Messung in Betracht kommende Fläche überhaupt keine Helligkeitsdifferenzen aufzuweisen hatte. Die Einstellung für die unterste reagirende Helligkeit führt stets nur zu geringerer subjectiver Sicherheit der Ausgleichung, weil hier die Unterschiedsschwelle von den Einstellungsfehlern weit übertroffen wird, und nur dies ist mit dem Zusatz des *ca* angedeutet. Die Einstellungswerthe selbst liegen dabei eben wegen der Feinheit der Unterscheidung noch weniger weit auseinander als sonst, so dass die bei der gewählten Angabe nach halben Graden angebbare mittlere Variation doch wieder nur als  $0^\circ$  bezeichnet werden kann. Beide Curven, insbesondere diejenige für Roth, verlaufen fast vollständig geradlinig, die geringere Steilheit der Grün-Curve kann wohl zum Theil auf das Purkinje'sche Phänomen zurückgeführt werden, welches die unteren Intensitätsstufen des Grün mit relativ höheren Werthen zur Geltung kommen lässt. In beiden Fällen

zeigt sich ferner die stetige kleine Zunahme des Proportionalitätsfactors nach unten hin, wie sie uns von früher her geläufig ist. Nach dieser vollkommenen Bestätigung der schon früher an der Hand jenes einfacheren Beispiels ausgesprochenen Vermuthung kann also nun wohl mit Sicherheit behauptet werden, dass der Werth eines negativen Farbennachbildes auf jeder beliebigen Farbe als eine zur reagirenden Intensität proportionale Wirkung zu betrachten ist, der in der jeweiligen absoluten Größe nur für die bestimmte Intensitätsstufe zutrifft und nicht einfach als constante Beimischung einer positiven Erregung zu erklären ist.

2. An zweiter Stelle sind nun die Nachbildwerthe, die nach dem soeben Gesagten jedenfalls für jede einzelne Reactionsfarbe aufzufinden sind, auf ihre Abhängigkeit von dem reagirenden Farbenton hin zu vergleichen. Denn nachdem sich das negative Nachbild seinem ganzen Wesen nach von der Gesamtquantität des reagirenden Processes abhängig gezeigt hat, ist kaum mehr zu erwarten, dass nun auch die Proportionalitätsfactors der verschiedenen gleich hell erscheinenden Reactionsfarben unter sich völlig übereinstimmen. Auch hier ist der Wirkung der Reactionsfarben diejenige auf einem Grau von gleicher Helligkeit an die Seite gestellt. Tabelle VI gibt eine Uebersicht über die Werthe, die nach Anordnung B auf sämmtlichen überhaupt benutzten Reactionsfarben für die vier als Ermüdungsreiz verwendeten Hauptfarben bei Helladaptation abgeleitet wurden. Zunächst wurden hierbei die Farben auf schwarzem Grunde fixirt, so dass hier Farben- und Helligkeitsnachbild zugleich gemessen werden, ein Verfahren, dessen Zulässigkeit in unserer Frage bereits oben begründet wurde. In zwei Reihen ist aber auch ein reines Farbenachbild von Roth-Grün und von Blau-Gelb gemessen. Die Curve Fig. 2 enthält die Werthe der Tabelle in den Linien 1 bis 7 mit Bezeichnung der einzelnen Curven nach den Ermüdungsfarben links vorn am Beginne jedes Linienzuges. Wie ebenfalls schon früher begründet wurde, können hier die absoluten Werthe der Nachbilder von verschiedenen Ermüdungsfarben unter sich nicht unmittelbar verglichen werden, sondern stets nur das verschiedene Verhältniss der einzelnen Werthe innerhalb der verschiedenen Curven.

Wie es schon nach jener Messung des reinen Farbennachbildes von Roth und von Grün auf Gelb zu erwarten war, zeigen sämmt-

Tabelle VI (Helladaptation).

Messung des Nachbildes von verschiedenen Ermüdungsfarben auf sieben gleich hellen Reaktionsfarben.

Bezeichnung der Ermüdungsfarben	Roth	Gelb	Grün	Blau	Roth neben Grün	Gelb neben Blau	Mittelwerthe der Farbennachbilder der Ermüdungsfarben
Roth	110,8 (m. V. 14,2)	100,6	107,4 (m. V. 8,4)	52,6 (m. V. 3,8)	43,6 (m. V. 6,4)	43,4 (m. V. 11,4)	76,3
Orange	68 (m. V. 10,6)	90	68,8 (m. V. 8)	40 (m. V. 0)	41,2 (m. V. 3)	40	58
Gelb (fl. F.)	71,2 (m. V. 4)	86,4 (m. V. 8,4)	62,6 (m. V. 2,2)	33,6 (m. V. 2,4)	41,2 (m. V. 4,4)	29 (m. V. 2)	53
Gelbgrün	88,4 (m. V. 8,4)	90	73,4 (m. V. 10,2)	40 (m. V. 0)	49 (m. V. 3)	39 (m. V. 2,5)	63,6
Grün	102,2 (m. V. 12,8)	100 (m. V. 10)	106,2 (m. V. 13,2)	52 (m. V. 5,2)	81,2 (m. V. 0,8)	49	81,7
Blau	104 (m. V. 14,6)	107,2 (m. V. 7)	106,6 (m. V. 9,8)	61 (m. V. 8,4)	76 (m. V. 11,2)	65 (m. V. 5)	85,3
Grau	66,4 (m. V. 3,6)	96	75 (m. V. 2)	38 (m. V. 1)	40 (m. V. 0)	35,4 (m. V. 4,4)	58,4

Der Nachbildwerth auf reagirendem

jiche Ermüdungsfarben auf allen gleich hell aussehenden Reactionsfarben Wirkungen von eben so verwandter Größe, wie sie schon für die Messung des Helligkeitsnachbildes auf allen Farben gefunden worden war. Die Proportionalitätsfactoren, mit denen beliebige Farben ihrer Intensität entsprechend auf ein Farbennachbild reagieren, schwanken zwischen keiner weiteren Grenze als beim Helligkeitsnachbild, für welches letzteres doch ganz sicher jede einzelne Farbe trotz jener Verschiedenheiten der absoluten Werthe genau dem Fechner-Helmholtz'schen Satze entsprach. Ja man kann sagen, im allgemeinen ist die Differenz sogar relativ kleiner, als die größte Differenz zwischen dem kleinsten Helligkeitsnachbild auf Gelb und dem größten auf Blau. Besonders wichtig ist es aber nun auch, dass die sogen. Aequivalenzverhältnisse, die früher für nicht homogene Farben zuerst gefunden und dann auch bei den reinen Helligkeitsnachbildern wieder erkannt worden waren, auch bei Verwendung homogener Farben ihre Bedeutung beibehalten. Am eindringlichsten zeigt sich diese Thatsache, wenn man für jede einzelne Reactionsfarbe den Mittelwerth aus den Nachbildern von sämtlichen Ermüdungsfarben ableitet. Diese Mittelwerthe sind in der Tabelle in der letzten Verticalreihe zusammengestellt und ebenso in die graphische Darstellung (als schraffierte Linie) eingetragen. Vergleicht man nun diese Reihe mit den Werthen für das reine Helligkeitsnachbild aus Tabelle II, so zeigt sich mit aller Deutlichkeit das analoge Verhältniss der »Aequivalenzwerthe« für das Helligkeitsnachbild und der mittleren Aequivalenzwerthe für das Farbennachbild. Am schönsten überblickt man dieses Verhältniss beim Vergleich der zuletzt genannten Curve der Mittelwerthe  $M$  und der mit 1 bezeichneten  $W$ -Curve in Fig. 2, die beide nahezu parallel verlaufen, und zwar in Uebereinstimmung mit dem sonstigen Größenverhältniss beider Arten von Nachbildern mit größeren Ordinaten für das Farbennachbild. Besonders auffällig ist auch die zufällig sogar vollständige Uebereinstimmung hinsichtlich des Werthes für reagirendes Grau, der in beiden Fällen mit reagirendem Orange bis auf weniger als den halben Grad zusammentrifft, welches letzteres Verhältniss oben bereits ausführlicher discutirt wurde. Nur für Roth stimmt das Verhältniss insofern nicht ganz überein, als es beim Helligkeitsnachbild

das Grün wenigstens in Tabelle II und III noch übertrifft. Es genügt aber für die Uebereinstimmung, dass überhaupt ein größerer Werth für reagirendes Roth vorhanden ist, wie es zu den Ergebnissen bei Dunkeladaptation in Gegensatz steht. Zeigt ja doch schon z. B. Tabelle I auch für Helladaptation einen etwas größeren Werth für Grün, so dass das beiderseitige Verhältniss zunächst höchstens als ungefähre Gleichheit bezeichnet werden kann. Dadurch wird also das schon oben hervorgehobene Resultat noch sicherer gestellt, dass die Curve der Aequivalenzwerthe nur ein Minimum in der Nähe des Gelb aufweist, während nach dem reinen vollgesättigten Roth hin, wie es freilich nur bei Helladaptation in dieser »scheinbaren« Helligkeit zu erreichen ist, wieder eine Annäherung an die Werthe auf der entgegengesetzten Seite des Spektrums vorhanden ist. Den absoluten Größen der Mittelwerthe darf natürlich wegen der Verschiedenheit der Bedingungen bei jeder einzelnen Ermüdungsfarbe noch kein allzu großer Werth beigelegt werden. Dennoch wird man erst durch ihn von den besonderen Abweichungen des Farbennachbildes je nach dem Farbentone der Ermüdungsfarbe einigermaßen unabhängig, welche neben jener Uebereinstimmung der mittleren Aequivalenzwerthe mit dem Helligkeitsnachbild unstreitig vorhanden sind und für jede einzelne Ermüdungsfarbe den von dem Aequivalenzwerthe der Farbe als solchem abhängigen Verlauf der Curve compliciren. Hinsichtlich dieser Verschiedenheiten der einzelnen Curvenformen für die verschiedenen Ermüdungsfarben ist insbesondere die Regelmäßigkeit nicht zu verkennen, mit welcher eine jede reagirende Farbe jederzeit dann die günstigste Stellung im Verhältniss zu den übrigen Reactionsfarben besitzt, wenn die nämliche Farbe zugleich Ermüdungsfarbe gewesen ist. Am auffälligsten tritt dies für Gelb hervor, das bei allen anderen Ermüdungsfarben eine frühe Einsenkung der Curve darstellt, bei Curve 3 hingegen, d. h. für Gelb selbst als Ermüdungsfarbe, von den übrigen Reactionsfarben verhältnissmäßig nur wenig abweicht. Man muss ja hierbei zugleich die absolute Höhe der Werthe berücksichtigen, die hier eine ziemlich hohe ist, so dass die vorhandene Differenz nur wenig in Betracht kommt. Aehnliches gilt aber auch für Roth, Blau und Grün. Für die Complementärfarbe und die von beiden gleich weit entfernten Farben ist ein deutlich ausgeprägtes Verhältniss kaum nachzuweisen.

Gerade diese feste Abhängigkeit der Abweichungen, die vom Tone der Ermüdungsfarbe abhängen, bringt es nun mit sich, dass in einem Mittelwerth, der aus sämtlichen Werthen für die verschiedenen, gleichmäßig über das Spektrum vertheilten Ermüdungsfarben abgeleitet ist, diese vom qualitativen Verhältniss zwischen der reagirenden und der ermüdenden Farbe abhängigen Differenzen der Werthe zurücktreten und in der oben dargelegten Weise ausschließlich die allgemeinen Aequivalenzverhältnisse der verschiedenen Reactionsfarben für Nachbilder überhaupt übrig bleiben, wie wir sie schon bei den reinen Helligkeitsnachbildern kennen gelernt haben.

Es ist indessen bei diesen relativ hohen reagirenden und ermüdenden Intensitäten bei Helladaptation auch für jede Ermüdungsfarbe im einzelnen eine größere Annäherung der Curve an die allgemeine Form der reinen Aequivalenzcurve vorhanden, also ein kleinerer Einfluss der Farbentöneinflüsse, als wir sie sogleich unter anderen Bedingungen kennen lernen werden. Die Abhängigkeit vom Farbenton kommt nur als eine kleine Modification dieser allgemeinen Aequivalenzcurve zur Geltung. Es scheint also, dass nach Fixation der Farbe auf schwarzem Grunde unter den genannten Bedingungen das mit dem Farbenachbilde hier stets verbundene Helligkeitsnachbild selbständiger zur Geltung kommt, für welches eben ganz unabhängig vom ermüdenden Farbenton jenes allgemeine Verhältniss zutrifft. Einen viel weitergehenden Einfluss gewinnt das qualitative Verhältniss zwischen reagirendem Farbenton aber nun bei dem reinen Farbenachbild, wie es durch Fixation der Farbe neben Grau entsteht. Die Zusammenstellung annähernd complementärer Farben von gleicher Helligkeit hingegen scheint durch die Mitwirkung der beiden so verschiedenen Farbentöne zum Gesamtwerthe des Nachbildes ebenfalls gewisse Compensationen der vom Farbenton abhängigen Abweichungen herbeizuführen, so dass wiederum mehr das reine Aequivalenzverhältniss hervortritt. Allerdings besteht bei Curve 6 und 7 der Figur für das Nachbild von Roth-Grün und Blau-Gelb eine dem Verhältniss bei Dunkeladaptation ähnliche Form, indem wiederum Roth seinem geringen Werthe nach weit hinter Grün und Blau zurücksteht. Diese Angaben bestätigen sich auch in weiteren Untersuchungen nach Anordnung A, in denen aber dann neben den Nachbildern von Roth-Grün und Blau-Gelb vor allem auch reine Helligkeitsnachbilder ein-

facher homogener Farben durch Fixation von Roth, Gelb und Grün je neben Grau abgeleitet wurden. Die Reactionsfarben sind zu diesem Zwecke allerdings überall etwas in ihrer Intensität herabgesetzt, weil die Deutlichkeit der Farbe bei der Superposition der ermüdenden und der reagirenden Farbencombination, und damit die Sicherheit und Schärfe der Messung des Nachbildes bei Zumischung der Farbe neben Grau von gleicher Helligkeit außerdem eine zu geringe wäre. Die Herabsetzung der reagirenden Intensität ungefähr um die Hälfte, natürlich mit neuer Herstellung des gleich hellen Aussehens, ergab also zwar entsprechend geringere Werthe, vermehrte aber dafür ihre

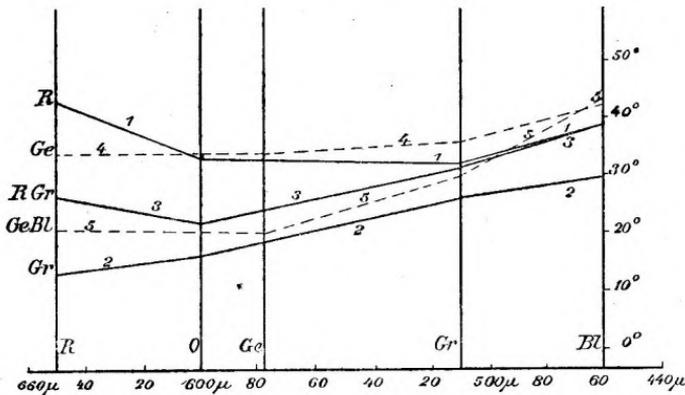


Fig. 5.

Sicherheit. In Tabelle VII und Fig. 5 sind die entsprechenden Werthe nach dem nämlichen Schema wie bisher zusammengestellt. Dabei kam vor Einführung des flüssigen Strahlenfilters für Gelb zunächst für die ersten Reihen dieser Tabelle Orange als vierte Reactionsfarbe zur Verwendung.

Die Mittelwerthe aus den verschiedenen Nachbildern für jede einzelne Reactionsfarbe haben hier wegen der Unvollständigkeit dieser Controllreihen nicht ganz die Bedeutung wie oben. Doch ist auch hier die Annäherung an die Curve der reinen Aequivalenzverhältnisse unverkennbar. Allerdings stellt sich der Werth für Roth relativ etwas geringer, als sonst bei Helladaptation, ohne dass jedoch die Annäherung an den Werth für Grün zu übersehen wäre. Zudem würde hier schon die geringere Intensitätsstufe die volle Vergleichbarkeit mit jenen Tabellen bei voller Inten-

Tabelle VII (Helladaptation).

Messung reiner Farbennachbilder auf gleich hellen Reactionsfarben.

	Bezeichnung der Ermüdungsfarben					Mittelwerth
	Roth neben Grau	Gelb neben Grau	Grün neben Grau	Roth neben Grün	Gelb neben Blau	
Werth des Nachbildes auf	Roth (m. V. 1,4)	34	13,4 (m. V. 0,6)	27 (m. V. 3)	21 (m. V. 2,8)	27,7
	Orange (m. V. 3,4)	—	16,2 (m. V. 0,8)	22 (m. V. 2)	—	
	Gelb	—	34	—	20,2 (m. V. 1)	
	Grün (m. V. 4,4)	36	26,4 (m. V. 0,4)	31,4 (m. V. 0,6)	31,4 (m. V. 7)	31,5
	Blau (m. V. 1,4)	42	29,4 (m. V. 3,4)	38,4 (m. V. 0,4)	43,4 (m. V. 8,4)	38,1

sität und Helladaptation etwas beeinträchtigen. Im wesentlichen aber behalten die Aequivalenzverhältnisse ihre Bedeutung bei und dies entspricht ja vollkommen der Thatsache, dass sie überhaupt bei den reinen Farbennachbildern im zweiten Theile dieser Arbeit zu allererst aufgefallen waren. Außerdem ist aber hier nun doch vor allem der Einfluss des qualitativen Verhältnisses zwischen ermüdender und reagirender Farbe an den Werthen für die verschiedenen Ermüdungsfarben viel deutlicher zu erkennen als bisher. Die Curve für Gelb z. B. verläuft annähernd parallel zur Abscissenaxe und zeigt erst nach Grün und Blau hin eine kleine Steigung. Für Gelb neben Blau hingegen ist diese letztere Steigung sehr deutlich. Sehr markant ist im gleichen Sinne der Unterschied des Nachbildes von Grün neben Grau einerseits und Roth neben Grau andererseits, während das Nachbild von Roth neben Grün einen mittleren Verlauf zeigt. Bei Ermüdung durch Grün reagirt Roth relativ am geringsten, Gelb mehr und es ist ein deutliches Ansteigen nach Grün und Blau zu erkennen. Für Ermüdung durch Roth hingegen hebt sich der Werth für reagirendes Roth sogar deutlich als der relativ größte heraus. Es zeigt sich also wiederum wie bei der Untersuchung der Aequivalenzverhältnisse für Helligkeitsnachbilder bei Dunkeladaptation ein gewisser Gegensatz

zwischen den beiden Theilen des Spektrums. In der relativen Begünstigung oder Benachtheiligung seitens einer bestimmten Ermüdungswirkung gehören hier nicht etwa die Complementärfarben zusammen, so dass z. B. bei Ermüdung durch Roth die Werthe für Roth und Grün gegenüber denen von Blau und Gelb bevorzugt würden. Vielmehr ist bei Ermüdung durch Grün Blau sowohl als Grün besonders günstig gestellt gegenüber Roth und Gelb, während beide kalten Farben hinter Roth zurücktreten und Gelb wenig übertreffen, wenn durch Roth ermüdet wurde. Gerade diese reinen Farbennachbilder dürften aber über die Zusammengehörigkeit der reagirenden Farben am meisten entscheiden. Die ganz ähnliche Wirkung auf der zwischen der Ermüdungsfarbe und ihrer Complementärfarbe gelegenen Nachbarfarbe, die noch zur »warmen« oder »kalten« Seite des Spektrums mit hinzugehört, scheint also in der Form der Abhängigkeit des Werthes vom Verhältniss des reagirenden und ermüdenden Reizes einen integrirenden Bestandtheil zu bilden, und dies zeigt am allerdeutlichsten, dass die Zusammengehörigkeit der Complementärfarben Blau-Gelb, bezw. Roth-Grün niemals mit einer Einschränkung der Nachbildwirkung, die von einer der beiden als Ermüdungsfarbe her stammt, gleichbedeutend sein kann. Die Wirkung ist vielmehr hier in einer sehr stetigen Veränderung durch das ganze Spektrum hindurch abgestuft.

Trotz des gleichzeitigen Hinzutretens eines Helligkeitsnachbildes, wie es bei Fixation der Farbe auf dunklem Grunde unvermeidlich ist, scheint der Unterschied der Curvenform bei den verschiedenen Ermüdungsfarben auch schon bei etwas geringerer Intensität der Reactionsfarben deutlicher hervorzutreten. Wenigstens scheint mir eine Reihe darauf hinzuweisen, welche diese vom reinen Aequivalenzverhältniss abweichende Curvenform gerade an dem markantesten Fall auffinden ließ, wo das im Mittel mit dem geringsten Aequivalenzwerth reagirende Gelb zugleich Ermüdungsfarbe war. Die folgende kleine Tabelle VIII stellt die Werthe für die vier Hauptfarben in ihrer um das Vierfache herabgesetzten Intensität dar, wie sie oben schon einmal in Tabelle III auf das reine Helligkeitsnachbild reagirten. Die Hebung des Nachbildwerthes für reagirendes Gelb und die hierdurch herbeigeführte Annäherung an einen parallelen Verlauf der Curve, wie er in Fig. 3 zu Tabelle VII für die Er-

müdigungsfarbe Gelb gefunden wurde, ist hier ebenso deutlich zu erkennen.

Tabelle VIII (Helladaptation):

Das Nachbild von Gelb auf Schwarz auf den vier Hauptfarben von je  $\frac{1}{4}$  Intensität gemessen.

Die reagirenden Farben	Roth	Gelb (flüss. Filt.)	Grün	Blau
Werth des Nachbildes von Gelb auf Schwarz	24 (m. V. 4)	26	26	26,6 (m. V. 4)

Am klarsten treten aber diese Unterschiede bei verschiedenen Ermüdungsfarben und die Zusammengehörigkeit der kalten und warmen Farben trotz gleichzeitigen Helligkeitsnachbildes, d. h. trotz Fixation der Ermüdungsfarbe auf schwarzem Grunde, bei Dunkeladaptation hervor, obgleich hier gerade das charakteristische Moment der Farbtonempfindung, die Sättigung, sehr herabgesetzt und die Helligkeitserregbarkeit sehr gesteigert ist. Doch ist ja auch hier die reagirende Intensität bedeutend herabgesetzt, welche nach Tabelle VIII für die Erkenntniss dieser Differenzen besonders günstig zu sein scheint. Diese Versuche bei Dunkeladaptation in der im 2. Kapitel beschriebenen Weise registriert Tabelle IX mit den Curven Fig. 3, aus denen früher schon das reine Helligkeitsnachbild behandelt wurde.

Zunächst zeigt sich ebenso wie bei jenen Versuchen bei Helladaptation eine gute Uebereinstimmung des Verhältnisses der aus allen Farbennachbildern gewonnenen Mittelwerthe für die verschiedenen Reactionsfarben und der entsprechenden Werthe für das reine Helligkeitsnachbild, wobei dem Unterschiede von Hell- und Dunkeladaptation entsprechend auch wiederum Roth noch etwas ungünstiger als Gelb gestellt ist. Auch hier ist der Vergleich am besten in der Fig. 3 auszuführen, in welcher beide Curven besonders gekennzeichnet sind. Auch verläuft die Farbencurve wieder entsprechend höher als diejenige des reinen Helligkeitsnachbildes. Doch ist auch hier die Ableitung

Tabelle IX (Dunkeladaptation).

Das Nachbild nach Fixation der Ermüdungsfarbe auf Schwarz wird auf vier gleich hellen Farben gemessen.

Bezeichnung der reagirenden Farben	Werthe für die Ermüdungsfarben				Mittelwerthe aus allen Nachbildern
	Roth	Gelb	Grün	Blau	
Roth	28 (m. V. 2)	50 (m. V. 6,6)	40 (m. V. 4)	20 (m. V. 2)	34,5
Gelb (trockener Filter)	22 (m. V. 2)	50 (m. V. 10)	44 (m. V. 0)	30 (m. V. 2)	36,5
Grün	24 (m. V. 2)	50 (m. V. 0)	82 (m. V. 8)	50 (m. V. 4,8)	51,5
Blau	27 (m. V. 3)	49 (m. V. 5)	82 (m. V. 10)	67 (m. V. 3)	56,2

der Mittelwerthe in Ermangelung einer völligen Vergleichbarkeit der verschiedenen Curven hinsichtlich ihrer absoluten Werthe nur ein grobes Mittel, um in allen Curven neben der Verschiedenheit je nach der Ermüdungsfarbe die gemeinsam vorhandene Ausprägung des reinen Aequivalenzverhältnisses für Dunkeladaptation mit seinem von Gelb bis Grün mit großer Geschwindigkeit fortschreitenden Ansteigen nach Blau hin erkennen zu lassen.

Für die einzelnen Ermüdungsfarben ist aber nun hier besonders stark die engere Zusammengehörigkeit der beiden Hälften des Spektrums ausgeprägt. Nach Ermüdung durch Roth und durch Gelb (Curve 2 u. 3) ist ein annähernd paralleler Verlauf der Curven vorhanden, besonders bei Gelb, und ist hierdurch die in dem allgemeinen Aequivalenzverhältniss gegebene Steigung der Werthe nach der Blauseite hin durch die Begünstigung der ganzen warmen Seite des Spektrums annähernd compensirt. In Curve 4 und 5, welche der Ermüdung durch Grün und Blau entspricht, ist hingegen umgekehrt die für jede Reactionsfarbe vorhandene Abweichung vom Mittel, welche sich auf das qualitative Verhältniss zur Ermüdungsfarbe gründet, zu der Abweichung auf Grund des allgemeinen Aequivalenzverhältnisses gleichgerichtet und sie steigert hier daher besonders stark das steile Ansteigen nach der Grün-Blau-Seite hin.

Weitere Beziehungen der Curvenformen zum qualitativen Verhältniss der reagirenden und ermüdenden Farben (z. B. eine wiederum relativ noch größere Begünstigung einer der beiden Farben innerhalb der warmen oder kalten Zone, wenn die Ermüdungsfarbe zum nämlichen Gegenfarbenpaare hinzugehört) sind auch bei Dunkeladaptation zum mindesten nicht in eindeutiger Weise aufzufinden. Nur eine Begünstigung des Werthes für die zugleich reagirende Ermüdungsfarbe ist auch hier noch als drittes Moment neben den beiden anderen des allgemeinen Aequivalenzverhältnisses einerseits und der engeren Zusammengehörigkeit der beiden Nachbarfarben jeder Hälfte des Spektrums andererseits nachzuweisen, wie auch schon bei den Versuchen mit Helladaptation im Anschluss an Tabelle VI hervorgehoben wurde. In diesen drei Momenten sind aber nun zugleich sämtliche Factoren nochmals zusammengefasst, welche für die Abhängigkeit des Nachbildwerthes von der reagirenden Farbe und von ihrem Verhältniss zur ermüdenden mit einiger Sicherheit abgeleitet werden konnten. Aus diesen specielleren Formulierungen lässt sich wiederum das allgemeinste und wichtigste Resultat herausheben, dass ein jedes Nachbild, gleichgültig, von welcher Fixationsfarbe es her stammt, auf sämtlichen Reactionsfarben eine GröÙe besitzt, die im allgemeinen nur wenig von dem für alle Nachbildwirkungen gültigen Aequivalenzverhältnisse abweicht und der reagirenden Intensität gemäß dem Fechner-Helmholtz'schen Satze proportional ist. In diesem Satze mit den genannten secundären Momenten ist aber dann auch die allgemeinste Gesetzmäßigkeit für die gesammten Erscheinungsformen der negativen Nachbilder unter den hier benutzten Entstehungsbedingungen ausgesprochen, insofern auch für die reinen Helligkeitsnachbilder nach unseren jetzigen Untersuchungen das allgemeine Aequivalenzverhältniss seine Gültigkeit behält, während natürlich die vom ermüdenden Farbenton abhängigen Differenzirungen wegen der Indifferenz der Ermüdungsfarbe von selbst in Wegfall kommen. Es bleibt also hier nur noch die früher ausführlicher behandelte besondere Constante hinzuzufügen, um welche das Helligkeitsnachbild seinem relativen Werth nach stets hinter den Farbenachbildern zurücksteht.

#### 4. Zur Abweichung der äquivalenten Intensitäten der reagirenden Farben von der gleichen Helligkeit.

Bevor die besonderen Gesetzmäßigkeiten der farbigen Nachbilder in ihrer theoretischen Bedeutung zur Sprache kommen, muss zunächst noch jene allgemeinste Form der Abhängigkeit des Nachbildwerthes von der reagirenden Farbenintensität einigermaßen verständlich gemacht werden, welche darin besteht, dass die reagirende Intensität, welche zu dem gleichen Nachbildwerthe führt, je nach den Farbentönen verschieden hell erscheint, und zwar ungefähr in dem Sinne, dass das äußerste Rot und Grün etwa gleichwerthig sind, während ein gleich stark reagirendes, also nach der obigen Terminologie äquivalentes Blau eine geringere, ein äquivalentes Gelb aber eine größere Helligkeit besitzt und die Zwischenfarben einen continuirlichen Uebergang vermitteln. Dass der Begriff der sog. specifischen Helligkeiten hier nicht klärend wirken kann, wurde bereits früher erwähnt. Man könnte aber bei meinen Angaben, die allerdings nur die allgemeine Reihenfolge charakterisiren, auch an das scheinbare Helligkeitsverhältniss denken, welches die betreffenden Farben einhalten, wenn sie paarweise zu einem gleich hell erscheinenden Grau gemischt werden. Ebenso wie innerhalb des antagonistischen Processes der Aufhebung des Farbencharakters bestimmte Intensitätsverhältnisse als gleichwerthig erscheinen; könnte diese Leistungsfähigkeit auch für die Entwicklung des negativen Nachbildes in Betracht kommen. Diese Ueberlegung verliert indessen ihre Tragweite durch die Abhängigkeit der für den Antagonismus äquivalenten Intensitätsverhältnisse von der Adaptationslage. Denn die für das Nachbild äquivalenten Intensitäten der verschiedenen Farbentöne scheinen nach den mitgetheilten Beobachtungen für Hell- und Dunkeladaptation eine ganz ähnliche Stufenreihe einzuhalten, sie sind also ein für alle Mal an den Farbenton fest gebunden. Mit ihrem Verhältniss stimmt aber die Curve der zu Grau sich aufhebenden Farbenintensitäten nur in der Helladaptation annähernd überein. Für Dunkeladaptation weicht diese letztere jedoch bekanntlich nach dem Purkinje'schen Phänomen bedeutend von dieser auch hier für die Nachbilder gültigen Reihenfolge ab. Außerdem wäre aber mit dieser Analogie, auch wenn sie

durchzuführen wäre, an und für sich noch nichts für die Verdeutlichung gewonnen, weil eben das gefundene Aequivalenzverhältniss nicht nur für die Farbnachbilder als typischer Grundzug neben allen Abweichungen hervortritt, sondern insbesondere für die Helligkeitsnachbilder am ungetrübtesten zur Geltung kommt. Für diese letzteren ist aber nach dem Fechner-Helmholtz'schen Satze überall die reagirende Helligkeit entscheidend und würde diese Auffassung wegen der anderweitig hinreichend gesicherten Hypothese einer Abtrennung des Helligkeits- vom Farbenprocesses nur um so schwerer aufzugeben sein. Selbst wenn man also auch der Farbenerregung, die aus dem Antagonismus frei hervorgegangen ist, eine von ihrem Tone abhängige spezifische Wirksamkeit in einem ganz neuen Sinne zuschreiben wollte, wonach der actuelle Gelbprocess den selbständigen Helligkeitsprocess in allen Adaptationslagen noch mehr steigern, Blau denselben herabsetzen würde, gegenüber derjenigen Wirkung auf den Weißprocess, die man den äußeren Reizen allein zuschreiben würde, so wäre damit eben nur der durch seine Quantität für das Helligkeitsnachbild entscheidende Vorgang im Ganzen verändert, und müsste die scheinbare Helligkeit und der Nachbildwerth doch wieder gleichzeitig im nämlichen Sinne verändert worden sein. Denn es wäre nicht abzusehen, wie nur ein Theil des Helligkeitsprocesses für das Nachbild zur Geltung kommen sollte.

Die beste Vereinigung mit dem subjectiven Thatbestande dürfte also wohl dadurch erreicht werden, dass man die scheinbare Helligkeit, wie sie im unmittelbaren Vergleichsurtheil zur Geltung kommt, im allgemeinen auf zwei Factoren zurückführt, von denen nur der eine, wesentlichere dem selbständigen Helligkeitsprocesses entspricht und somit auch im Ganzen gleichmäßig für die Berechnung des Helligkeitsnachbildes in Betracht kommt, während der andere nur wegen seines psychologischen Empfindungscharakters dem subjectiven Correlate des selbständigen Helligkeitsprocesses verwandt ist und deshalb nur in dem Vergleichsurtheil eine ähnliche Function wie dieses Correlat auszuüben im stande ist. Für den peripher-physiologischen Process des Nachbildes käme er einfach deshalb nicht noch einmal besonders in Betracht, weil er nur in der Qualität des Farbenprocesses seine peripher-physiologische Grundlage besitzt, auf welche sich das Helligkeitsnachbild nicht bezieht. Eine Differenz

im Sehfelde, welche bei Gleichheit der benachbarten reinen Helligkeitsprocesse ausschließlich in einem Unterschiede hinsichtlich dieses besonderen Charakters der neben einander fixirten Farben besteht, würde also auch z. B. kein in dem Substrat der Helligkeitsprocesse begründetes Helligkeitsnachbild, sondern ausschließlich ein reines Farbennachbild erzeugen können. Nach dieser Auffassung müsste also der Farbencharakter des Gelb an und für sich bei gleichem Werthe des gleichzeitigen Helligkeitsprocesses den nämlichen Eindruck machen wie eine größere farblose Helligkeit, äußerstes Rot und Grün könnte als indifferent betrachtet werden, während Blau sogar den Eindruck der Quantität des reinen Helligkeitsprocesses herabzumindern im stande wäre. Die Wirkung einer gemischten Farbe müsste dann bei der Continuität der Veränderung des maßgebenden Farbencharakters aus derjenigen der Componenten annähernd zu berechnen sein. Hinsichtlich der Abhängigkeit von der relativen Sättigung bleibt bei dieser Auffassung freilich auch eine gewisse Schwierigkeit bestehen, insofern ja die charakteristische Bedeutung des Farbentones für die Helligkeitsschätzung auch bei Dunkeladaptation mit annähernd den nämlichen Constanten für die Abweichung wirkt, obgleich hier die Sättigung eine geringe ist. Allerdings war auch hier die reagirende Intensität noch groß genug, um den Farbenton deutlich erkennen zu lassen. Außerdem sind aber gerade psychologische Nebenwirkungen zur Quantität der ursächlichen Qualität nicht immer proportional. Auch diese Auffassung müsste aber freilich, ähnlich wie diejenige von den specifischen Helligkeiten, für völlige Farblosigkeit bei den niedrigsten Intensitäten völlige Uebereinstimmung erwarten. Nur wenn sich auch dies nicht bestätigen würde, wäre eine im übrigen noch völlig unerklärbare Nebenwirkung der Wellenlänge als solcher erwiesen, wie sie am ehesten noch zu dem auch im übrigen noch freieren Hypothesensystem des 6. Capitels passen könnte. Bei Zulänglichkeit jener psychologischen Erklärung käme dann die eigenartige Uebereinstimmung der Aequivalenzverhältnisse mit den Helligkeitsverhältnissen der zu Grau sich aufhebenden Complementärfarben nur zufällig gerade bei Helladaptation zu stande, weil hier die Sättigungsverhältnisse, zu denen die im complementären Antagonismus gleichwerthigen Quantitäten in umgekehrter Proportion stehen, zufällig auch zu dem charakteristischen Helligkeitseindruck

der Farben indirect proportional sind. Die universale Bedeutung der für die Helligkeitsnachbilder gleichwerthigen Intensitätsverhältnisse für alle negativen Nachbilder überhaupt, also auch für die farbigen, würde nun je nach der Erklärung des negativen Farbenachbildes als einer bloßen Erregbarkeitsveränderung der normalen Substrate oder einer selbständigen Beimischung verschieden ausfallen können, wie aber erst nach einer eingehenderen Behandlung der beiden Theorien im nächsten und übernächsten Capitel jeweils beigefügt werden kann.

5. Der Fechner-Helmholtz'sche Satz und der v. Kries'sche Satz in ihrer Bedeutung für die Erklärung der negativen Farbennachbilder als bloßer Erregbarkeitsveränderungen.

(Ohne Annahme von Miterregungen secundärer Restsubstrate u. s. w.)

**A. Die Hering-Hess'sche Widerlegung einer solchen Erklärung im Sinne der Dreifarbentheorie.**

Schon in den früheren Ausführungen wurde öfters erwähnt, dass eine theoretische Erklärung der negativen Nachbilderscheinungen jederzeit auf zwei principiell verschiedenen Wegen versucht werden könne. Man kann zunächst einmal annehmen, dass einfach die beim Sehen ohne Nachbild actualen Substrate durch die einseitige Bethätigung in einer bestimmten Richtung ihre Erregbarkeit gegenüber den äußeren Reizen verändert hätten, dass also die Vorgänge im abnormen Zustande qualitativ mit den gewöhnlichen Reactionen auf die äußeren Reize vollständig übereinstimmen und auch im einzelnen ganz den nämlichen Reizqualitäten entsprechen, und dass nur eine proportionale Herabsetzung bzw. Steigerung des Quantums bei einer oder mehreren von diesen Qualitäten den nämlichen Reizen gegenüber eingetreten sei. Der längst vor allen quantitativen Bestimmungen vermuthete Fechner-Helmholtz'sche Satz für die proportionale Veränderung der Helligkeitsauffassung, die Grundform aller Adaptation, ist die einfachste Veranschaulichung dieser Neugestaltung, die sich nun auf jedes überhaupt erregbare Substrat mit beliebigen qualitativen Leistungen beziehen kann. An zweiter Stelle kann man aber das negative Nachbild auch als Beimischung einer selbständigen Erregung auffassen, die sich zu den vielleicht sogar

ganz nach alten Maßverhältnissen erfolgenden normalen Erregungen hinzuaddirt, etwa auf Grund von Regenerationsvorgängen oder wegen der Entstehung secundärer Restsubstrate durch die vorhergehende einseitige Erregung der normalen Substrate u. dergl. Die Form der quantitativen Erscheinungsweise solcher Beimischungen braucht dabei nicht nothwendig für alle reagirenden Erregungen einen auch nur annähernd constanten Werth zu besitzen, wie es in der Helmholtz'schen Formel für das positive Nachbild in seiner Unterscheidung vom negativen angenommen wird. Sobald z. B. secundäre Restbestände sozusagen als neues abnormes Farbenempfindungssubstrat hinzutreten, wird, bei entsprechender Zuordnung adäquater Reizmomente für dieses neue Substrat auch wiederum eine Proportionalität zur Intensität solcher Reize abgeleitet werden können. Immer müssen aber natürlich die Qualitäten der hypothetischen Substrate und ihre Erregbarkeitsveränderungen mit den thatsächlichen qualitativen und quantitativen Verhältnissen der Nachbilder auf allen reagirenden Farben im Einklange sein. Schließlich könnte auch eine Verbindung beider Momente versucht werden.

Durch den Nachweis der Ausdehnung der Grundform des Fechner-Helmholtz'schen Satzes über alle negativen Nachbilderscheinungen überhaupt haben nun alle bisher dargelegten Versuchsergebnisse zunächst nur die Unmöglichkeit dargethan, mit constanten Beimischungen nach Art der positiven Nachbilder, also ohne Abhängigkeit von einem im vollen Sinne des Wortes reagirenden Reiz auszukommen. Sie fordern jedoch an sich keineswegs alle diese zur reagirenden Intensität proportionalen Verschiebungen mit bloßen Erregbarkeitsveränderungen in dem seiner qualitativen Constitution nach unveränderten Gesamtsupstrat aller Farbenempfindung zu erklären. Diese Erklärung wäre ja gewiss die denkbar einfachste und systematisch wohlgefalligste. Die beschriebenen Versuchsergebnisse haben indessen gerade durch die gleichzeitige Ausdehnung des Gebietes der reagirenden Erregungen, die alle thatsächlich eine dem Fechner-Helmholtz'schen Satze folgende Verschiebung erleiden, eine bedeutende Erschwerung der Aufgabe herbeigeführt, das negative Nachbild aus einer rein quantitativen Verschiebung der Wirkungen der reagirenden Reize auf das alte System von Farbensubstraten abzuleiten. Je mehr an sich neue Erscheinungsmöglichkeiten ein abnormer Vorgang

in sich schließt, um so schwieriger wird ja seine Reduction auf rein quantitative Veränderungen der alten Dispositionen. Diese Schwierigkeit besteht zunächst in besonderem Maße für die Componententheorien<sup>1)</sup> im eigentlichen Sinne des Wortes, welche drei bestimmten subjectiven »Grundfarben« oder zwei Urfarbenpaaren eben so viele von einander relativ unabhängige Substanzen als Substrate zu Grunde legen, deren gleichzeitige Erregungen in verschiedenen Verhältnissen dann auch alle übrigen Farbenempfindungen fundiren. Denn als einfache Erregbarkeitsveränderung innerhalb dieses Systems von Substraten müsste das Nachbild naturgemäß auf das bestimmte Substrat beschränkt bleiben, dessen Erregbarkeit gerade durch die Ermüdung, bezw. Erholung absolut und in einem bestimmten Verhältniss zur Umgebung verändert worden ist. Nur damit bleibt ja auch die qualitative Grundbestimmung des negativen Nachbildes vereinbar, dass es stets eine Verschiebung aller reagirenden Farben nach einer einzigen Qualität hin, der Complementärfarbe zur Ermüdungsfarbe, bedeutet. Man könnte also die Aufgabe, alles aus rein quantitativen Verschiebungen der normalen Reizwirkungen zu erklären, selbstverständlich nicht vielleicht in der Weise mit einer etwaigen directen Proportionalität des Nachbildwerthes zu der Intensität eines der Ermüdungsfarbe völlig fremden reagirenden Reizes in Einklang bringen, dass man eine gleichzeitige Modification der Erregbarkeit dieser fremden Substanz annimmt. Denn es ist eben eine besondere Thatsache für sich, dass das negative Nachbild keine verschiedene Richtung der Modification, sondern jederzeit eine Verschiebung nach der Complementärfarbe zur fixirten Farbe hin bedeutet. Nach Fixation von Roth wird z. B. objectives Gelb nicht in seinem Empfindungserfolg als Gelb gesteigert oder herabgesetzt, wie es einer Modification der charakteristischen Erregbarkeit des dem Gelb specifischen Substrats entspräche, sondern nach Grün verschoben<sup>2)</sup>. Aber auch die Wundt'sche Farbentheorie,

1) Wundt, Physiologische Psychologie. 5. Aufl. S. 233.

2) Hierin liegt sogleich einer der wichtigsten Einwände gegen die Ausgestaltung der Erklärung des Nachbildes aus bloßen Erregbarkeitsveränderungen im Sinne der Dreifarben Theorie, die ihrerseits zur Annahme eines auf Erregbarkeitsveränderungen beruhenden Nachbildes auf diesen unabhängigen Farben gezwungen würde, wie es thatsächlich nicht

welche sich von der Hypothese der specifischen Sinnesenergien und mehrerer von einander unabhängig präformirter Substrate frei hält und die Gestaltung der speciellen Farbensubstrate aus einem zu qualitativ verschiedenen Spaltungsproducten befähigten Substrate den jeweiligen Reizen überlässt, könnte eine ausschließliche Erklärung der negativen Nachbilder aus Erregbarkeitsveränderungen des hinsichtlich der qualitativen Reizeffecte unveränderten Substrates nur durch eine ähnliche Einschränkung der Nachwirkung auf bestimmte Seiten der Actionsfähigkeit dieses einheitlichen Substrates versuchen, die auch wiederum nur ganz bestimmten Reizmomenten adäquat sind. Die mit aller Sicherheit nachgewiesene Ausdehnung der zur reagirenden Intensität proportionalen Verschiebung nach der Complementärfarbe der ermüdenden Farbe auf beliebige reagirende Reize kann also auch für diese Theorie die einfache Zurückführung auf rein quantitative Veränderungen der normalen Reizeffecte nicht ohne weiteres versuchen lassen. Zu allem Ueberfluss kommt aber nun noch ein weiterer seit längerer Zeit bekannter Kreis von Thatsachen zu dem ganzen Material des Fechner-Helmholtz'schen Satzes hinzu, der erst unten in seiner ganzen Bedeutung für unsere Frage zur Sprache gebracht werden soll. Dieser complicirt im Verein mit jenem den Versuch einer so einfachen Erklärung der negativen Nachbilder noch von einer ganz anderen Seite her und lässt ihn, so viel ich zu sehen glaube, ohne Rettung seitens weiterer Hülfs-hypothesen als aussichtslos erscheinen. Die Ausgestaltung der zweiten Hypothese einer

aufgefunden werden kann. Es müsste nämlich von ihr eine Sättigungssteigerung der unbetheiligten Grundfarben erwartet werden. Ist z. B. Roth auf gleich hellem grauem Grunde fixirt und ermüdet worden, so müsste die Betrachtung eines rein grünen oder rein violetten Feldes ein hinreichend deutliches, quantitativ gleichwerthiges Nachbild sehen lassen, wie die Betrachtung eines rothen oder grauen Feldes, welches aber keine Verschiebung zur Complementärfarbe von Roth bedeutet, sondern eben eine Steigerung des Grün und Violett in seiner Eigenart. Denn Grün und Violett wären ja eben so stark erholt, als Roth ermüdet ist. Wie aber eben erwähnt, liegt es gerade im Wesen des negativen Farbenachbildes, nicht eine Modification von bestimmter vergleichbarer Quantität überhaupt, sondern eine qualitativ ganz besonders gerichtete, d. h. eben hier nach dem zu Roth complementären Blaugrün hinstrebende Modification jeder reagirenden Farbe zu bedeuten. Außerdem könnte ja auch das Nachbild nicht, wie es thatsächlich der Fall ist, durch die Beimischung der fixirten Farbe, sondern nur durch das zur reagirenden Farbe selbst jeweils complementäre Licht ausgeglichen werden.

relativ selbständigen Erregungsbeimischung auf Grund secundärer Substrate oder im Regenerationsvorgang selbst gelegener Dispositionen, aber in Abhängigkeit von beliebigen reagirenden Helligkeitsreizen, wird daher als die im allgemeinen zunächst wahrscheinlichste Auffassung zu betrachten sein, womit freilich die theoretische Bedeutung der negativen Nachbilder, die mitunter schon als Kriterien zwischen Theorien dienen sollten, bedeutend herabgesetzt erscheint. Es ist indessen auf Grund ganz besonderer formaler Beziehungen doch auch möglich, wenigstens die Vierfarbentheorie durch besondere Hülfs hypothesen, die im Grundgedanken von Hering bereits hervorgehoben worden sind, in der Weise auszugestalten, dass sie alle qualitativen und quantitativen Eigenthümlichkeiten der negativen Farbnachbilder auf beliebigen reagirenden Reizen widerspruchslos als bloße Erregbarkeitsveränderungen der normalen Substrate gegenüber den normalen Reiztendenzen zu erklären vermag, allerdings nur in der Weise, dass von vorn herein die Beziehung zwischen Reiz und Substrat in einem neuen Lichte erscheint. Was diesem ganzen System noch ein besonderes Interesse verleiht, ist die Möglichkeit, jene Hülfs hypothesen durch die Darstellung der Vierfarbentheorie als einfachsten Specialfalles der Wundt'schen Stufentheorie relativ am natürlichsten erscheinen zu lassen. Die hier in Kurzem angedeutete Entwicklung soll sich jedoch erst einer mehr historischen Betrachtung der Zuspitzung des ganzen Problems anschließen, welche zugleich wichtige der bisherigen Aufgabe ferner gelegene Gesichtspunkte beizuziehen hat. Es lag nahe, dass auch diese Seite des Problems der negativen Nachbilder in seiner Bedeutung für die Auffassung von den Erregbarkeitsveränderungen der Farbsubstrate zum ersten Male von Seiten der Helmholtz'schen Schule näher ins Auge gefasst worden ist, nachdem eine specielle Seite des Begriffs der Erregbarkeitsveränderung als »Ermüdung« schon im Mittelpunkte von Helmholtz' eigenen Anschauungen über die Natur dieser Nachbilder gestanden hatte. So suchte Exner<sup>1)</sup> aus der relativen Einschränkung der Modification auf die ermüdende Farbe selbst den Charakter dieser bestimmten Farbe als Grundfarbe im Sinne der Young-Helm-

<sup>1)</sup> S. Exner, Ueber einige neue subjective Gesichterscheinungen, Pflüger's Archiv f. Physiol. 1. Bd. 1868, S. 375, bezw. S. 389 ff. Vergl. auch I. Theil dieser Arbeit, Einleitung.

holtz'schen Theorie zu erschließen, wie es der oben als einfachste Sachlage geschilderten Voraussetzung entspräche, und glaubte Roth, Grün und Blau (nicht Violett) in dieser Weise ausgezeichnet zu finden. Nach Fixation von Grün erschienen z. B. Roth, Indigblau und Violett gesättigt und nur Grün und seine Nachbarschaft in der Sättigung herabgesetzt. Damit wäre nun freilich der Erfolg des negativen Nachbildes für die bei der Ermüdung unbetheiligten reagirenden Farben in einfachster Weise erledigt, indem der Proportionalitätsfactor für diese fremden Reactionsfarben = 0 erklärt würde. Es wäre also nach den Exner'schen Resultaten die ganze Verschiebung jeweils als eine ganz interne Frage für den Erfolg einer ganz bestimmten Gruppe von Reizen zu betrachten, die ein für allemal dem ermüdeten der drei Grundelemente in einfachster Weise zugeordnet sein sollen. Sie allein würden auf die Erregbarkeitsveränderung überhaupt »reagiren«.

Diese Resultate sind jedoch durch die ungefähr zwanzig Jahre später veröffentlichten Untersuchungen von Hering<sup>1)</sup> und C. Hess<sup>2)</sup> in den wesentlichsten Punkten berichtigt worden, durch welche zugleich die Unbrauchbarkeit einer so einfachen Betrachtungsweise zur Erklärung der negativen Farbennachbilder in ihrem Auftreten auf den verschiedensten reagirenden Farben dargethan wurde. Die Arbeit von C. Hess vervollständigte die Versuche Hering's unter dessen eigener Mitwirkung in systematischer Weise und ergab sich aus alledem, dass nach Ermüdung mit jeder beliebigen Farbe, also auch mit jeder etwaigen Grund- oder Urfarbe, jede andere reagirende Farbe bei nicht zu großer Intensität (im Verhältniss zur Stärke der Ermüdung) deutlich nach der Complementärfarbe hin verschoben erscheint, während die letztere selbst einfach in ihrer Sättigung gesteigert, die ermüdende Farbe herabgesetzt ist, was für einige Fälle in exacter Weise durch Ausgleichung des Nachbildes gemessen wurde. Die theoretische Discussion der Resultate zeigt sodann an Constructionen am Farbendreieck, dass durch eine Herabsetzung der Erregbarkeit

<sup>1)</sup> Hering, Ueber die von v. Kries wider die Theorie der Gegenfarben erhobenen Einwände. 2. und 3. Mittheilung, Pflüger's Archiv Bd. 43, S. 264 und S. 329.

<sup>2)</sup> C. Hess, Ueber die Tonänderung der Spectralfarben durch Ermüdung der Netzhaut mit homogenem Lichte. Arch. f. Ophthal. XXXVI, 1. S. 1 ff.

für eine der drei Grundfarben nach der Dreifarbentheorie die bei der Ermüdung nicht wesentlich betheiligten Farben im Gegensatze zu den Thatsachen höchstens ganz kleine Verschiebungen nach der zur ermüdenden complementären Farbe hin erleiden könnten. Nach Ermüdung für Roth könnte z. B. selbst das nicht völlig gesättigte Violett höchstens ein klein wenig nach Grün hin verschoben werden, wie es eben durch den theilweisen oder völligen Ausfall der Rothcomponente einträte, die bei dem in neutraler Stimmung gesehenen Violett nach dieser Theorie betheiligt ist, ganz zu schweigen von der Unverrückbarkeit der reinen Grundfarben Grün und Violett. Auch ist ein Recurs auf eine relativ größere Betheiligung der ermüdeten Grundfarbe an allen anderen gewöhnlich wirklich gesehenen Farben nutzlos, da er einerseits die thatsächliche Sättigung der reagirenden Farben und andererseits die zu dem wirklichen Erfolg nothwendige Einseitigkeit der Ermüdung nicht mehr erklären könnte. Damit war nun der Werth eines negativen Farbennachbildes auf beliebigen anderen Farben einstweilen soweit bestimmt, dass er unter keinen Umständen für gewisse passend ausgewählte Intensitätsstufen der reagirenden Farben annähernd = 0 werden kann, wie es die Dreifarbentheorie in Verbindung mit der einfachen Ermüdungstheorie ohne Hinzunahme positiv complementärer Nachbilder verlangen würde. Indessen war damit eben noch nichts über die Möglichkeit des Auswegs mit den positiven constanten Beimischungen entschieden, d. h. es war in keiner Weise etwas darüber ausgemacht, welche Gesetzmäßigkeit nun diese zur fixirten Farbe complementäre Verschiebung einhält, wenn die reagirende Farbe in ihrer Intensität variirt wird, wie schon im zweiten Theile hervorgehoben wurde. In den allgemeinsten Grundzügen der Hering'schen »Gegenfarbentheorie« lag freilich zugleich ohne weiteres, wenigstens für den Erfolg des Nachbildes auf der zur ermüdenden complementären Erregung, die unmittelbare Annahme der Gesetzmäßigkeit des Fechner-Helmholtz'schen Satzes enthalten. Denn die Beschränkung der Erregbarkeitsveränderung auf das eine der voneinander relativ unabhängigen Substrate schließt doch jederzeit zugleich für die complementäre Erregung als eine Leistung des nämlichen Substrates die Möglichkeit einer zur Intensität proportionalen Verschiebung unmittelbar in sich, und liegt in der Ver-

bindung dieser entgegengesetzt gerichteten Erregbarkeitsveränderungen für beide Complementärfarben gerade die Stärke dieser Theorie. Aber zunächst war doch gerade auch in dieser Theorie vor allem an die Entstehung positiver complementärer Erregungen gedacht, wie Hering selbst betont hat.

#### B. Die neue Complication des Problems durch den v. Kries'schen Satz.

Ogleich aber nun zur Zeit der Hering-Hess'schen Versuche über die Tonänderung der Spektralfarben noch keine Messungen vorlagen, die sich, wie die meinigen, ausdrücklich auf diese ganz allgemeine Fragestellung nach der Abhängigkeit des Nachbildwerthes von der reagirenden Intensität bezogen, so war schon längere Zeit vor den Hering-Hess'schen Versuchen ein ebenso sicheres als wichtiges Gesetz bekannt geworden, das zwar nur eine specielle Seite dieser Fragestellung, diese aber auch mit großer Exactheit beantwortet. v. Kries, dessen fördernde Thätigkeit in der Messung von negativen Nachbildern überhaupt schon im ersten Theil hervorgehoben wurde, hat auch hier das Verdienst, zum erstenmale das Gesetz als eine besondere Thatsache erkannt und innerhalb der weitesten Grenzen geprüft zu haben, dass alle Farbengleichungen für jede Erregbarkeitsveränderung auf der prüfenden Sehfeldfläche ihre Gültigkeit behalten<sup>1)</sup>. Er selbst hat dieses Gesetz einfach als »Ermüdungssatz« bezeichnet<sup>2)</sup>, doch soll es weiterhin ein für alle mal »v. Kries'scher Satz« genannt werden. Die Bedeutung desselben für unsere Frage ist indessen keineswegs eine einfache Sache. Denn die allgemeine Bestimmung, dass die Farbengleichungen für jede beliebige Erregbarkeit gelten, ist eine rein formale und sagt noch gar nichts über den Inhalt der wirklich vorhandenen Empfindungen, bezw. Erregungen aus, welche unter all diesen Umständen für die beiden Gemische immer gleich sind. Ohne diese nähere Bestimmung, die zunächst noch nicht

<sup>1)</sup> J. v. Kries, Beitrag zur Physiologie der Gesichtsempfindungen. Arch. f. Anatomie u. Physiologie 1878, S. 503.

<sup>2)</sup> Nochmalige Beiträge zur Theorie der Gesichtsempfindungen. Arch. f. Physiologie 1888, S. 380.

gegeben war, läßt aber das Gesetz in unserer Frage noch verschiedene Möglichkeiten zu. v. Kries selbst hatte es sogleich zu benutzen versucht, um die besonders einfache Zurückführung desselben auf die Dreifarbentheorie darzuthun. Wenn alle Farberregungen auf so wenige, je einer einzigen Grundfarbe entsprechende Substrate zurückgeführt werden, als es für eine bestimmte Erregbarkeit in allen Substraten nach dem Newton'schen Mischungsgesetz überhaupt möglich ist, und dies sind eben drei, so müssen alle gleich aussehenden Farbmischungen immer die nämlichen actuellen Erregungen der drei Substrate darstellen. Da nun bei der Annahme eines positiven Zusammenwirkens aller drei Substrate bei jeder Combination ihrer Erregungen (ohne antagonistische Aufhebung) die Wirkungsfähigkeit eines jeden Reizes in Bezug auf jede Substanz in der Erregung voll zur Geltung kommt, so müssen auch alle drei Kraftcomponenten der gleich aussehenden Reizgemische jederzeit gleich sein. Wegen dieser Identität der drei Componenten müssen also auch alle Erregbarkeitsveränderungen innerhalb der drei Substrate für beide gleich aussehenden Mischungen in der nämlichen Weise zur Geltung kommen und dem v. Kries'schen Satze ist in der denkbar einfachsten Weise durch die Theorie Genüge geleistet. Es ist aber klar, dass diese specielle Deutung des v. Kries'schen Satzes nicht nur mit der in ihm enthaltenen formalen Thatsache allein, sondern zugleich mit dem Aussehen der Farben und den näheren Qualitätsverhältnissen der Veränderung übereinstimmen müsste, wie sie als Ergebniss der Erregbarkeitsveränderung für die verschiedenen Farben zutreffen. Hierin musste aber v. Kries von der Dreifarbentheorie aus die nämlichen Erwartungen hegen wie Exner, dessen Resultate bei jener ersten Veröffentlichung des Satzes auch thatsächlich noch nicht angegriffen worden waren. Der erwähnte Hering-Hess'sche Nachweis, dass die Dreifarbentheorie die Ermüdungsveränderungen auf beliebigen Farben nicht als Erregbarkeitsveränderungen erklären könne, war also offenbar gleichzeitig eine Widerlegung einer derartig einfachen Deutung des v. Kries'schen Satzes, vorausgesetzt natürlich wieder, dass man die Modificationen beliebiger Farben wirklich als Erregbarkeitsänderungen und nicht bloß als einfache Beimischung aufzufassen genöthigt sein sollte. Ob man für die oben genannten Constructionen am Farbendreieck in der Hess'schen Polemik die Farben

in verschiedener physikalischer Beschaffenheit denkt, ob man also das Violett einmal z. B. als homogen, das anderemal als aus Roth und Blau gemischt annimmt, kann ja gerade von der Dreifarbentheorie aus wegen ihrer eindeutigen Zurückführung alles gleich Aussehenden auf identische Reizcomponenten an dem Gedankengang der Polemik nichts ändern. Jede solche nach der Erregbarkeitsveränderung aufrecht erhaltene Farbengleichung vermehrt nur die Fälle, welche wegen des besonderen Inhaltes der auf beiden Seiten gleichmäßigen Modification, d. h. wegen der zu großen Verschiebung nach der zur ermüdenden complementären Farbe, von der Dreifarbentheorie unter der genannten Voraussetzung nicht mehr erklärt werden können.

Indessen schien der Standpunkt v. Kries' doch wenigstens für eine bestimmte Gruppe von Mischungen die Modification des Farbentones thatsächlich als einfache Erregbarkeitsveränderung der drei Substrate in bestimmten Verhältnissen und nicht bloß als Beimischung betrachten zu lassen, wo eine solche Auffassung für Theorien mit der Annahme mehrerer Componenten größere Complicationen herbeiführen musste oder sogar völlig unzugänglich war, insbesondere falls man an einer unveränderlichen Zuordnung der Wirkungsfähigkeit einer Wellenlänge zu einer beschränkten Zahl von Substraten festhalten wollte, wie dies in allen früheren Theorien der Fall war. Solche kritische reagirende Gemische sind die sehr wenig gesättigten Gemische, deren physikalische Beschaffenheit bei gleicher Empfindung eine besonders verschiedenartige sein kann, wie es ihre Lage inmitten des Farbdreiecks am unmittelbarsten versinnlicht. Auch das Grau erleidet nun jederzeit eine zur Ermüdungsfarbe complementäre Verschiebung, und zwar dem v. Kries'schen Satze gemäß ohne Rücksicht auf seine physikalische Zusammensetzung, gleichgültig also, ob es z. B. aus Roth und Grünblau oder aus Gelb und Blau oder aus allen Farben des Spektrums überhaupt gemischt ist. Nach einer Ermüdung durch Roth wird z. B. dieses beliebig entstandene Grau jederzeit einen grünblauen Ton annehmen. Offenbar ergibt sich aber nun unter Voraussetzung der Dreifarbentheorie hier die Möglichkeit, diese Modification des Grau im Einklange mit dem v. Kries'schen Satze bis zu einer ziemlichen Quantität der Verschiebung aus einer Erregbarkeitsveränderung der rothen Substanz herzuleiten. Denn die größere Leistungsfähigkeit der Grundfarben Grün und Violett, gegen-

über dem Roth, die nach der Dreifarbentheorie in jedem Grau mit äquivalenter Kraft gereizt werden, muss in unserem Beispiel ein entsprechend starkes Vorwiegen von Grün und Violett, also des zu Roth complementären Grünblau im reagirenden Grau herbeiführen. Und das nämliche gilt auch für alle beliebigen zwischen den Grundfarben liegenden Ermüdungsfarben. Jede einseitige Ermüdung muss innerhalb des reagirenden Grau mit entsprechender Stärke als Verschiebung zur Complementärfarbe zur Geltung kommen, weil in diesem Gemisch alle Reizcomponenten in annähernd gleicher Kräftevertheilung betheilig sind, eine Eigenthümlichkeit der wenig gesättigten Gemische, deren Fehlen in den vom ermüdeten Substrat entfernteren homogenen Farben gerade die Hering-Hess'sche Kritik der Exner'schen Resultate möglich gemacht hatte. Man braucht auch nur in der von Hess in seiner Polemik ausgeführten Construction, die von der ermüdenden Farbe durch die reagirende hindurchgehende Linie zu ziehen, welche die Veränderungsrichtung der reagirenden nach der Dreifarbentheorie angibt, und man sieht auf den ersten Blick, dass dieselbe eben deshalb wirklich direct auf die Complementärfarbe hinführt, weil sie eben für reagirendes Grau durch den Weißpunkt hindurchgeht<sup>1)</sup>. Dies kann aber natürlich die Position für die Dreifarben-

<sup>1)</sup> Es würde wenigstens für diejenige Reihe reagirender Farben, welche sich von der ermüdeten Grundfarbe in voller Sättigung durch Grau hindurch bis zur Complementärfarbe erstreckt, abgesehen von der Uebereinstimmung mit der wirklich beobachteten Qualität auch hinsichtlich der beobachteten quantitativen Verhältnisse, wie sie oben festgestellt wurden, eine ziemliche Verträglichkeit vorhanden sein. Aus den nämlichen Gründen, aus denen die Polemik gegen die Dreifarbentheorie nach den obigen Ausführungen profitirte, weil nach ihnen die Ermüdung einer Grundfarbe für die anderen reinen Grundfarben nach der Dreifarbentheorie keine Farbentonänderung, sondern nur eine Steigerung des ihnen eigenen Farbtones in seiner Sättigung hervorbringen könnten, würde die genannte Reihe reagirender Farben von der ermüdeten Grundfarbe bis zu ihrem Complemente nur eine bis etwa zur Hälfte fortschreitende Abnahme des Nachbildwerthes bedingen, wenn man nur eine gleichzeitige gleich starke Erholung der Grundfarben für die Schfeldstelle der Ermüdungsfarbe voraussetzt, falls z. B. Roth neben Grau von gleicher Helligkeit fixirt wurde. Denn diese Reihe reagirender Farben entsteht ja durch fortschreitende Ersetzung der ermüdeten Farbe durch die beiden nicht ermüdeten Grundfarben zu ungefähr gleichen Theilen. Thatsächlich scheint aber auch der Nachbildwerth für alle anderen reagirenden Reize mit der Entfernung von der Ermüdungsfarbe etwas abzunehmen, wie oben festgestellt wurde. Dieser positiven Instanz stehen aber eben zu viele principielle negative gegenüber.

theorie nicht verbessern, wenn doch die Erscheinung des Nachbildes auf den übrigen Reactionsfarben, abgesehen von der hier herausgegriffenen Linie innerhalb des Farbencontinuums mit den aus der Theorie nothwendig folgenden Erwartungen nicht übereinstimmt. Indessen kam es uns in diesem ganzen Zusammenhang zunächst überhaupt nur darauf an, dass die Dreifarbentheorie für jedes beliebig combinirte Grau thatsächlich einen bestimmten Nachbildwerth als Ausdruck einer Erregbarkeitsveränderung abzuleiten im stande ist, wie ihn der v. Kries'sche Satz fordert, und dass dies im besonderen möglich ist, ohne über die Beziehung der Reize zu den von ihnen erregbaren Substraten eine andere Bestimmung zu treffen, als die der ausschließlichen Zuordnung bestimmter Wellenlängen der Grundfarben zu bestimmten Substraten, mit entsprechender Vertheilung der Substrate unter die Misch- und Zwischenfarben. Hingegen würde eine andere Theorie, welche wie die Hering'sche vier Urfarben annimmt, oder überhaupt jener Mindestbeschränkung der möglichen Substrate in der Dreifarbentheorie entbehrt, die genannte gleichmäßige complementäre Verschiebung eines beliebig gemischten Grau niemals als Ergebniss einer einfachen Erregbarkeitsveränderung der vorhandenen Substrate erklären können, unter der Voraussetzung, dass sie ebenso wie die Dreifarbentheorie eine einfachste Zuordnung von Reiz und Erregung beibehalten wollte. Zwar könnte die Hering'sche Theorie z. B. auch trotz einer solchen eindeutigen Zuordnung erklären, wie nach Fixation von Urroth auf einem aus Roth und Grün gemischten Grau ein Farbennachbild als Ausdruck einer Erregbarkeitsveränderung in der Roth-Grün-Substanz zu stande komme, und ihr eigenstes Wesen als Gegenfarbentheorie würde es ihr auch besonders bequem machen, die ungefähre Constanz des Werthes für Roth, Grau und Grün von gleicher Helligkeit zu erklären, falls nur das stets zusammengehörige Paar der Ermüdungs- und Erholungsfactoren ungefähr gleich groß angenommen wird. Die Theorie müsste indessen versagen, wenn sie die nämliche Quantität der Grünfärbung für ein aus Ur-Gelb und Blau gemischtes Grau als einfache Erregbarkeitsveränderung erklären soll, falls eben wirklich der Gelb- und Blau-Reiz überhaupt nur die Gelb-Blau-Substanz etwas angehe und jener einfachsten Beziehung zwischen Reiz und Substrat entsprechend für die Roth-Grün-Substanz gar niemals in Betracht kommen könnte. Die

Erregbarkeitsveränderung innerhalb der Roth-Grün-Substanz durch Fixation des Roth könnte unter solchen Voraussetzungen offenbar in der ausschließlichen Summation von Gelb und Blau ohne alles Roth und Grün, welche ihrem Helligkeitswerth nach dem Grau aus Roth und Grün entspricht, überhaupt nicht zur Geltung kommen, geschweige gleich mit einem ebenso großen Werthe, als er der reagirenden Intensität des aus Roth und Grün gemischten Grau gerade nach dieser Theorie entsprechen muss. Auch geht es nicht an, ausschließlich die Resultanten aus dem anatagonistischen Prozesse als reagirende Größen für die Erregbarkeitsveränderung gelten zu lassen<sup>1)</sup>. Es ist eben für jedes der beiden Graugemische, welches in neutraler Stimmung die Farbenresultante = 0 besitzt, der Nachbildwerth annähernd ebenso groß, wie für ein reines, vollgesättigtes Grün oder Roth von der nämlichen Intensität, bei welchem also die Resultante so groß ist wie die Summe der absoluten Werthe der in Grau zur Resultante 0 gemischten Farben Grün und Roth oder Gelb und Blau. Ebensowenig kann man natürlich jene einfachste Zuordnung von Reiz und Substrat etwa in der Weise zu retten versuchen, dass man zur Erklärung des Nachbildes für das aus Blau und Gelb gemischte Grau, nach Ermüdung durch Roth, eine positive Grün-Beimischung annimmt, falls man das gleich große Nachbild auf reinem Roth, Grün oder aus Grün und Roth gemischtem Grau durch Erregbarkeitsänderung erklären wollte, weil ja sonst bei letzterem doch eine Superposition der beiden Factoren stattfinden müsste. Man dürfte eben dann, wie dies schon immer angedeutet, den an sich in unserer Frage wegen des Fechner-Helmholtz'schen Satzes so werthvollen Begriff der Veränderung der Farbenerregbarkeit der vorhandenen Substrate überhaupt nicht hereinziehen, sondern müsste alles aus Beimischungen erklären und sich mit dem Fechner-Helmholtz'schen Satze im Ganzen irgendwie anders abfinden, wie es später noch ausführlich zur Sprache kommen soll.

Vor allem ist aber bei Festhaltung der alten Zuordnung von Reiz und Substrat auch eine antagonistische Theorie wenigstens um nichts besser daran als die Dreifarbentheorie, wenn es sich um die Auffassung

<sup>1)</sup> Vergl. G. E. Müller, Zur Psychophysik der Gesichtsempfindungen. Zeitschrift f. Psychologie Bd. X 1896, S. 324.

der Nachbilder auf den bei der Ermüdung durch eine Urfarbe unbetheiligten anderen Urfarben als Erregbarkeitsveränderungen handelte. Zwar hätte sie hinsichtlich der Complementärfarbe, wie schon erwähnt, ohne weiteres eine günstigere Stellung auch nach dieser Richtung und für die anderen Urfarben wäre wenigstens eine positiv complementäre Beimischung, wenn auch ohne nähere Festlegung des quantitativen Verhältnisses, in einfacherer Weise aus den sonstigen Leitsätzen der eigens hierauf angelegten Theorie zu erklären. Indessen bliebe es noch völlig unerklärt, wie jene bei der Ermüdung unbetheiligten Urfarben proportional zu ihrer eigenen reagirenden Intensität nach der zur ermüdenden complementären Farbe verschoben sein können, wie es uns nunmehr ganz sicher feststeht. Es könnte sich z. B. niemals eine solche durch Rothermüdung bewirkte Verschiebung der Urfarbe Gelb nach Grün hin als Ergebniss der Erregbarkeitsveränderung innerhalb der Roth-Grünsubstanz darstellen, falls die den Nachbildwerth bestimmende reagirende Intensität des Gelb- (oder Blau-) Reizes zu der Rot-Grünsubstanz in gar keiner Beziehung stände, wenn vielmehr für den Gelbreiz nur die Erregbarkeitsveränderungen der Blau-Gelbsubstanz eine Bedeutung hätten. Die völlige Abtrennung des Nachbildes als positive Beimischung, wovon später noch die Rede sein soll, wäre auch hier wieder der einzige Ausweg, der die antagonistische Vierfarbentheorie selbst mit ihren wichtigsten Hilfsmitteln wieder ganz unbenützt lassen würde.

Diese Gesichtspunkte waren es nun, welche v. Kries als Schwierigkeiten für eine mehrcomponentige Farbentheorie, im Anschluss an seinen Ermüdungssatz, gegen Hering geltend machte, indem er die einfachste Zuordnung von Reiz und Substrat als selbstverständlich für alle Theorien voraussetzte<sup>1)</sup>. Hering aber erweiterte dem gegenüber im Einklange mit dem Grundgedanken seiner Theorie jene bis dahin für selbstverständlich gehaltene enge und einfache Beziehung zwischen Reiz und Substrat, welche entweder den Grundfactor jeder derartigen Beziehung, den Erregbarkeitsfactor mit seinen Veränderungen, für die Theorie unverwerthbar machte oder aber bei seiner Benützung je nach den sonstigen Voraussetzungen in die oben genannten Schwierigkeiten der einen oder der anderen Art verwickelte.

<sup>1)</sup> Vgl. Anm. 1, S. 622.

### C. Hering's Annahme latenter Reizmomente.

Der Grundgedanke der Hypothese Hering's, welche je nach Lage der Erregbarkeitsverhältnisse von sämtlichen homogenen Farbenreizen und Reizgemischen alle Urfarbenerregungen proportional zu ihrer Intensität abhängig denken kann, besteht darin, dass sämtliche Farbenreize im allgemeinen für jeden Urprocess und mindestens für drei derselben ein sog. »Reizmoment« von verschiedener Größe in sich enthalten, wie die in den Reizen enthaltene Theilursache zur thatsächlichen Erregung mit Bezug auf eine bestimmte Erregbarkeit im Substrate selbst in bekannter Analogie zur Physik des Hebels bezeichnet wird. Dass eine bestimmte Art homogenen Lichtes überhaupt jemals eine relativ gesättigte Farbenempfindung erregen kann, beruht hiernach nur darauf, dass in Folge des Antagonismus zwischen den auf gegenfarbige Prozesse hinstrebenden Reizmomenten für eine einzige Urfarbe, bezw. für je eine in jedem Substrat, ein hinreichender Ueberschuss einer nicht compensirten Farbenkraft übrig bleibt. Insbesondere ist ein homogenes Licht dann urfarbig, wenn sich die beiden gegenfarbigen Momente, welche sich auf die zweite Farbensubstanz beziehen, bei den augenblicklich vorhandenen Erregbarkeitsverhältnissen dieser Substanz gegenseitig gerade vollständig compensiren, so dass nur die Wirksamkeit auf die eine Substanz übrig bleibt. Diejenige Wellenlänge, welche z. B. in neutraler Stimmung das reine Urblau erregt, besitzt auch für die beiden gegenfarbigen Prozesse Rot und Grün in der von der Blau-Gelbsubstanz unabhängigen Rot-Grün-Farbensubstanz je ein Reizmoment. Nur sind eben diese gegenfarbigen Prozesse Roth und Grün einander gleichwerthig, so dass diese beiden Nebenmomente des Blaureizes für den farbigen Gesamteffect ebenso irrelevant sind, wie bei einem Grau, das aus den Reizen Urroth und Urgrün gemischt ist<sup>1)</sup>. Die Helligkeitscomponente ist für diese Theorie ohnehin eine Sache für sich, welche nicht erst von den Reizmomenten für die Farbensubstanzen abhängig, sondern

1) E. Hering, Ueber Newton's Gesetz der Farbenmischung. *Lotos. Jahrbücher f. Naturwiss. Neue Folge VII 1887*, S. 177, speciell S. 254 und Beleuchtung eines Angriffs auf die Theorie der Gegenfarben. *Pflüger's Archiv Bd. 41. 1887*, S. 29, speciell S. 38 ff.

denselben als ein besonderes Moment coordinirt ist, so dass also aus dieser hypothetischen Annahme der zur Farblosigkeit aufgehobenen Nebenmomente keine Schwierigkeit hinsichtlich der Helligkeit der resultirenden Farbe entsteht. Dabei ist es für diese ganze Betrachtung gleichgültig, ob die Theorie seitens des Blaureizes eine gleichmäßige Steigerung der beiden gegenfarbigen Prozesse in der Roth-Grünsubstanz anregen lässt, welche als Farblosigkeit erscheint, oder ob die entgegengesetzt gleichen Momente selbst jeden allein für sich zur Farbenempfindung führenden Process innerhalb der Substanz gegenseitig unmöglich machen. Der ganze Sinn des »Reizmomentes« besteht doch immer nur in einer Beziehung des Reizes auf eine bestimmte Erregbarkeit des Substrates. Wenn man also auch die Momente sich gegenseitig unmittelbar zur völligen Wirkungslosigkeit für die Substanz aufheben lässt, so ist jederzeit schon vorausgesetzt, dass die Erregbarkeiten der Substanz nach beiden Seiten hin derartig sind, dass die Wirkung des einen Reizes innerhalb der Substanz derjenigen des anderen ohne jene Compensation entgegengesetzt gleich wäre und nur deshalb beim Zusammentreffen mit dieser sich zur Ruhe compensirt. Somit ist es aber nun auch für die ganze Leistungsfähigkeit der Hering'schen Hypothese eine nothwendige Voraussetzung, dass man die Erregbarkeitsfactoren nicht erst nach einer Subtraction der antagonistischen Reizwerthe nur für die Resultanten in Anschlag bringt. Wie es in dem Hering'schen Begriffe des Momentes von Anfang an enthalten liegt, müssen die antagonistischen Momente vielmehr bereits aus den vergleichbaren Reizeinheiten und der speciellen Erregbarkeit berechnet werden.

Nur durch die Hypothese jener Nebenmomente wird es nun auch möglich, dass ein in neutraler Stimmung indifferentes Grau, das aus urblauen und urgelben Reizen gemischt ist, z. B. nach Fixation von Urroth ebenfalls grünblau gefärbt erscheint, wie ein aus urrothen und urgrünen Reizen gemischtes Grau, wie es dem v. Kries'schen Satze gemäß wirklich geschieht. Durch die Fixation des Roth sind die Erregbarkeiten der Roth-Grünsubstanz nach den beiden Seiten hin in der Weise verändert, dass ein relativ stärkerer Rothreiz als bisher nothwendig ist, um eine Rotherregung von solcher Quantität hervorzu- bringen, dass sie z. B. einer bestimmten Grünerregung gerade die Wage

hält, die nun ihrerseits einem geringeren Grünreiz entspricht, wie in neutraler Stimmung. Das rothgrüne Grau von vorher hat also jetzt einen Ueberschuss an Grünerregung. Es wird daher aber nun auch der in neutraler Stimmung urblaue Reiz mit seinen beiden Nebenreizmomenten in der Roth-Grünsubstanz eine Grünerregung auslösen, weil ja diese beiden antagonistischen Momente nur für die neutral gestimmten Erregbarkeitsverhältnisse innerhalb der Roth-Grünsubstanz einander gleichwerthig waren, jetzt aber einen Ueberschuss an Grünerregung erzeugen müssen. Dieser Ueberschuss wird zugleich der gesammten Reizintensität proportional sein, weil natürlich die Nebenmomente als eine integrirende Seite des Reizes seiner Intensität proportional gehen und deshalb auch nach dem Fechner-Helmholtz'schen Satze auf das Nachbild reagiren. Ebenso wird aber auch der gewöhnlich urgelbe Reiz, welcher mit jenem Urblau zu Grau zusammengemischt ist, je ein Roth- und ein Grünmoment besitzen, die sich in neutraler Stimmung gerade compensiren, nach der »Ermüdung« durch Roth aber eine zur Intensität des Reizes selbst proportionale Grünerregung erzeugen. Das aus Blau und Gelb gemischte Grau wird also schließlich nach der Rothermüdung eine der Gesamtintensität proportionale Verschiebung nach Grün zeigen, da sich die Grünwerthe addiren. Die Blau- und Gelbmomente werden sich aber ebenso wie vorher in der neutralen Stimmung compensiren, da ja innerhalb der Blau-Gelbsubstanz durch Fixation des Urroth keine Veränderung in den Erregbarkeitsverhältnissen entstanden ist. Die Ermüdungsfarbe des Urroth hat ja zwar ihrerseits neben dem weitaus überwiegenden Reizmoment für die Rotherregung und dem jedenfalls sehr kleinen Moment für das gegenfarbige Grün auch wiederum zwei gleichwerthige Reizmomente für Urblau und Urgelb. Diese letzteren beiden werden aber ebensowenig eine Verschiebung des Erregbarkeitsverhältnisses innerhalb der Blau-Gelbsubstanz herbeiführen können, als überhaupt jemals die Fixation von indifferentem Grau negative Farbennachbilder herbeiführen kann.

Mit dieser Annahme von zwei gleichen und entgegengesetzten Nebenmomenten auch für jeden gewöhnlich urfarbigen Reiz wird aber nun auch unmittelbar begreiflich, dass nicht nur die besonders wenig gesättigten Farben ohne Rücksicht auf ihre physikalische Zusammensetzung proportional zu ihrer Intensität nach der Nachbild-

farbe verschoben erscheinen, was auch der Dreifarbentheorie noch relativ am erklärlichsten war. Die Hering'sche Hypothese gestattet nun auch alle Farbentonänderungen der von der Ermüdungsfarbe beliebig entfernten vollgesättigten Farben als Erregbarkeitsveränderungen proportional zu den reagirenden Intensitäten aufzufassen, wie es mir schon auf Grund meiner früheren Messungen als höchst wahrscheinlich erschienen war. Damit kommt erst die volle Einheitlichkeit in die gesammte Auffassung, falls man überhaupt einmal irgendwo die Erregbarkeitsveränderungen und nicht irgendwelche Beimischungen zur Erklärung der negativen Nachbilder als localer Adaptationserscheinungen einführen will. Unsere ganze letzte Ueberlegung an der Hand des Beispiels der Ermüdung des Urroth ist ja von den beiden Componenten Urblau und Urgelb ausgegangen, welche beide allein für sich proportional zur Reizintensität nach Grün hin verschoben erscheinen, weil sich bei dem Blau- oder Gelbreiz zu der Blau- bzw. Gelberregung einfach das aus den Nebenmomenten stammende und zum Blaureiz selbst proportionale Grün hinzuaddirt. Der Gesamteffect ist also der nämliche, wie wenn im neutralen Zustande der Roth-Grünsubstanz ein grünblauer Reiz gesehen würde, dessen Moment hinsichtlich der Roth-Grünsubstanz gerade in neutraler Stimmung nicht compensirt wird. Eine hinreichende Ermüdung durch Grün würde andererseits diesen in neutraler Stimmung als Grünblau gesehenen Reiz als Urblau erscheinen lassen, sobald nur die relative Steigerung der Rotherregbarkeit gegenüber der Grünerregbarkeit das Verhältniss des im Grünblau geringeren Rothmomentes zu dem jetzt herabgesetzten Grünmomente bis zur gegenseitigen Compensation verändert hat. Bei idealer Gültigkeit der Analogie zum Fechner-Helmholtz'schen Satze, gleichgültig mit welcher Proportionalitätsconstante, würde dann die einmal erreichte Verschiebung des Grünblau nach Urblau auch für alle anderen Intensitätsstufen dieses Farbenreizes vorhanden sein, was allerdings schon nach dem Hess'schen Resultate einer größeren Verschiebung in den unteren Intensitätsstufen nicht genau zutrifft, ohne dass dadurch, wie schon öfters erwähnt, die Auffassung der Verschiebung als Erregbarkeitsveränderung unmöglich gemacht würde.

Die Annahme der beiden gegenfarbigen gleich großen Nebenvalenzen bedeutet aber für die antagonistischen Farbentheorien eigent-

lich weiter nichts als eine Analogie zu dem bereits von Helmholtz für die Dreifarben- theorie ausgeführten Versuch, die Reizwirkung eines homogenen Reizes nicht auf die ausschließliche Erregung eines einzigen der drei Grundelemente einzuschränken, sondern jedem Reize eine Erregung aller drei Elemente zuzuschreiben. Aus der Ermüdung eines der drei Elemente konnte dann eine übernormale Sättigung eines Grundfarbenreizes abgeleitet werden, und besteht ja hierin auch der von Hess an der oben erwähnten Stelle als unhaltbar nachgewiesene Versuch, den Nachbildwerth auf den bei der Ermüdung nicht betheiligten homogenen Reactionsfarben abzuleiten. Der Nachtheil des analogen Versuches bei der Helmholtz'schen Dreifarben- theorie besteht eben darin, dass die Annahme der hypothetischen Nebenvalenzen immer auch eine gleichzeitige Sättigungsverminderung anzunehmen nöthigt, weil die Nebenvalenzen sich dort stets zu einer farblosen Helligkeitssteigerung frei auswirken. Erst für die antagonistische Farbentheorie konnte Hering von den Nebenvalenzen einen fruchtbareren Gebrauch machen, weil sie hier in Folge der Lostrennung des nach dieser Hypothese unveränderten Helligkeitsprocesses eine Veränderung der Sättigung, d. h. des Verhältnisses von farbigen und farblosen Processen vermeiden konnte.

Dennoch ist mit der Hypothese, soweit sie bis jetzt hier besprochen wurde, noch keineswegs alles erklärt, was nach dem v. Kries'schen Satze und der Analogie zum Fechner-Helmholtz'schen Satze von ihr gefordert werden muss. Es ist zwar für alle gleich aussehenden reagirenden Farbengemische bei beliebiger Ermüdungsfarbe eine qualitativ gleichartige Verschiebung überhaupt erklärt, welche zur Intensität der jeweils reagirenden Farbe mit irgend einem Proportionalitätsfactor direct proportional ist. Das aus Blau und Gelb gemischte Grau wird also in unserem Beispiele nach der Ermüdung des Urroth ebenfalls wie das aus Roth und Grün gemischte nach dem zu Roth complementären Grün verschoben, und zwar umsomehr, je heller das Grau aus Blau und Gelb ist. Es ist indessen noch nicht erklärt, warum auch die Quantität der Verschiebung für eine bestimmte absolute reagirende Helligkeitsstufe der Verschiebung des Grau aus Roth und Grün völlig gleichen soll, wie es die Erhaltung der Farbgleichungen nach dem v. Kries'schen Satze erfordert. Trotz beiderseitiger

directer Proportionalität zur Intensität des reagirenden Grau würde ja der Proportionalitätsfactor je nach der Combination des Grau noch verschieden sein, wenn die absolute Summe der »Nebenmomente« für die Roth-Grünsubstanz, die in ihren Erregbarkeitsverhältnissen ex dato allein verändert ist, in dem aus Blau und Gelb bestehenden Reize eine andere sein würde, als die absolute Summe der Reizmomente für die Roth-Grünsubstanz in den Grün- und Rothreizen, deren Mischung in neutraler Stimmung derjenigen aus Blau und Gelb gleich sieht. (Dabei ist nach dem oben ausführlich Gesagten überall vorausgesetzt, dass wir auch für Grau ebenso wie für jede Farbe eine wirkliche Verschiebung der Empfindung annehmen, welche nur aus den einzelnen antagonistischen Reizmomenten unter Berücksichtigung der neuen Reizbarkeiten und nicht erst aus ihren Resultanten abzuleiten ist.) Nur dadurch wird ja, wie gesagt, eine Specialisirung der Hypothese den v. Kries'schen Satz und zugleich die thatsächliche inhaltliche Veränderung sämtlicher Farbenempfindungen im negativen Nachbilde miteinander erklären können. Offenbar muss aber diese Specialisirung darauf abzielen, die Summen aller Reizwerthe für jede einzelne der sämtlichen Urfarben-erregungen in allen gleich aussehenden Gemischen als gleich groß erscheinen zu lassen. In dieser Richtung hat v. Kries selbst zugleich mit der Veröffentlichung seines Satzes, wie schon erwähnt, ein für alle Mal die einzige Möglichkeit dargethan, wie der Bestand der Farbengleichungen von den speciellen Erregbarkeiten unabhängig gedacht werden kann, und wird auch die Hering'schen Hypothese erst durch die Einhaltung dieser näheren Bestimmung neben ihrer bereits ermittelten Anpassung an die anderweitigen Thatsachen des Gebietes den vollen umfassenden Erklärungswert erlangen.

Von Hering selbst ist nun allerdings über die Größe aller Valenzen eines einfachen homogenen Reizes noch keine nähere Bestimmung ausgesprochen worden, aus der die gesammten Urvalenzen eines Gemisches auch für den Specialfall der gleich aussehenden Gemische abgeleitet werden könnten. Doch sind von ihm offenbar bereits ganz bestimmte Voraussetzungen über diese Gesamtvalenzen gleich aussehender Gemische selbst gemacht, welche mit denen von v. Kries als Annahme der Gleichheit sämtlicher Einzelvalenzen in diesen Gemischen übereinstimmen.

#### D. Verhältniss des v. Kries'schen Satzes zum Newton'schen Mischungsgesetze.

Aus der Darstellung von Hering in seiner Vertheidigung gegen v. Kries könnte nun jemand zu der Auffassung gelangen, als ob zu dieser Ableitung der Gleichheit aller »Urvalenzen« Gelb, Blau, Roth, Grün, Weiß (G, B, R, V, W) in gleich aussehenden Gemischen gar keine neue Hypothese nothwendig sei, als sie schon durch das allbekannte Mischungsgesetz Newton's gefordert werde. Denn Hering sagt, dass man letzteres nur von einem hinreichend allgemeinen und vorurtheilsfreien Gesichtspunkt betrachten müsse, wie er ihn selbst in seiner bekannten Darstellung des Newton'schen Gesetzes der Farbenmischung eingehalten hat, um einzusehen, dass G, B, R, V und W in allen gleich aussehenden Gemischen gleich seien<sup>1)</sup>. In der graphischen Darstellung dieses Gesetzes würde dies dadurch zum Ausdrucke kommen, dass für die verschiedenen Punkte der Farbentafel die Verhältnisse G : B : R : V : W immer andere und andere seien, so dass eine bestimmte subjective Qualität, gleichgültig wie sie physikalisch verursacht ist, stets nur mit diesen bestimmten absoluten Valenzen möglich sei. Gegen diese Behauptung Hering's ist nun allerdings sicherlich nichts einzuwenden, wenn man in das Newton'sche Gesetz der Farbenmischung all dasjenige einschließt, was Hering in dasselbe mit hineingenommen hat. Auch ist der Einwand v. Kries' gegen die Möglichkeit der Ableitung seines Satzes aus der Gegenfarbentheorie gerade durch Verwerthung der Hering'schen Hypothese zu widerlegen. Es ist aber wohl eben so gewiss, dass in den Thatsachen der Farbenmischung allein, wie sie von Newton erkannt wurden und von jeder speciellen Theorie über die übrigen Thatsachen des Farbensehens unabhängig formulirt werden können, die Nöthigung zu jener Annahme der Eindeutigkeit des Verhältnisses G : B : R : V : W für jeden Punkt der Farbentafel noch nicht enthalten ist. Es ist nur jedenfalls die Möglichkeit hierzu auch für die Hering'sche Theorie keineswegs ausgeschlossen, wie v. Kries gemeint hatte. Nur dadurch, dass Hering von vorn

<sup>1)</sup> E. Hering, Ueber die von v. Kries wider die Theorie der Gegenfarben erhobenen Einwände, 1. Mittheilung. Pflüger's Archiv, Bd. 42, S. 488 ff., speciell S. 498.

herein gleich die Erregbarkeitsveränderungen oder wenigstens den v. Kries'schen Satz in den Thatbestand des Newton'schen Gesetzes mit hineinnahm, musste natürlich auch sein Gesetz wenigstens den v. Kries'schen Satz gleich mit erklären<sup>1)</sup>. Die Farbenmischung ist aber natürlich ein Process, der von der Veränderlichkeit der Reizbarkeitsverhältnisse unabhängig betrachtet werden muss. Wenn gleich, wie Hering mit Recht betont hat, bei allem Sehen fortwährend Veränderungen der Reizbarkeit nebenhergehen und insbesondere also auch keine Farbengleichung einige Zeit betrachtet werden kann, ohne dass dergleichen Veränderungen mitfolgen, so setzt doch der physiologische Mischungsprocess mit seinem psychologischen Ergebniss stets die Wirkung einer ganz bestimmten augenblicklichen Erregbarkeit voraus, sein Erfolg ist nur von dem jeweiligen Zustande der Wechselwirkung zwischen Reiz und Substrat abhängig. Diese fertigen Prozesse oder Potenzen zu solchen bilden die Grundelemente des physiologischen Mischungsprocesses, gleichgültig, durch welche Erregbarkeiten dieselben zufällig herbeigeführt worden sind. Und zwar ist der Mischungsprocess, auf welchen sich das Newton'sche Gesetz bezieht, der in seinem Wesen an sich noch unbekanntere physiologische Thatbestand, in welchem zwei elementare Prozesse, die an sich gesättigte Farbenempfindungen begründen würden, zu dem neuen Vorgange zusammenwirken, wie er z. B. bei Mischung complementärer Farben zu weniger gesättigten Empfindungen oder bei Mischung benachbarter Farben zu relativ gesättigten mittleren Farbenempfindungen führt, während das physikalische Reizgemisch eine einfache Superposition bedeutet. Das Newton'sche Gesetz bezieht sich also auf das Resultat dieser complexen Prozesse, und findet in der Dreifarben Theorie in der Hypothese der positiven Mitwirkung aller Farbensubstrate in dem Weißprocess, in einer Gegenfarbentheorie in der Hypothese des Antagonismus der complementären Prozesse seine Deutung. Will man dieses Mischungsgesetz rein für sich demonstrieren, so ist zunächst jede Veränderung der Erregbarkeiten möglichst auszuschließen, und ein und die nämliche Gesamtadaptation beizubehalten. Denn die Aufhebung complementärer Prozesse zu Grau u. s. w. im Prozesse der Mischung, kurz die Wirkung der

---

<sup>1)</sup> Hering, Ueber Newton's Gesetz der Farbenmischung, a. a. O. S. 180.

Combination aller nach ihrem eindeutigen psychologischen Effect bei freier Auswirkung bestimmten physiologischen Elementarfactoren, ist doch nur dadurch zu erweisen, dass man dafür sorgt, dass die combinirten Erregungen, deren jede man im einfachsten Falle durch je einen homogenen Reiz erzeugt, wirklich für sich im einzelnen die bestimmte Farbenempfindung des Elementes und in ihrer Mischung die gerade diesen Elementen zugeordnete Empfindung ergeben, welche alle eindeutig bestimmten Punkten der Farbentafel, des Continuum der Farbenempfindungen, entsprechen. Und dies wird eben für eine bestimmte physikalische Farbmischung nur unter Beibehaltung einer constanten Adaptationslage, gleichgültig ob sie gerade die neutrale ist, auffindbar sein. So setzt also die ganze Theorie der Beziehung bestimmter physikalischer Gemische auf die in allen Punkten eindeutig bestimmte Tafel des Continuum der Farbenempfindungen nach der Newton'schen Regel stets eine ganz bestimmte Adaptationslage des Organes voraus. Viele Schwierigkeiten des Gesetzes, z. B. bei Vergleichung sehr differenter Intensitätslagen, entstehen nur durch die Schwierigkeit dieser unerlässlichen Vorbedingung gleicher Adaptation. Dass nach dem v. Kries'schen Satze in einer neuen Adaptationslage die verschiedenen physikalischen Gemische, welche vorher einem Punkte der Tafel entsprachen, auch fernerhin an einem Punkte zusammenbleiben, ist eine ganz besondere Thatsache, welche zu der Erkenntniss der Eigenthümlichkeit des Mischungsprocesses als solchen und dem Newton'schen Gesetze nichts Neues hinzubringen kann. Es werden ja jetzt auch aus den nämlichen physikalischen Reizen ganz andere physiologische Elementarprocesse in den physiologischen Mischvorgang eingehen, und sind die nach dem v. Kries'schen Satze auch jetzt wiederum zusammengehörigen physikalischen Gemische miteinander einem neuen Punkte der Tafel zugeordnet, der je nach der Adaptationsveränderung von der vorigen Stelle ganz beliebig entfernt sein kann. Der nämliche Specialfall des Newton'schen Gesetzes hingegen, d. h. die Combination der nämlichen physiologischen Elementarprocesse zu dem ihnen entsprechenden Mischprocesse, wird jetzt durch andere physikalische Reize hervorgerufen. Im übrigen wird das Newton'sche Gesetz für diese neue Adaptationslage in dem nämlichen Sinne wie früher zutreffen, d. h. es wird sich der Effect der Reizmischungen nach der nämlichen Regel ableiten lassen, nur folgt eben jetzt eine

bestimmte Mischfarbenempfindung aus anderen Reizelementen wie vorher.

Dass aber nun die Art der Abhängigkeit der Mischprocesse von ihren (physiologischen) Elementarprocessen für eine neue Adaptationslage ganz die nämliche bleibt, ist noch nicht auch schon mit dem v. Kries'schen Satze identisch. Das erstere wird nothwendig für alle Theorien erklärlich sein müssen, die überhaupt die Thatsache der Farbmischung sich unterordnen wollen. Es brauchte aber deshalb trotzdem für eine andere Auffassung als die Dreifarbentheorie, insbesondere also auch für die Theorie der Gegenfarben, damit noch nicht verbunden zu sein, dass die physikalischen Gemische, die in einer bestimmten Adaptationslage einem Punkte der Tafel zugeordnet waren, auch in jeder neuen wiederum auf einen einzigen Punkt bezogen sind. Diese Unabhängigkeit des Mischungsgesetzes von dem v. Kries'schen Satze kann ja im allgemeinen auch gar nicht fehlen, weil dieser Satz gar nichts über die Beziehung physiologischer Elementarvorgänge zum Mischprocesse und zu der entsprechenden Empfindung aussagt, sondern nur über die Beziehung physikalischer Reizvorgänge zu den in die Mischung eingehenden physiologischen Elementarfactoren. Seine physiologische Deutung ist von derjenigen der Mischungsvorgänge begrifflich zu sondern. Letztere kommen nur insofern mit in die Betrachtung herein, als schließlich die Elementarvorgänge, die wegen jener besonderen Beziehung zwischen Reiz und Elementarerregung einem bestimmten Reizgemische entsprechen müssen, speciell bei dem v. Kries'schen Satze in ihrer Mischung betrachtet werden. Diese aus dem v. Kries'schen Satze zu erschließende Beziehung zwischen Reiz und Elementarerregung ist zugleich von v. Kries, wie schon gesagt, ein für allemal richtig dahin bestimmt worden, dass eine Zurückführung auf bloße Erregbarkeitsveränderungen der normaler Weise vorhandenen Substrate nur möglich ist, wenn gleich aussehenden Reizgemischen die nämlichen Elementarvorgänge zugestanden werden, weil nur dadurch für diese Gemische eine zwar neue, aber doch für alle identische Combination von Elementarerregungen auch für jede Adaptationsänderung vorhanden bleibt. Diese letztere specielle Vorbedingung für den v. Kries'schen Satz ist aber gerade für eine Gegenfarbentheorie nicht schon aus dem Mischungsgesetze allein nothwendig abzuleiten. Nur für die

Dreifarbentheorie wird sich dieselbe bereits als nothwendige Folgerung ihrer Deutung des Mischungsgesetzes ergeben, weil hier die physiologischen Elementarfactors aller Mischungsprocesse ohne Rücksicht auf Adaptationsveränderungen schon auf Grund der eigenthümlichen Erklärung der Mischungsthatsache überhaupt für jeden Punkt der Farbentafel als die nämlichen angenommen werden müssen. Es können nach dieser Theorie also thatsächlich nur solche Reizgemische gleich aussehen, welche den nämlichen qualitativen und quantitativen Elementarcombinationen entstammen oder mutatis mutandis die nämlichen »Valenzen« besitzen. Dafür widerspricht aber eben diese Theorie der speciellen Zuordnung der in ihrer dauernden subjectiven Zusammengehörigkeit ja allerdings gut erklärten physikalischen Reize zu einem anderen Punkt des Qualitätensystemes in der neuen Stimmung insbesondere hinsichtlich der homogenen Reize, wie es schon aus den oben erwähnten Hering-Hess'schen Versuchen gegen Exner und noch mehr aus meinen eigenen hervorgeht. Hingegen enthält jede Gegenfarbentheorie gerade durch die werthvolle Zurückführung eines Theiles der Mischungsvorgänge auf antagonistische Processe die Möglichkeit, einem Punkt der Farbentafel, d. h. des Continuum der subjectiven Farben, im allgemeinen eine mehrfache physiologische Deutung zu geben, und zwar bestehen bei Annahme zweier Gegenfarbenpaare zwei Hauptarten dieser mehrfachen Deutung. Alle Sättigungsverluste können auf eine gleichzeitige Anregung von Roth und Grün oder von Gelb und Blau zurückgeführt werden, wie es später noch ausführlich zur Sprache kommen soll. Wenn also Hering in der genannten Polemik gegen v. Kries ebenso wie vorher in seinen Ausführungen über das Newton'sche Gesetz aus dem gleichen Aussehen zweier Gemische, das nach seiner Theorie durch  $\mathfrak{B} - \mathfrak{G} : \mathfrak{R} - \mathfrak{B} : \mathfrak{B} = \mathfrak{B}' - \mathfrak{G}' : \mathfrak{R}' - \mathfrak{B}' : \mathfrak{B}'$  ausgedrückt wird, auf  $\mathfrak{B} : \mathfrak{G} : \mathfrak{R} : \mathfrak{B} = \mathfrak{B}' : \mathfrak{G}' : \mathfrak{R}' : \mathfrak{B}'$  schließt, so ist dieser Schluss aus dem nach der Gegenfarbentheorie aufgefassten Gesetze der Farbenmischung allein natürlich nicht stringent, und zieht ihn Hering nur aus der bereits erfolgten Hinzunahme des v. Kries'schen Satzes zu den Thatsachen des Mischungsgesetzes. Da durch den antagonistischen Process das Wesen der Farbenerregung der Voraussetzung nach für die Empfindung verloren geht und nur der Weißprocess zur Geltung kommt, so ist z. B. aus dem gleichen Aussehen der Graugemische bei ein

und der nämlichen Adaptationslage schlechterdings nicht darüber zu entscheiden, ob dasselbe nur aus  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$  oder aus  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{V}$  oder aus beiden zusammen combinirt ist. Eine Folge des Mischungsgesetzes bei seiner Auffassung im Sinne einer Gegenfarbentheorie ist nur die Möglichkeit, dasselbe stets auf die nämliche Combination  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$ ,  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{V}$  zu deuten, und zwar gerade deshalb, weil ohne Veränderung des  $\mathfrak{W}$  das Aussehen aller einzelnen und gemischten Farben unverändert bleibt, wenn wir ein beliebig großes Valenzgemisch  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$  oder  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{V}$  in dem Indifferenzverhältniss ohne Veränderung des  $\mathfrak{W}$  hinzufügen, also aus dem nämlichen Grunde, der für eine Gegenfarbentheorie aus dem Mischungsgesetze allein stets eine mehrfache Deutung jedes Punktes der Farbentafel möglich macht.

Um also auch für die Vierfarbentheorie den v. Kries'schen Satz erklärlich zu machen, muss die Eindeutigkeit der Valenzen für jeden Punkt der physiologischen Farbentafel erst durch die Hypothese einer ganz besonderen Beziehung zwischen physikalischen Reizen und Substraten hergestellt werden, wie sie aus den Mischungsthaten allein für diese Theorie nicht mit Nothwendigkeit abzuleiten, aber gerade dadurch möglich gemacht ist. Es müssten den einzelnen physikalischen Reizen des Gemisches, abgesehen von der Weißvalenz  $\mathfrak{W}$  und von der Farbvalenz, die in ihnen bei isolirter Einwirkung ungehemmt zu Tage tritt, so viel weitere gegenfarbige Valenzpaare  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{V}$  und  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$  hinzugefügt werden, dass die gleich aussehenden Gemische dadurch auf die gleichen Valenzen gebracht werden. Gäbe es hingegen überhaupt keine Erregbarkeitsveränderungen, so läge für eine Gegenfarbentheorie kein Grund vor, die Mehrdeutigkeit der physiologischen Farbentafel, wie sie der Auffassung des Mischungsgesetzes entspricht, jemals durch solche besondere Hypothesen aufzuheben. Würde Hering die Thatsache des v. Kries'schen Satzes nicht sogleich mit den Thatsachen der Mischungsprocesse zusammengenommen und die für die Vierfarbentheorie thatsächlich durchführbare allgemeinere Hypothese von der Gleichheit aller Valenzen in gleich aussehenden Gemischen nicht wiederum als Newton'sches Mischungsgesetz bezeichnet haben, so wäre das Charakteristische seiner Hypothese jedenfalls noch etwas klarer hergetreten. So aber konnte es so scheinen, als sei diese wichtige

Erscheinung auf dem Gebiete der Erregbarkeitsveränderung auch für eine Theorie der Gegenfarben nur eine specielle Seite eines Gesetzes, das man sonst von Adaptationsveränderungen mit Recht ganz unabhängig zu betrachten gewohnt ist. Es erhielt die ganze Operation zu sehr den Anstrich des Selbstverständlichen, und wurde hierdurch vielleicht mit veranlasst, dass man die Hering'sche Grundhypothese über die Hinzunahme von Reizmomenten, die erst aus Verschiebungen des Farbentones bei neuer Adaptationslage erkannt werden, nicht so vollständig ausgebaut hat, wie es möglich ist, und wie sie erst wirklich nicht nur den v. Kries'schen Satz aus den Valenzen der einzelnen Reize des physikalischen Gemisches verständlich macht, sondern auch die Veränderungen aller beliebigen homogenen Farbenreize als Erregbarkeitsveränderungen aufzufassen gestattet, was der Dreifarben Theorie unmöglich geworden war.

**E. Die Ausgestaltung der Hering'schen Hypothese und ihre Beziehung zur Wundt'schen Stufentheorie.**

1. Das Wesentliche des Gedankens, nach welchem im Folgenden eine Ausgestaltung der Hering'schen Hypothese in dem unter C erläuterten Sinne versucht werden soll, ist zunächst der Natur einer antagonistischen

Farbentheorie überhaupt angepasst. Sie soll jedoch sogleich an der Hand der Vierfarbentheorie dargelegt werden, und zwar nicht nur wegen der besonderen Einfachheit des

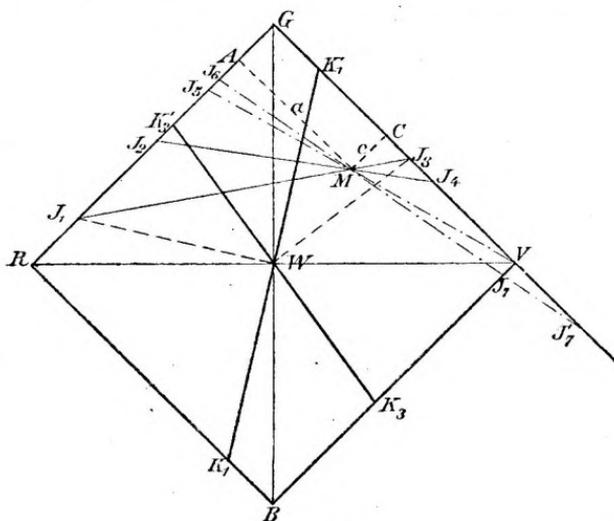


Fig. 6.

Schemas, sondern weil sie hier allein widerspruchlos den v. Kries'schen Satz zusammen mit dem Fechner-Helmholtz'schen Satze als bloße

Erregbarkeitsveränderung zu erklären vermag. Denkt man sich das Quadrat  $R G V B$  (Fig. 6) mit der Mitte  $W$  als Nullpunkt der Sättigung als die theoretische Valenztafel der vier Urfarbenprocesse, so läßt sich an ihm in der bekannten Weise die Beziehung der eindeutig bestimmten physikalischen Reize zu den physiologischen Urfarbensubstraten für eine bestimmte Erregbarkeit aller Substrate versinnlichen, und weiterhin der Erfolg bei einer Abweichung von diesen ursprünglichen Erregbarkeitsverhältnissen ableiten. Die Einheiten sind dabei natürlich nicht vom physikalischen, sondern vom physiologischen Gesichtspunkt aus gewählt. Die Eckpunkte entsprechen den einzelnen einander gleichwerthigen Urfarbenerregungen, wie sie sich entweder als Gegenfarben bei gleichzeitiger Anregung gerade zur Farblosigkeit compensiren oder als Erregungen getrennter Substrate in irgend einem »Aequivalenzverhältniss« stehen. Diese Eckpunkte stellen zugleich eine nicht compensirte, in der Empfindung als maximal gesättigte Farbe vertretene Urfarbenerregung dar, während jeder Punkt im Inneren des Quadrats bereits mehr oder minder einem Verlust an freier Erregung durch Antagonismus entspricht. Die Verbindungslinien der Eckpunkte vertreten dabei den Ort aller möglichen Mischungen der actualen Urfarbenerregungen mit einem äquivalenten Maße an freier, nicht compensirter Urfarbenerregung nach der bekannten Schwerpunktsconstruction. Auch innerhalb des Quadrates wird jedoch an jedem Punkte die Summe an freier und compensirter Erregung, also die Summe aller in die Mischung eingegangenen Valenzen äquivalent bleiben, so dass die Tafel vor allem in diesem Sinne ganz allgemein als Tafel eines bestimmten Gesamtwertes der Valenzen zu betrachten ist. Diese »theoretische« Farbentafel ist nun an das Continuum der Reize bekanntlich erst durch eine Umkehrung des Verfahrens angeschlossen zu denken, durch welches man sonst eine empirisch abgeleitete Tafel zu der theoretischen Tafel durch Hinausschieben der Punkte für die reinen Elementarerregungen ergänzt. Jede Wirkung eines homogenen Reizes findet also im allgemeinen ihre Stelle als Mischfarbe. Da für die concret ableitbare Farbentafel natürlich auch gleiche Helligkeit zur Farbengleichung hinzugehört, so ist damit auch für die vorhin berührte Gleichwerthigkeit zwischen Roth-Grün einerseits und Gelb-Blau andererseits eine einschränkende Bestimmung getroffen, in-

sofern das aus beiden Farbenpaaren gemischte Weiß im Mittelpunkt des Quadrates die gleiche Helligkeit besitzen muss. Damit sind dann zugleich die unter den gewählten Bedingungen gleichzeitig vorhandenen Weißvalenzen für die übrigen Punkte der Tafel festgelegt. Doch kommen dieselben bei ausschließlicher Betrachtung eines reinen Farbenachbildes ohne Variation der Helligkeitsadaptation nur mittelbar in Betracht. Soweit auch eine gleichmäßige Verschiebung der Helligkeiten von einer bloßen Veränderung der Farbenwirkungen abhängen sollte, müsste sie ja ohnehin wegen der hier abzuleitenden gleichen Richtung und Größe der Farbenverschiebung auf alle Farbgleichungen den nämlichen Einfluss haben.

Es entspreche nun z. B.  $M$  einer grüngelblichen Mischfarbenerregung, die zugleich innerhalb der nicht eingezeichneten empirischen Farbenlinie liege, so wird dieselbe, wenn man zunächst der Einfachheit halber die Linie der empirischen homogenen Reize die Seiten des Quadrats berühren lässt, z. B. aus den Qualitäten  $\mathfrak{S}_1$  und  $\mathfrak{S}_3$  oder auch aus  $\mathfrak{S}_2$  und  $\mathfrak{S}_4$  gemischt werden können. In den verschiedenen  $\mathfrak{S}$  wäre nun an frei actuellen Urfarbenerregungen, wenn man die Farbenwerthe der Eckpunkte Roth, Grün, Gelb und Blau wieder mit  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{V}$ ,  $\mathfrak{G}$ ,  $\mathfrak{B}$  bezeichnet und den gemeinsamen Nenner der Mischungen je zweier benachbarter Urfarben  $RG$ ,  $GV$  u. s. w. als Strecke von jetzt ab  $= 1$  setzt:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \mathfrak{S}_1 &= \mathfrak{G}(\overline{I_1 R}) + \mathfrak{R}(\overline{I_1 G}) \\
 \mathfrak{S}_3 &= \mathfrak{G}(\overline{I_3 V}) + \mathfrak{V}(\overline{I_3 G}) . \\
 \mathfrak{S}_2 &= \mathfrak{G}(\overline{I_2 R}) + \mathfrak{R}(\overline{I_2 G}) \\
 \mathfrak{S}_4 &= \mathfrak{G}(\overline{I_4 V}) + \mathfrak{V}(\overline{I_4 G}) .
 \end{aligned}$$

Diese Valenzen für  $\mathfrak{S}_1$  und  $\mathfrak{S}_3$ , bzw.  $\mathfrak{S}_2$  und  $\mathfrak{S}_4$  können also nach den Sätzen der Theorie auch aus der subjectiven Betrachtung der ungemischten Einzelreize unmittelbar erschlossen werden. In  $M$  bleiben sie nur zum Theil frei; sie müssen aber doch insgesamt für die Berechnung der Reizwirkung bei einer beliebigen Erregbarkeitsveränderung in Betracht kommen<sup>1)</sup>. Wären nun diese in den vollgesättigten Farbenempfindungen der einzelnen  $\mathfrak{S}$  frei sich auswirken-

<sup>1)</sup> Vgl. oben S. 625.

den Valenzen die einzigen in dem entsprechenden Reizgemische enthaltenen Valenzen, wie es nach den Ausführungen des vorigen Capitels für die antagonistische Farbentheorie bei ausschließlicher Berücksichtigung der Mischungsthaten gar nicht anders zu sein brauchte und wie es vor Einbeziehung der negativen Nachbilder auch nicht in Frage kommen konnte, so wären offenbar die gesammten Valenzen in  $M$  trotz gleichen Aussehens der Mischung je nach ihrer Herstellung verschieden. Das gleiche Aussehen verbürgt uns nach den Hauptsätzen der Theorie über die Mischungsthaten nur, dass die Resultante aus den sämtlichen paarweise antagonistischen Valenzen für jedes Gegenfarbenpaar in  $M$  bei jeder beliebigen Herstellung die nämliche bleiben muss. Bekanntlich kann diese Resultante der freien in der Empfindung wirksamen Empfindung in ihrer Größe und Qualität nach der Theorie einfach durch die Differenz der antagonistischen Valenzen ausgedrückt werden, wobei die Gegenfarben mit verschiedenen Vorzeichen, also z. B. Roth und Gelb mit  $+$ , Grün und Blau mit  $-$  verrechnet werden. Dabei genügt es für das Folgende, alle Beweise über die Valenzen einer Mischung von constantem Aussehen in einer Adaptationslage an der Herstellung aus nur zwei vollgesättigten Farben  $\mathfrak{S}$  auf den Seiten des Quadrates zu demonstrieren, weil sich alle beliebigen Mischungen schließlich auf eine Reihe solcher Mischungen zu je zweien zurückführen lassen. Die verschiedenen Mischungsmöglichkeiten für  $M$  aus zwei vollgesättigten Farben erhält man nun durch Drehung des Strahles  $\mathfrak{S}_1\mathfrak{S}_3$  um  $M$  als Drehpunkt, wobei fortschreitend neue Combinationen  $\mathfrak{S}_2, \mathfrak{S}_4; \mathfrak{S}_6, \mathfrak{S}_7$  u. s. w. der benachbarten Urfarben auf den Seiten des Quadrates bestimmt werden. Aus diesen  $\mathfrak{S}$  lässt sich  $M$  jederzeit herstellen nach der bekannten Mischungsregel als

$$2) \quad \mathfrak{M} = \frac{\mathfrak{S}_1 \cdot MI_3 + \mathfrak{S}_3 \cdot MI_1}{I_1 I_3} = \frac{\mathfrak{S}_2 \cdot MI_4 + \mathfrak{S}_4 \cdot MI_2}{I_2 I_4} \text{ u. s. w.}$$

Für alle Lagen des Strahles durch  $M$  muss aber zur Erzielung des gleichen Aussehens die Resultante für die Roth-Grün- und die Blau-Gelbsubstanz die nämliche sein; also

$$\mathfrak{R}_{1,3} - \mathfrak{B}_{1,3} = \mathfrak{R}_{2,4} - \mathfrak{B}_{2,4} \text{ u. s. w.}$$

und

$$\mathfrak{G}_{1,3} - \mathfrak{B}_{1,3} = \mathfrak{G}_{2,4} - \mathfrak{B}_{2,4} \text{ u. s. w.}$$

d. h.

$$I_1 G \cdot \frac{MI_3}{I_1 I_3} (\mathfrak{R}) - I_3 G \cdot \frac{MI_1}{I_1 I_3} (\mathfrak{B}) = I_2 G \cdot \frac{MI_4}{I_2 I_4} (\mathfrak{R}) - I_4 G \cdot \frac{MI_2}{I_2 I_4} (\mathfrak{B}) \text{ u. s. w.}$$

und

$$I_1 R \cdot \frac{MI_3}{I_1 I_3} (\mathfrak{G}) + I_3 V \cdot \frac{MI_1}{I_1 I_3} (\mathfrak{G}) = I_2 R \cdot \frac{MI_4}{I_2 I_4} (\mathfrak{G}) + I_4 V \cdot \frac{MI_2}{I_2 I_4} (\mathfrak{G}).$$

Es ist nun aus der Figur leicht zu entnehmen, dass die Anwendung der Mischungsregel auf die Tafel für verschiedene Lagen des Strahles zwar die Constanz dieser resultirenden Differenzen für jedes Gegenfarbenpaar, keineswegs aber die Constanz der einzelnen Valenzen  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$ ,  $\mathfrak{B}$  unter ausschließlicher Berücksichtigung der  $\mathfrak{S}$  von 1) ableiten lässt wie es der v. Kries'sche Satz erfordert. Die Constanz der Resultirenden ergibt sich nur aus der besonderen Gesetzmäßigkeit dieser unvermeidlichen Variation der Einzelvalenzen je nach Lage des Strahles. Solange der Strahl  $I_1 I_3$  auf den nämlichen Seiten des Quadrates  $RG$  und  $VG$  verbleiben, also von der Lage  $RM$  bis  $MV$ , werden allerdings auch die einzelnen Valenzen sich gleich bleiben, wie die einfachste geometrische Ueberlegung zeigt. Fällt man von  $M$  aus die Lothe  $MA = a$  und  $MC = c$  auf die Seiten des Quadrates  $RG$  und  $GV$ , so schneiden diese in allen bei der Drehung des Strahles wechselnden Dreiecken  $\triangle I_1 G I_3$ ,  $\triangle I_2 G I_4$  u. s. w. zwei kleine ähnliche Dreiecke ab,  $\triangle I_1 A M \sim \triangle M C I_3 \sim \triangle I_1 G I_3$  u. s. w. In diesen ist stets

$$3) \quad I_1 G \cdot MI_3 = I_1 I_3 \cdot c \text{ u. s. w. oder}$$

$$\frac{I_1 G \cdot MI_3}{I_1 I_3} \text{ (d. h. der Werth } \mathfrak{R} \text{ von } \mathfrak{M}) = c, \text{ und}$$

$$I_3 G \cdot MI_1 = I_1 I_3 \cdot a \text{ u. s. w. oder}$$

$$\frac{I_3 G \cdot MI_1}{I_1 I_3} \text{ (d. h. der Werth } \mathfrak{B} \text{ von } \mathfrak{M}) = a.$$

Andererseits bleibt selbstverständlich auch der Werth für  $\mathfrak{G}$  nach bekannten Ueberlegungen in diesem Bereiche des Strahles für sich constant, da ja überhaupt kein  $\mathfrak{B}$  hereinkommt, also auch die Resultirende stets nur aus positiven Factoren besteht. Geht aber nun der Strahl bei weiterer Drehung aus der Lage  $MV$  (auch mit  $I_5 V$  bezeichnet) z. B. zu  $I_6 I_7$  weiter, so hört jene Constanz der einzelnen  $\mathfrak{R}$  und  $\mathfrak{B}$ -Werthe für sich auf und es bleibt ausschließlich

die Constanz ihrer Differenz oder Resultante bestehen, welche nach der Theorie das gleiche Aussehen von  $M$  erklärt. Der Werth an Roth, der in  $\mathfrak{S}_5$  noch  $= c$  war, ist jetzt nur noch  $\frac{I_6 G \cdot MI_7}{I_6 I_7}$ . Aber jetzt ist  $\frac{I_6 G \cdot MI_7}{I_6 I_7} = c$ , wie die veränderte Figur leicht erkennen lässt, wo  $\frac{MI_7}{I_6 I_7} > \frac{MI_7}{I_6 I_7}$ . Und Entsprechendes gilt für  $\mathfrak{B}$ . Doch ist wegen der Aehnlichkeit der beiden Dreiecke  $\triangle I_5 MI_6 \sim \triangle V MI_7$  die Abnahme auf der Seite des  $\mathfrak{R}$  mit einer gleich großen Abnahme des  $\mathfrak{B}$  verbunden. Es ist  $I_5 I_6 \cdot MI_7 = I_7 V \cdot MI_6$ . Die Differenz der beiden Werthe mit entgegengesetzten Vorzeichen bleibt also die nämliche. Der Verlust erfolgt zu Gunsten der absoluten Werthe an Gelb-Blau-Valenzen, da ja von der Stellung  $MV$  an weiterhin auch ein Blauwerth hinzutritt. Auf dem ganzen Wege des Strahles über  $B$  machen nun die Werthe  $\mathfrak{R}$  und  $\mathfrak{B}$  ein Minimum durch, bis sie bei  $MR$  wieder auf  $c$  und  $a$  anlangen, während  $\mathfrak{G}$  und  $\mathfrak{B}$  bis dorthin von ihrem inzwischen erlangten Maximum wieder auf den constanten Werth ausschließlich in  $\mathfrak{G}$  sinken. Die Gesamtsumme der Valenzen muss ja für jeden Punkt gleich der gewählten Einheit sein. Hiermit ist also die geometrisch anschaulichste Demonstration der Mehrdeutigkeit des  $\mathfrak{M}$  nach der antagonistischen Theorie gegeben. Es fragt sich nun, welche Ausgestaltung der Hering'schen Hülfs-hypothese alle Valenzen so ergänzen kann, dass sie für jede Lage des Strahles in den Werthen  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$ , und  $\mathfrak{B}$  constant bleiben.

Es ist leicht zu ersehen, dass diese letztere Aufgabe gelöst ist, sobald es gelingt, die Nebenvalenzen jedes homogenen Reizelementes  $\mathfrak{S}$  so zu wählen, dass in  $\mathfrak{M}$  die absolute Valenzsumme für jedes Gegenfarbenpaar, also  $\mathfrak{R} + \mathfrak{B}$  und  $\mathfrak{G} + \mathfrak{B}$  bei allen Mischungsweisen constant bleibt. Nachdem schon gezeigt wurde, dass die Differenz erhalten bleibt, wird nach Erlangung einer Constanz dieser absoluten Summen alles Erforderliche beigebracht sein. Denn die constante Differenz  $\mathfrak{R} - \mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G} - \mathfrak{B}$  wird ja durch die Herings'schen hypothetischen Nebenvalenzen ohnehin nicht verändert, da sie, wie in Abschnitt C ausgeführt wurde, ihrer Natur nach überhaupt nur paarweise zu entgegengesetzt gleicher

Größe  $\mathfrak{R} = \mathfrak{B}'$ ,  $\mathfrak{G}' = \mathfrak{B}'$  eingeführt werden. Wie sich aus der Figur ebenfalls wieder leicht erschen lässt, kann diese Ergänzung der Summe  $\mathfrak{R} + \mathfrak{B}$  und  $\mathfrak{G} + \mathfrak{B}$  zu einem für alle Lagen des Strahles constanten Werthe dadurch erfolgen, dass zu sämmtlichen Urvalenzen der homogenen Reize, welche in der ungemischten Betrachtung frei zur Geltung kommen und daher nicht hypothetisch sind, je eine halb so große Valenz für die beiden Erregungsweisen des anderen Substrates hinzutritt. Dadurch wird natürlich der gesammte Werth der Farbvalenzen aller einzelnen Reize und aller möglichen Mischungen (ohne Veränderung des Maües der freien Erregung) verdoppelt, er bleibt aber nun auch für jedes der beiden Substrate im einzelnen constant gleich der bisherigen Einheit und gerade hierauf beruht die Durchführbarkeit der Hypothese d. h. die Ableitung der Unabhängigkeit aller einzelnen Urvalenzen einer jeden Mischfarbe von ihrer Zusammensetzung. Die bestimmten Differenzen der Valenzen jedes der beiden Gegenfarbensubstrate, welche jeden Punkt der Farbentafel nach seinem eindeutigen Effekte an freier Farbenerregung charakterisiren, bestehen jetzt erst nothwendig zugleich mit einer Constanz der absoluten Einzelwerthe der beiden Glieder dieser Differenz zusammen, weil die absolute Summe jedes der beiden Valenzpaare durch die nach der Hypothese neu hinzutretenden Valenzcomponenten stets zur gewählten Maßeinheit 1 ergänzt wird. Die hypothetischen Valenzen, welche bei der völligen Analogie zwischen Roth-Grün und Blau-Gelb nur für erstere näher ausgeführt werden sollen, lassen sich in die schematische Darstellung der Fig. 6 leicht einführen, wenn man auf allen Geraden  $I_0 W$  ( $0 = 1$  bis  $n$ ) im Punkte  $W$  Lothe errichtet, welche die Seiten des Quadrates in den paarweise zusammengehörigen Punkten  $K_1$  und  $K'_1$  u. s. w. schneiden, deren entsprechende Valenzen nach unserer Hypothese je in halber Maßeinheit zu den in den Reizelementen  $I$  liegenden Valenzen hinzugefügt werden sollen. Der gesammte absolute Werth  $P$  der Valenzen Roth-Grün der Mischung  $M$  aus  $I_1$  und  $I_3$  wird daher an Stelle der linken Seiten der Gleichungen 2) (der Werth für die Mischung  $M$  aus  $I_1$  und  $I_3$ ):

$$4) \quad P_{\mathfrak{R}\mathfrak{B}} = \frac{MI_3}{I_1 I_3} \left[ \left( I_1 G + \frac{K_1 R}{2} \right) \mathfrak{R} - \frac{K'_1 G}{2} \mathfrak{B} \right] \\ + \frac{MI_1}{I_1 I_3} \left[ - \left( I_3 G + \frac{K_3 B}{2} \right) \mathfrak{B} + \frac{K'_3 G}{2} \mathfrak{R} \right].$$

Wegen der Gleichheit von

$$K_1 B = K'_1 G = I_1 R$$

und

$$K_3 B = K'_3 G = I_3 V$$

(in congruenten Dreiecken) wird die Resultirende  $R$  der Valenzen, also unter Berücksichtigung der Vorzeichen, stets wieder constant bleiben, und zwar

$$R = \frac{MI_3}{I_1 I_3} I_1 G - \frac{MI_1}{I_1 I_3} I_3 G.$$

Die Summe der absoluten Werthe (ohne Rücksicht auf die entgegengesetzten Vorzeichen der  $\mathfrak{R}$  und  $\mathfrak{B}$ ) aber wird

$$4a) \quad \frac{MI_3}{I_1 I_3} (I_1 G + I_1 R) + \frac{MI_1}{I_1 I_3} (I_3 G + I_3 V)$$

und weil

$$I_1 G + I_1 R = R G = I_3 G + I_3 V = V G$$

ist, und ferner

$$I_1 M + M I_3 = I_1 I_3,$$

so wird der Werth  $P_{\mathfrak{R}\mathfrak{B}}$  gleich der gewählten Einheit  $E = 1$  der Tafel, ohne Rücksicht auf die Lage des Strahles  $I_1 I_3$  u. s. w., da ja stets die Nebervalenzen aller  $I$  die Hauptvalenzen zu der Einheit der Quadratseite ergänzen, auf welcher das  $I$  gerade liegt. Ebenso ist aber natürlich auch

$$P_{\mathfrak{G}\mathfrak{B}} = E$$

und der Gesamtwert an unmittelbar erkennbaren und hypothetischen Valenzen für jede beliebige Mischung der Tafel  $= 2E$ .

Daraus ist dann natürlich auch sogleich ersichtlich, dass die Constanz der absoluten Einzelwerthe  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$ ,  $\mathfrak{B}$  auch für jede beliebige Mischung eines  $M$  aus anderweitigen Mischungen  $M_1$  und  $M_2$ , die ihrerseits wieder beliebig combinirt sein können, unter Voraussetzung der nunmehr näher bestimmten Nebervalenzen aller Reizelemente erhalten bleibt, womit auch erst die Brauchbarkeit der Hypothese bei den idealen Reizen auch für die empirischen garantirt ist. Die resultirende Differenz für jedes Gegenfarbenpaar bleibt ja auch hier wiederum

ohnehin schon auf Grund der Erklärung des Mischungsgesetzes nach jeder antagonistischen Theorie für das gleiche Aussehen des  $M$  von der Art der Mischung unabhängig. Außerdem besitzt aber jede einzelne Mischung  $M_1$  und  $M_2$  wiederum für jedes Gegenfarbenpaar besonders für sich den Werth 1, so dass aus jeder beliebigen Herstellung der für alle Punkte der Tafel überhaupt constanten Gesamteinheit  $= 2E$  ebenfalls wiederum die Constanz der Summe der absoluten Werthe  $P_{\mathfrak{R}\mathfrak{B}}$  und  $P_{\mathfrak{G}\mathfrak{B}}$  herauskommen muss und damit also auch die Constanz aller Einzelvalenzen  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$  und  $\mathfrak{B}$  wegen der gleichzeitigen Constanz der Resultirenden, welche jedem Punkte erst seinen Charakter verleiht.

Zu der Ableitung der für ein beliebig combinirtes  $M$  stets gemeinsamen Richtung und Größe der qualitativen Verschiebung, welche nun durch Veränderungen der bisherigen, mit 1 bezeichneten Erregbarkeit für irgend eine Substanz erfolgt, brauchen dann selbstverständlich nur die Einzelwerthe der Gleichung  $x - y = A$ ,  $x + y = 1$  verwendet zu werden. Bedeuten also  $A_{\mathfrak{R}, \mathfrak{B}}$  und  $A_{\mathfrak{G}, \mathfrak{B}}$  die beiden von der Zusammensetzung unabhängigen Resultirenden der Mischung  $M$  nach ihrem Gehalt an freien  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G}$  oder  $\mathfrak{B}$ , wie sie mit der Lage in der Farbentafel eindeutig bestimmt sind, so ist

$$\begin{array}{rcl}
 5) & \mathfrak{R} - \mathfrak{B} = A_{\mathfrak{R}, \mathfrak{B}} & \text{und} \quad \mathfrak{G} - \mathfrak{B} = A_{\mathfrak{G}, \mathfrak{B}} \\
 & \mathfrak{R} + \mathfrak{B} = 1 & \mathfrak{G} + \mathfrak{B} = 1 \\
 \hline
 & \mathfrak{R} = \frac{1 + A_{\mathfrak{R}, \mathfrak{B}}}{2} & \mathfrak{G} = \frac{1 + A_{\mathfrak{G}, \mathfrak{B}}}{2} \\
 & \mathfrak{B} = \frac{1 - A_{\mathfrak{R}, \mathfrak{B}}}{2} & \mathfrak{B} = \frac{1 - A_{\mathfrak{G}, \mathfrak{B}}}{2} .
 \end{array}$$

Ueber die völlige Unabhängigkeit dieser Ableitung des v. Kries'schen Satzes aus einer solchen Vierfarbentheorie von irgend welchen näheren Bestimmungen des gegenseitigen Verhältnisses der gleichzeitigen Erregbarkeitsveränderungen für die vier Einzelvalenzen, also insbesondere der Ermüdung und der etwaigen complementären Erholung braucht nichts mehr hinzugefügt zu werden, nachdem jetzt alles erreicht ist, was v. Kries an Erklärungsvortheilen seinem Satze gegenüber nur der Dreifarbentheorie zukommen lassen wollte. Die Bestimmung dieser in einem negativen Nachbild gleichzeitig enthaltenen Beziehungen zu den ein-

zelen reagirenden Substraten auf Grund der quantitativen Bestimmungen, wie sie oben dargelegt wurden, kann also diese Hypothese in keiner Weise einengen. Damit komme ich aber nun schließlich auch zu ihrer gleichzeitigen Freiheit von dem Zwange, welcher z. B. die Dreifarben- theorie, wie oben erwähnt, zur Erklärung des Nachbildwerthes auf homogenen Reactionsfarben von beliebigem Tone aus einer secundären Beimischung nöthigte. Nach der soeben entwickelten Hypothese besitzen ja auch alle beliebigen ideal homogenen Farbenreize nicht nur die beiden durch den Punkt *I* auf den Seiten des Quadrates bezw. durch die Eckpunkte bestimmten Urvalenzen, welche bei alleiniger Einwirkung des Reizes sich frei auswirken und insgesamt die Maßeinheit 1 repräsentiren, wie sie also gewöhnlich ohne diese Hypothese aufgefasst wurden. Auch für sie gilt ja überall Element für Element, dass die absolute Valenzsumme für jedes der beiden Urfarbenssubstrate im einzelnen die Maßeinheit erreicht, welche den freien, eine Farbenempfindung auslösenden Erregungen der Punkte auf den Seiten des Quadrates zu Grunde gelegt ist. Ein Reiz, welcher bei der zur Farbentafel gewählten Stimmung z. B. als »Urgelb« erscheint, wird also außer  $\mathfrak{G} = +1$  noch  $\frac{1}{2}\mathfrak{R} + \frac{1}{2}\mathfrak{B}$  anzuregen im stande sein, ebenso wie ein aus Urroth und Urgrün gemischtes Grau von äquivalenter Intensität. Ist also z. B. durch die freie Erregung von Urroth bei Einwirkung des urroth aussehenden Reizes eine Verminderung der Roth-Erregbarkeit auf das  $\alpha_{\mathfrak{R}}$ -fache der bisherigen Leistungsfähigkeit entstanden ( $\alpha_{\mathfrak{R}} < 1$ ) und eine gleichzeitige Steigerung der Grün-Erregbarkeit, auf das  $\alpha_{\mathfrak{B}}$ -fache ( $\alpha_{\mathfrak{B}} > 1$ ), so wird auch das reagirende Urgelb um eben so viel an freier Valenz für Urgrün zugenommen haben, also wirklich nach der zur Ermüdungs- farbe Roth complementären Seite verschoben sein, wie jenes äquivalente Grau aus rothen und grünen Strahlen, d. h. um den Nachbildwerth

$$N_{\mathfrak{G}} = \frac{(1 - \alpha_{\mathfrak{R}}) + (\alpha_{\mathfrak{B}} - 1)}{2},$$

wie er nach der Hypothese dieses Capitels ausgedrückt werden kann. Je weniger  $1 - \alpha_{\mathfrak{R}}$  von  $\alpha_{\mathfrak{B}} - 1$  verschieden ist, um so ähnlicher wird die Verschiebung innerhalb der gesammten Farbentafel, und für  $(1 - \alpha_{\mathfrak{R}}) = (\alpha_{\mathfrak{B}} - 1)$  würde sogar ganz die nämliche Zunahme an freier Valenz der Nachbildfarbe für alle

homogenen und beliebig gemischten Farben herrschen. Denn da der Werth des Nachbildes  $N$  von dem verschiedenen Vorzeichen der gegenseitigen Valenzen unabhängig ist und nur bei Verschiedenheit des Factors  $(1 - \alpha_{\mathfrak{R}})$  und  $(\alpha_{\mathfrak{B}} - 1)$  u. s. w. noch von dem Verhältniss der absoluten Werthe  $\mathfrak{R} : \mathfrak{B}$ ,  $\mathfrak{G} : \mathfrak{B}$  abhängig wird, so müsste beim Wegfall dieser zuletzt genannten Verschiedenheit d. h. bei einer der Ermüdung gleichwerthigen Erholung für die Gegenfarbe nur noch die absolute Summe der nach der Theorie zu dem nämlichen Substrat zusammengehörigen Valenzen  $\mathfrak{R} + \mathfrak{B}$  bzw.  $\mathfrak{G} + \mathfrak{B}$  entscheiden, welche eben nach der geschilderten Hypothese durchweg constant ist.

Diese Fragen stehen aber nun offenbar bereits zu unseren oben dargelegten Versuchsergebnissen in ganz bestimmter Beziehung. Da der eben dargelegte Standpunkt, wie aus dem Späteren noch deutlicher werden wird, überhaupt allein noch eine mit jenen quantitativen Resultaten einigermaßen übereinstimmende Durchführung der früheren Hypothese möglich zu machen scheint, wonach die negativen Nachbilder aus Erregbarkeitsveränderungen der qualitativ unveränderten Substrate erklärt werden, so sollen an dieser Stelle gleich alle Gesichtspunkte angeführt werden, welche für die Ausdeutung der obigen Versuchsergebnisse nach dieser Hypothese in Betracht kommen.

Der Einfluss der Aequivalenzverhältnisse in allen einzelnen Curven der farbigen Nachbilder, wie er am reinsten in der Annäherung der Mittelwerthcurve an diejenige des reinen Helligkeitsnachbildes zu Tage trat, würde nach Capitel 4 am besten dadurch zu erklären sein, dass man die Valenzen der äquivalenten Farbenintensitäten ganz allgemein als für die peripher physiologischen Prozesse gleichwerthig betrachtet, so dass sie nicht nur für Erregbarkeitsveränderungen des Helligkeitsprocesses, sondern auch für solche innerhalb des Farbensystems den jeweiligen Coefficienten bestimmen. Würden nun die obigen Curven für alle beliebigen Farbnachbilder vollständig mit der Curve der Aequivalenzverhältnisse übereinstimmen, wie sie am reinsten im einfachen Helligkeitsnachbilde vermuthet wurde, so würde dies nach der eben genannten Auffassung eine ebenso vollständige Gleichheit des Ermüdungsfactors für die zunächst fixirte Farbe und des Erholungsfactors für ihre Complementärfarbe bedeuten, deren Verbindung von der hier dargelegten Erklärung des

Nachbildes als das Wesen des negativen Nachbildes betrachtet werden muss<sup>1)</sup>. Umgekehrt wird aber nun die thatsächliche Abweichung der Farbennachbildwerthe von diesen Aequivalenzverhältnissen, die Begünstigung der ermüdenden Farbe selbst und ihrer Nachbarschaft gegenüber der complementären Seite als ein Ueberwiegen des Ermüdungsfactors über den Erholungsfactor gedeutet werden können. Damit würde auch die besondere Deutlichkeit des Zerfalles der beiden Regionen bei Dunkeladaptation gut übereinstimmen. Hier war ja der relative Vortheil der Region der reagirenden Ermüdungsfarbe einerseits und ihrer Complementärfarbe andererseits besonders auffällig. Die Erholung ist in dieser Stimmung für sämtliche Processe an allen Stellen des Sehfeldes bereits vor Einwirkung der Ermüdungsfarbe eine besonders große. Die Annahme, dass die Erholung bei voller Adaptation ein unübertreffliches Maximum erreicht habe, würde sogar überhaupt nur noch eine Differenz der Ermüdung benachbarter Stellen erwarten lassen, wonach sich das Nachbild ausschließlich als Verminderung der Valenz der Ermüdungsfarbe zeigen müsste. Nach der speciellen Hypothese dieses Capitels müsste dann die Curve für jede einzelne Ermüdungsfarbe ein Maximum für die reagirende Ermüdungsfarbe selbst und einen continuirlichen Abfall nach dem annähernden Nullwerthe ihrer Complementärfarbe hin aufzeigen. Eine Uebereinstimmung der Hypothese mit der thatsächlichen Auffindung immer noch hinreichend großer Werthe für die complementäre Region auch bei vollständiger Dunkeladaptation ist also nur durch die Annahme zu erreichen, dass die Erregbarkeit für jede Farbe auch nach Dunkeladaptation immer noch dadurch gesteigert werden kann, dass man ihre Complementärfarbe einwirken lässt. Die besonderen Gründe

---

<sup>1)</sup> Natürlich käme hierbei nicht ganz genau die oben abgeleitete Curve für das reine Helligkeitsnachbild auf den homogenen Reactionsfarben als Vergleichsobject in Betracht, weil ja die subjective Ausgleichung des Farbennachbildes auf den homogenen Farben, der oben genauer geschilderten Messungsmethode entsprechend, andere Mischfarben entstehen lässt, in denen schließlich die Ausgleichung durch Beimischung der Ermüdungsfarbe erfolgt, als bei der Ausgleichung des Helligkeitsnachbildes, bei der allen reagirenden Farben stets Weiß beigemischt wird. Auch wird niemals  $N$  (S. 648) unmittelbar gemessen, sondern nur die allerdings hierzu proportionale Differenz solcher Werthe für benachbarte Stellen.

für die Entstehung von Differenzen der benachbarten Sehfeldbezirke, welche aus den physiologischen Contactwirkungen abgeleitet und insbesondere in der Hering'schen Farbentheorie ausführlich beigezogen worden sind, können dabei für alle bisher dargelegten Gesichtspunkte noch eine Steigerung der quantitativen Verhältnisse begründen. Im nächsten Capitel wird übrigens noch eine weitere Erklärungsmöglichkeit dieser Abweichungen zur Sprache kommen. Ueberall muss aber festgehalten werden, dass eine einheitliche Zurückführung der negativen Nachbilder um des Fechner-Helmholtz'schen Satzes willen niemals von den reagirenden Reizen absehen darf, und dass auch die Erholungszustände ebenso wie die Ermüdung sowohl auf der Stelle der wirksamen Ermüdungsfarbe selbst als auch in ihrer Nachbarschaft immer nur im Sinne von Erregbarkeitsveränderungen beigezogen werden können. Unter dem oben gefundenen Beobachtungsmaterial ist höchstens noch die nebenbei schon öfters erwähnte Continuität der relativen Abnahme von der maximal begünstigten Region der Ermüdungsfarbe nach dem complementären Gebiete hin besonders hervorzuheben, welche aus dem Grundgedanken der ganzen Hypothese mit Nothwendigkeit gefolgert werden muss. Die Nebenvalenzen, welche die frei sich auswirkenden Valenzen eines physiologisch einfachen Reizmomentes in der früher genannten Weise ergänzen, lassen bei diesem Uebergange die Reizmomente jedes homogenen Reizelementes, welche nach der Hypothese für jedes Gegenfarbenpaar die nämliche absolute Summe gleich der gewählten Maßeinheit ausmachen, continuirlich immer mehr an der Complementärfarbe der Ermüdungsfarbe zur Herstellung jener constanten Summe participiren. Es kann also auch derjenige Theil der reagirenden Gesamtvalenz, für welchen der Ermüdungsfactor der fixirten Farbe zur Berechnung des gesammten Nachbildwerthes in Betracht kommt, gegenüber dem Coefficienten für den Erholungsfactor nur ganz continuirlich immer mehr zurücktreten, bis die reine Complementärfarbe selbst zur reagirenden gewählt wird.

2. Trotz ihrer anscheinend guten Uebereinstimmung mit den wesentlichsten Erscheinungen der negativen Nachbilder könnte jedoch die ganze Hypothese nimmermehr zu einer auch nur einigermaßen haltbaren Stellung gelangen, wenn ihr Grundgedanke, die Vermehrung jedes elementaren Reizmomentes um je eine halbe Maßeinheit der

antagonistischen Erregungen des anderen Substrates, mit allen übrigen Anschauungen allzu sehr in Gegensatz stände, die man sich auf Grund der ganzen übrigen Erfahrung auf dem Gebiete der physiologischen Optik gemacht hat. Es ist ja allerdings das Gebiet der negativen Nachbilder an und für sich groß genug, und manche Leitsätze von Theorien haben sich gerade aus ihrer Betrachtung heraus entwickelt. Im Verhältniss zum gesammten Umfange jener Erfahrung bleibt es aber natürlich immer noch verschwindend klein. Auch sieht man sich keineswegs etwa auf Grund eines vorläufigen Mangels anderweitiger Erklärungsmöglichkeiten unbedingt zu diesen Hülfs-hypothesen genöthigt, weil auch für dieses specielle Gebiet neben der Zurückführung auf bloße Erregbarkeitsveränderungen der normalen Substrate eine zweite Erklärung sich ebenfalls ziemlich widerspruchsfrei ausgestalten lässt, wie im nächsten Capitel ausführlicher gezeigt werden soll. Indessen lässt sich der Hypothese doch wenigstens noch der besondere Anschein von Künstlichkeit und Unwahrscheinlichkeit einigermaßen benehmen, der ihr anhaften würde, falls man über das gegenseitige qualitative Verhältniss der beiden Substrate für Grün-Roth und Gelb-Blau keinerlei Bestimmungen in die Theorie mit aufnehmen wollte. Ich halte es allerdings keineswegs für meine Aufgabe, die Physiologie der Farbenempfindungs-Substrate an dieser Stelle durch die Untersuchung über eine physiologisch-chemische Hypothese zu bereichern, welche zu jenen Resultaten am besten passe. Die Ausgestaltung solcher Hypothesen ist eine neue Aufgabe für sich, welche ihrerseits die Analyse der subjectiven Thatsachen und die Auffindung ihrer gesetzmäßigen Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen, also alle Untersuchungen dieser Abhandlung bereits als abgeschlossen voraussetzen, außerdem aber auch das hier noch nirgends berührte Gebiet der physiologischen Chemie beizuziehen nöthigen würde. Es soll also nur noch betont werden, dass die Hypothese, welche in diesem Capitel über die Beziehung der Reize zu den chemisch in irgend einer Weise bestimmten Substraten aufgestellt wurde, zu ihrer leichteren Begreiflichkeit für die bisher fertig vorliegenden physiologisch-chemischen Theorien eine besondere Berücksichtigung der qualitativen Beziehungen zwischen den Substraten erforderlich macht. Es muss dies hervorgehoben werden, weil in der Vierfarbentheorie, welche für diese Hypothese allein in

Betracht kommt, für ihre beiden Substrate des Roth-Grün und Gelb-Blau, die völlig selbständig und unabhängig voneinander in Function treten, diese qualitative Verwandtschaftsbeziehung der einzelnen Prozesse verschiedener Gegenfarbenpaare, also z. B. zwischen Roth und Gelb, Grün und Blau bisher noch nicht besonders zur Sprache gekommen sind. Von unserer Specialfrage aus erlangt aber dieses Problem offenbar deshalb eine besondere Wichtigkeit, weil nur eine bestimmte Beantwortung desselben die eigenthümliche Größenbeziehung der hypothetischen Nebenvalenzen zu den gewöhnlich angenommenen Hauptvalenzen anschaulich und begrifflich machen kann, gemäß der einfachen Voraussetzung, dass die Größe der Nebenreizmomente, mit welchen ein urfarbig aussehendes Reizelement zugleich die beiden Gegenfarben des anderen Substrates entgegengesetzt gleich stark anzuregen vermag, von dem Grade der gegenseitigen qualitativen Verwandtschaft zwischen den gleichzeitig angeregten Processen abhängig sein wird. Solange mit Hering nur die Gleichwerthigkeit beider hypothetischer Nebenvalenzen betont wurde, welche die Möglichkeit der Hypothese überhaupt bedingen, ohne dass der v. Kries'sche Satz aus ihrer Annahme in den genannten Größenverhältnissen abgeleitet wurde, war eine besondere Beachtung jener qualitativen Beziehungen noch nicht nothwendig, und konnte neben der functionellen Selbständigkeit der beiden Substrate noch immer an ein ganz beliebiges, zufälliges qualitatives Verhältniss derselben gedacht werden. Wird aber jeder der beiden Nebenvalenzen zur Ermöglichung der ganzen Hypothese überhaupt gerade die Hälfte der Hauptvalenz zugesprochen, so entsteht in der Ausbreitung der Nebenmomente um das Hauptmoment eine eigenartig ausgeprägte Symmetrie. Es ergibt sich das einfache Schema, dass ein für sich allein urfarbig aussehendes Reizelement neben dem Einflusse auf die schließlich freie Erregung des einen Substrates gar keine oder nur noch eine minimale Anregung der zu dieser gerade entgegengesetzten Complementärfarbe enthält, dass aber diese relative Wirkungslosigkeit auf die Complementärfarbe gewissermaßen nur das Ende der Ausbreitung über das ganze übrige System der Substrate bedeutet, welche auf halbem Wege beiderseits durch die Reihe der Farbendispositionen hindurch auch gerade noch die halbe Wirkung anzuregen vermag. Ein

urgelb aussehender Reiz wird also z. B. Blau kaum mehr anregen, Grün und Roth, die halbwegs entfernten Uebergänge beiderseits im Farbenkreise nach Blau hin, gerade noch halb so stark wie Gelb selbst. Der Schein der Künstlichkeit dieser Größenbeziehungen verschwindet hinreichend, wenn man dieser Symmetrie der Quantitätsverhältnisse zwischen Haupt- und Nebenvalenzen eine gleiche Symmetrie der qualitativen Beziehungen zwischen den vier Urfarbenprocessen zu Grunde legt. Für eine halb so große Anregung der beiden Prozesse des zweiten Substrates ist dann nur erforderlich, dass die Erregungsweisen desselben auch ihrer Qualität nach zwischen der sichtbaren Urfarbe und ihrem Complemente in dem anderen Substrate sozusagen in der Mitte stehen, wie dies im Sinne der entsprechenden Begriffe aus der subjectiven Analyse des Farbensystems, d. h. der Auffindung gleicher sog. übermerklicher Unterschiede verstanden werden kann. Auch könnte diese Forderung nicht etwa dadurch umgangen werden, dass man jenes Schema als sozusagen zufälligen Specialfall einer Reihe ebenfalls zufälliger Größenbeziehungen der Haupt- und Nebenvalenzen ableitet, wie es z. B. gerade in Uebereinstimmung mit der ganzen Hypothese wirklich nur auf eine mehr zufällige Zuordnung von Reiz und Substrat zurückzuführen ist, dass ein homogener Reiz in einer bestimmten Adaptationslage gerade urfarbig aussieht. Die Hypothese schließt vielmehr in sich, dass für jede einzelne Wellenlänge in jeder beliebigen Adaptationslage das nur aus jenem Schema ableitbare Größenverhältniss der gleichzeitig angeregten Urfarbenprocesse besteht. Für die nicht urfarbigen homogenen Reize ergibt sich dieses Werthverhältniss nur eben bereits aus einer Mischung zweier solcher Systeme von Haupt- und Nebenmomenten, wie sie oben für ideal gesättigte Zwischenfarben behandelt worden sind.

Bedeutet aber die quadratische Farbentafel für die Vierfarbentheorie nach dieser Hypothese nun wirklich eine solche innere Beziehung zwischen den vier Urfarbenprocessen, welche dieselben als vier gleich viel voneinander verschiedene Bethätigungsweisen auffassen lässt, die alle gemäß dem Grade dieser Verschiedenheit von einem homogenen Reize aus in verschiedenen Stärkeverhältnissen angeregt werden können, dann ist der reine Dualismus innerhalb der Gegenfarbentheorie, welcher die beiden Substrate ohne nähere qualitative

Beziehung nebeneinander stellt, ganz von selbst durch eine einheitlichere Auffassung von dem gesammten Substrate der Farbenempfindung ersetzt, welches bei der gegenseitigen qualitativen Beziehung zwischen den vier Grundelementen an Ebenmäßigkeit der inneren Structur nichts zu wünschen übrig ließe. Allerdings ist die ganze Hypothese auch für zwei nach der Hering'schen Theorie völlig isolirt nebeneinander gestellte »präformirte« Farbensubstrate Roth-Grün und Gelb-Blau durchzuführen, falls nur die genannten qualitativen Beziehungen zugegeben werden, welche daneben immer noch möglich sind und dann vielleicht aus einer Ableitung beider präformirter Substrate aus einem einheitlichen Grundstoffe relativ am leichtesten verständlich würden. Am einfachsten gestaltet sich aber wohl die ganze Auffassung, wenn man die vier Urfarbenprocesse von vornherein als vier gleichviel voneinander verschiedene Producte des Zusammenwirkens der Reize mit einem einheitlichen, aber entsprechend complicirt gebauten Generalsubstrate auffassen würde, also ohne die Annahme isolirter präformirter Einzelsubstrate. Damit wäre also die oben dargelegte Hypothese mit den Principien in Zusammenhang gebracht, welche für die Wundt'sche Farbentheorie maßgebend gewesen sind, bis auf die in dieser Theorie zunächst vermiedene Einschränkung der Anzahl der möglichen Einzelproducte des Zusammenwirkens von Reiz und Substrat. Das verbindende Glied bildet dabei die Uebereinstimmung der Hypothese dieses Capitels mit der Wundt'schen Farbentheorie hinsichtlich der Auffassung der complementären Erregungen als antagonistischer Processe, auf die sich die Möglichkeit einer Einführung der hypothetischen Nebervalenzen überhaupt gründet. Außerdem darf man aber nicht vielleicht annehmen, dass die von Wundt mit Recht so entschieden betonte Einheitlichkeit auch derjenigen Farbenprocesse, welche bei jener Ableitung aller Farbenempfindungssubstrate aus nur vier Grundproducten des allgemeinen Substrates als Mischproducte in besonderem Sinne aufgefasst werden müssten, mit dieser besonderen Ausgestaltung unvereinbar sei. Diese Einheitlichkeit ist die allein vom psychologischen Gesichtspunkte aus verständliche Eigenthümlichkeit sämmtlicher Farbenempfindungen, in Folge deren jede derselben an und für sich betrachtet als ein einfachstes psychisches Element aufgefasst werden muss, so dass die

Definition der »Hauptfarben« als der Resultate begrifflicher Entwicklungen von dieser allen Farbenempfindungen gemeinsamen Einfachheit scharf abzutrennen ist. Der homogene orangefarbige, grün-gelbe, grünblaue oder violette Reiz muss also aus dem allgemeinen Substrat schließlich ein ebenso einheitliches endgültiges Spaltungs-product als Empfindungs-substrat der genannten »Zwischenfarben« hervorbringen, wie der nach der Vierfarbentheorie urfarbig aussehende Reiz. Die Erfüllbarkeit dieser Forderung folgt aus der Annahme eines einheitlichen, allgemeinen Substrates, in welchem sämtliche von den Reizen gespaltenen Elemente eine vor Einwirkung der Reize einheitliche Verbindung eingegangen haben, sogar mit einer gewissen Selbstverständlichkeit, und wird gerade die in der Hypothese vorausgesetzte innere Verwandtschaft der im Farbencontinuum benachbarten Prozesse, z. B. Roth und Gelb, auf welche Orange hienach zurückgeführt werden müsste, eine innige Verbindung derjenigen Spaltungs-producte erklärlich machen, welche aus der isolirten Wirkung einer der beiden Componenten des Orangereizes für Roth und Gelb folgen würden. Von diesem letzteren Gesichtspunkte aus fällt ja überhaupt erst auf die Einheitlichkeit des complicirt gebauten allgemeinen Substrates selbst einiges Licht. Diese innige Verbindung wäre um so verständlicher, als selbst der farbige und der farblose Process jederzeit schließlich einen so einheitlichen Empfindungseffect erzeugen, dass die Verbindung der Merkmale der Helligkeit und Farbe einer Lichtempfindung nicht hinter der hier ganz allgemein für die Mischfarbenprozesse geforderten Einheitlichkeit zurücksteht. Auch hier ist nur aus dem Zusammenhang der übrigen Erfahrungen, keineswegs aber schon aus dem phänomenalen Verhältniss des Helligkeits- und Farbigkeitsmomentes in der einzelnen Empfindung die Hypothese einer Abtrennung des Helligkeits- und Farbensubstrates im Sinne der antagonistischen Farbentheorien gerechtfertigt. Für manchen würde vielleicht die Einführung des Ausdruckes »Verschmelzung« das hier Gemeinte deutlicher machen, welcher wegen der anderweitigen Verwerthung dieses Wortes in der Psychologie hier vermieden worden ist.

Auch würde man sich vom Standpunkte der Wundt'schen Theorie nicht etwa daran stoßen, dass in dem allgemeinen Substrate bei dieser Form der Vierfarbentheorie doch wiederum vier Grund-

processe sozusagen »präformirt« sind, welche bei Einwirkung der Reize immer gerade in einer dieser vier Formen actuell werden müssen, als ob die für Wundt wesentliche Stellungnahme gegen die Hypothese von den sog. specifischen Sinnesenergien außer acht gelassen wäre. Einerseits musste ja schon die wirkliche Hypothese der specifischen Energie selbst gerade auf dem Gebiete des Farbensehens eine besonders entscheidende Bedeutung der Reizunterschiede für ein und das nämliche Substrat Roth-Grün oder Blau-Gelb anerkennen. Andererseits liegt es aber doch auch wiederum im Wesen der sog. chemischen Sinne, dass die Reize hier schon in sehr peripheren Stadien des ganzen Processes besondere stoffliche Producte als Reizvermittlung auslösen, welche mit ihren eigenartigen chemischen Processen an die Stelle der physikalischen Reizvorgänge treten und in ihrer Differenzirung durch die Eigenthümlichkeiten des physiologischen Substrates beschränkt sind, eine Anschauung, die insbesondere dann noch eine besondere Bedeutung erlangt, wenn man auf Grund der negativen Nachbilder eine Veränderungsmöglichkeit der Erregbarkeit der normalen Substrate zugeben will. Auch von Wundt ist natürlich eine eigenartige Structur des allgemeinen Substrates vorausgesetzt. Nur müssen eben die Reize aus dieser Grundsubstanz die ganze Scala der psychologisch gleich einfachen Empfindungsstufen hervorbringen können, wie sie allein durch Bestimmung der qualitativen Unterschiedsschwellen in ihrer Zahl annähernd zu erfassen sind, wobei zugleich den Reizen eine entwicklungsgeschichtliche Bedeutung für das allgemeine Substrat selbst zuzugestehen ist. Auch aus jener in gewissem Sinne vierwerthigen Grundsubstanz werden also die Reize in einer in der genannten Weise näher zu bestimmenden Differenzirung neue Zwischenstufen des gesammten Umkreises der Farbenempfindungen hervorbringen können, und bestünde jene Vierseitigkeit eben nur darin, dass der Verbrauch der Grundsubstanz zum Aufbau jener beliebig differenzirten Zwischenstufen jede der Dispositionen zu den vier primären Grundproducten für sich im ganzen gleich stark ergreift, dass ebenso die Regeneration gleich stark ist, und dass außerdem innerhalb der ganzen Unterabtheilung die zwei zu einander gegenfarbigen Processe noch durch eine besondere innere Gesetzmäßigkeit ihres Verbrauches und ihrer Regeneration verbunden sind. Ueber den psychologischen Effect der isolirten Erregung eines der

vier primären Grundproducte ist damit noch gar nichts bestimmt, ja es ist wie in allen bisherigen Componententheorien überhaupt nicht nothwendig, dass irgend eines der Grundproducte jemals für sich allein zur Geltung kommt. Nur das Schema der jederzeit nothwendigen Zusammengehörigkeit entsprechend verwandter Valenzen ist in der oben dargelegten Weise festgelegt. Auch ist keineswegs eine größere physiologisch-chemische Einfachheit der vier Grundproducte inbegriffen, und hat somit die Wundt'sche Theorie auch in dieser Form alle Vortheile, welche sie wegen der Enthaltung von Annahmen über die Zahl der letzten Elemente der Grundsubstanz allen Varietäten des Farbensehens, der peripheren Farbenempfindung, der Farbenblindheit, den Adaptationseinflüssen etc. gegenüber besitzt. Von diesen Gesichtspunkten aus könnte also die ganze in diesem Abschnitt dargelegte Hypothese einer symmetrischen Ausbreitung der Reizmomente eines homogenen Reizelementes über das ganze Substrat wirklich an Einfachheit und Natürlichkeit gewinnen und würde ihr schließlich eine gewisse Wahrscheinlichkeit nicht abzusprechen sein, wenn man wirklich dazu genöthigt wäre, die negativen Nachbilder auf Erregbarkeitsveränderungen der normalen Substrate zurückzuführen.

#### F. Die Unübertragbarkeit der Hypothese auf den Farbenkreis als theoretische Valenztafel.

Bevor wir aber zu der concurrirenden, ebenso widerspruchslosen Erklärungsmöglichkeit übergehen, die im nächsten Capitel zur Sprache kommen soll, muss zunächst erst noch die Einschränkung besonders bewiesen werden, welche mit dem Versuch der Annahme jener hypothetischen Nebenvalenzen jeder antagonistischen Farbentheorie auferlegt werden soll, so dass die im vorigen Abschnitte E dargelegte Vierfarbentheorie allein mit ihr vereinbar bleibe. Die obige Erklärung des v. Kries'schen Satzes im Verein mit dem Fechner-Helmholtz'schen Satze und seinen Analogien ist überhaupt nur für die ausschließliche Annahme von vier Urprocessen durchführbar. Die Rechenoperationen des vorigen Capitels zur Ableitung des v. Kries'schen Satzes stützten sich durchaus auf die geometrischen Eigenthümlichkeiten des Quadrates, welches dort als theoretische Valenztafel zu Grunde gelegt wurde. Nur da-

durch konnte die absolute Summe der Valenzen für jedes Gegenfarbenpaar von der Art der Mischung des  $M$  unabhängig und gleich der Maßeinheit der Valenztabelle werden, wodurch zugleich die ungefähr gleichmäßige Geltung des Farbenachbildes für alle beliebigen reagirenden Gemische von äquivalenter Intensität nach dem Fechner-Helmholtz'schen Satze garantirt war. Es ist aber insbesondere unmöglich, die Hypothese durch die Uebertragung in der nämlichen Einfachheit vom Farbenquadrat auf den Farbenkreis oder auf irgend eine größere Zahl coordinirter Urprocesse als gleich leistungsfähig für alle antagonistischen Farbentheorien überhaupt zu erweisen, welche die Zurückführung aller Farben auf nur vier Urprocesse nicht mitmachen wollen. Diese Theorien sind ja zwar alle in gleicher Weise befähigt, jeden einfachen homogenen Reiz mit entgegengesetzt gleichen und beliebig großen Nebenvalenzen für alle anderen Gegenfarbenpaare des allgemeinen Substrats auszustatten. Auch würde die Wahrscheinlichkeit zu einer solchen continuirlich abnehmenden Ausbreitung der Reizmomente eines Reizelementes über das gesamte Farbensubstrat um so mehr zunehmen, je enger die Verwandtschaft zwischen den unmittelbar benachbarten Processen nach Einschlebung der coordinirten Elementarprocesse werden muss. Am wenigsten würde hierbei noch die annähernd gleichmäßige Wirksamkeit eines Nachbildes für sämtliche Reactionsfarben Einspruch erheben können, da ja das Verhältniss der beobachteten Nachbildwerthe auf den verschiedenen Reactionsfarben noch keineswegs so scharf festgelegt ist, dass nicht auch schon die Berechnung einer nur annähernden Gleichheit der absoluten Valenzsumme für jedes Gegenfarbenpaar in jedem beliebigen homogenen Reize auf Grund der übertragenen Hypothese zur Uebereinstimmung mit den Thatsachen ausreichen würde. Diese Annäherung, die sich auch hier durch ganz analoge Größenverhältnisse der hypothetischen Nebenvalenzen erreichen ließe, wäre aber eben für unseren Zweck noch zu wenig.

Es sei der Kreis in Fig. 7 mit  $W$  als Weißpunkt im Centrum die Darstellung des Farbenkreises, der mit den verschiedenen Stellen seiner Peripherie die einzelnen freien Erregungsprocesse einer bestimmten durch die Constanz des Radius repräsentirten Maßeinheit bedeutet, wie sie bei Einwirkung ideal homogener Lichtreize von äquivalenter Intensität isolirt sichtbar werden könnten. Auf diese

graphische Darstellung ist dann zugleich die Mischungsregel wieder ebenfalls ohne weiteres anzuwenden. Greift man nun eine beliebige dieser unter sich physiologisch völlig coordinirten Erregungsmöglichkeiten des gesammten Farbensubstrates, z. B. den durch  $I_1$  repräsentirten Process heraus, so kann der bei seiner ungehemmten Wirkung zwar nur  $I_1$  erregende Lichtreiz nach dieser Hypothese wiederum stets zugleich das ganze System von Farbendispositionen je nach der Verwandtschaft zu  $I_1$  anregen bis auf die Complementärfarbe zu  $I_1$ , wo die Anregung ein Minimum besitzt. Denkt man sich die Function

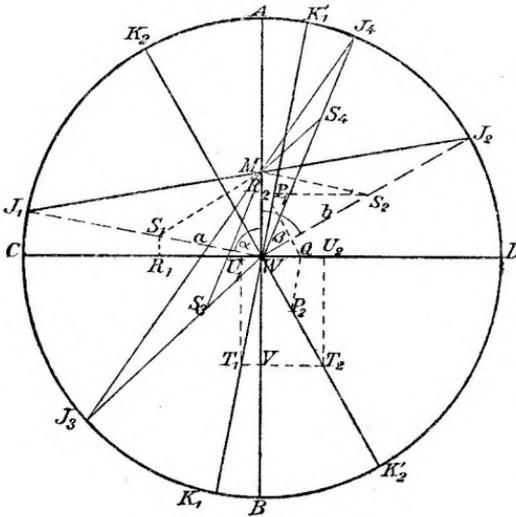


Fig. 7.

dieser Ausbreitung als eine besonders einfache, also die Abnahme als eine zur Winkelgröße der Entfernung aller angelegten  $\mathfrak{S}$  von  $I_1$  proportional fortschreitende, so entspräche die graphische Darstellung dieser Uebertragung der Hering'schen Hypothese auf die allgemeinste Form der antagonistischen Farbentheorie zwei Anfangsstücken einer Archimedischen Spirale, die den Weißpunkt  $W$  beiderseits

durch die Kreisfläche hindurch symmetrisch mit  $I_1$  verbänden. Dabei lässt sich nun die Resultante all dieser in dem einzigen homogenen Reize enthaltenen Reizmomente einfach nach der allgemeinen physikalischen Componentenzerlegung zusammenfassen und überblicken. Das ganze Mischungsgesetz kann ja in der graphischen Darstellung bekanntlich als einfache Construction des Kräfteparallelogramms aufgefasst werden, wenn man  $W$  als Angriffspunkt von Kräften denkt, deren Größe und Richtung den einzelnen Radien entspricht, welche nach den Punkten der gemischten Farben auf der Peripherie hinführen. So kann man also schließlich auch alle etwaigen durch das ganze System sich erstreckenden Nebenvalenzen nach zwei zu einander senk-

rechten Coordinaten von beliebiger Lage mit dem Schnittpunkt in  $W$  zerlegen und auf diesen zusammenfassen, wobei z. B. die eine Coordinate mit dem Radius der Farbe selbst, also hier  $I_1 W$  zusammenfallen kann, so dass die andere nach  $K_1 K'_1$  gerichtet ist. In diesem Falle hätten wir dann offenbar für die Nebenvalenzen eine ganz analoge Hilfsconstruction wie oben beim Farbenquadrat. Nur die Maßeinheiten im ganzen würden andere. Die Berechnung dieser Werthe im einzelnen thut hier nichts zur Sache. Es ist hier auch die Form der Function für die Ausbreitung der Nebenvalenzen durch das ganze System hindurch noch nicht von Belang, weil dieselbe ja unter Umständen erst noch nach dem Zwecke der ganzen Uebertragung passend gewählt werden könnte. Jedenfalls würde aber kaum etwas für die Aufhebung der Stetigkeit dieser Ausbreitung vorgebracht werden können, so dass in diesem Falle also auch noch der in der Figur nicht eingezeichneten rückwärtigen Verlängerung von  $I_1 W$  eine Summe von Nebencomponenten zufallen muss, während die senkrechte Coordinate  $KK_1$  mehr als die Hälfte des Gesamtwertes für  $I_1 W$  erlangt. Das ganze System würde also schließlich im einfachsten Falle als Superposition von mehreren nach  $I_1$  und der entgegengesetzten Seite gerichteten Farbenerregungen erscheinen, welche wie oben beim Farbenquadrat je die Hälfte der beiden senkrecht zu  $WI_1$  dargestellten Valenzen mit anregen. Auch hier wäre aber schließlich nur noch ein bestimmtes Quantum der Erregung  $I_1$  sichtbar, da sich alles andere gegenseitig antagonistisch aufhebt. Würden nun alle homogenen Reize wirklich in dieser Weise am ganzen Systeme angreifen, so wäre die ungefähr gleich starke Reaction aller beliebigen Farben auf das Nachbild wohl verständlich, wie ich hier bei der relativ geringen Bedeutung dieser Specialüberlegung für das Ganze nicht weiter auszuführen brauche. Nach welcher Richtung des Systemes auch eine Ermüdung bzw. Erholung vorhanden sein mag, sie wird sich in ähnlicher Weise äußern müssen, wie es im vorigen Abschnitt E für das Farbenquadrat abgeleitet wurde, weil das jedem homogenen Farbenreize entsprechende Axenpaar der gesamten Valenzen auf jeden Durchmesser des Kreises eine ähnliche Gesamtsumme von Componenten abgeben würde. Auch hier wären freilich schon Differenzen je nach Lage des Durchmessers zu jenen Axen vorhanden, weil die trigonometrischen Functionen je nach

dieser Lage verschiedene Größenbeziehungen bedingen, wie sogleich noch deutlicher werden soll. Doch würde eben wie vorhin gesagt die Präcision der Ableitung jener Nachbildcurven aus der Beobachtung zur scharfen Angleichung an solche Einzelfragen und zur eventuellen Widerlegung der Hypothese noch nicht ganz ausreichen.

Was diese ganze Uebertragung der Hypothese jedoch mit Sicherheit als unmöglich erweist, ist der Widerspruch mit dem v. Kries'schen Satz, bezw. die Unmöglichkeit, die zu dessen Erklärung nothwendige Unabhängigkeit der Gesamtvalezen einer Mischung von der Zusammensetzung der Mischfarbe durch irgend eine quantitative Specialisirung der Hering'schen Hypothese zu erreichen. Bezeichnet wiederum  $M$  eine beliebige Mischfarbe vom Farbenton  $A$ , so kann die verschiedene Herstellung aus homogenen Reizen durch die Drehung der Sehne  $I_1 I_2$  um  $M$  veranschaulicht werden, so dass also  $\mathfrak{S}_1$  und  $\mathfrak{S}_2$ , in den Maßverhältnissen  $MI_2 : MI_1$  gemischt, den nämlichen Effect  $M$  geben, wie z. B.  $\mathfrak{S}_3$  und  $\mathfrak{S}_4$  im Verhältniss  $MI_4 : MI_3$  u. s. w. Das Parallelogramm  $S_1 W S_2 M$  vergegenwärtigt den Mischungsprocess nach dem oben erwähnten Princip des Kräfteparallelogramms. Da  $\triangle I_1 S_1 M \sim \triangle M S_2 I_2$ , so müssen ja die »Kräfte«  $a = S_1 W = M S_2$  und  $b = W S_2 = S_1 M$  sich wirklich wie  $MI_2 : MI_1$  verhalten, und ist wegen  $S_1 M = S_1 I = b$  stets die gesammte Valenzeinheit der Tafel in der Größe des Radius  $W I_1$  garantirt. In gleicher Weise würden sich auch die nach obigem Princip hypostasirten Nebenvalezen  $W P_1$  von  $\mathfrak{S}_1$  nach  $W K_1$  und  $W K'_1$  mit den Nebenvalezen  $W P_2$  von  $\mathfrak{S}_2$  nach  $K_2$  und  $K'_2$  von je der Hälfte der Hauptvalezen  $a$  und  $b$  zu Nebenvalezen des  $M$  von ebenfalls je der halben Größe  $W Q = \frac{1}{2} W M$  nach der zu  $W A$  senkrechten Axe  $CD$  zusammensetzen. Die Größe  $W M$  bedeutet aber natürlich ebenso wie in dem Farbenquadrat nur die bei der Mischung frei bleibende Erregung, sie entspricht also der Differenz oder Resultante sämmtlicher Componenten, die von der vollständigen Valenz im Tone  $\mathfrak{S}_1$  von der Menge  $a$  und der andern im Tone  $\mathfrak{S}_2$  von der Menge  $b$  nach den beiden Richtungen  $AB$  und  $CD$  frei übrig bleiben, wie aus der Ableitung der Componenten nach diesen beiden Hauptrichtungen sofort zu erkennen ist. Die antagonistischen Componenten des  $a$  und  $b$  nach  $CD$  sind entgegengesetzt gleich, da natürlich  $\triangle S_1 R_1 W \cong \triangle M R_2 S_2$ , so dass  $R_1 W = R_2 S_2$ . Die Componenten

des  $a$  und  $b$  nach  $AB$  aber geben als gleichgerichtet in ihrer Summe  $MW$ , da  $MR_2 = S_1R_1$ . Diese Resultante bleibt auch hier natürlich für alle Lagen der Sehne durch  $M$  hindurch die nämliche, wie aus der von der Lage der Sehne völlig unabhängigen Congruenz der entsprechenden Dreiecke leicht ersichtlich ist. Es werden die Componenten nach  $CD$  also z. B. auch für die Mischung des  $M$  aus  $\mathfrak{S}_3$  und  $\mathfrak{S}_4$  im Verhältnisse  $MI_4 : MI_3$  entgegengesetzt gleich, und endlich für  $A$  und  $B$  gleich Null sein. Für die Componenten nach  $AB$  tritt jedoch z. B. für  $\mathfrak{S}_3$  und  $\mathfrak{S}_4$  die Differenz der Valenzen an die Stelle der Summe. Sonst könnte ja die Construction des Farbenkreises nicht einmal mit dem Mischungsgesetz übereinstimmen, das für gleiches Aussehen des  $M$  auch die gleichen freien Valenzen erfordert. Die absolute Summe dieser nicht hypothetischen Valenzen aber wird auch hier je nach der Lage der Sehne und der Lage von  $M$  mehr oder weniger beträchtlich differiren. Die geometrische Bedingung für das Zusammenwirken von  $a$  und  $b$  zum Resultate  $M$  ist ja eben in der Constanz der absoluten Summe von  $a$  und  $b$  gegeben, welche für jede beliebige Lage der Sehne dem Radius gleich bleiben muss, so dass also in dem bei der Drehung der Sehne variablen Dreiecke  $WS_1M$ , welches alle für uns in Betracht kommenden Stücke enthält, die eine Seite  $WM$  und die Summe der beiden andern  $a + b$  constant bleiben muss. Die Summen der vorhin bezeichneten Componenten der im einzelnen variablen  $a$  und  $b$  nach den Axen  $AB$  und  $CD$  sind dann, wie eine einfache hier nicht weiter auszuführende trigonometrische Betrachtung über die Abhängigkeit der Seitensumme von den Winkeln zeigt, von der Lage des  $I_1I_2$ , bezw. den Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$  der Seiten des Dreiecks unter sich und mit diesen Axen abhängig. Diese Abhängigkeit kann man aber eben hier nun nicht etwa dadurch aufheben, dass man die zu  $WI_1$  und  $WI_2$  u. s. w. in  $W$  senkrecht stehenden Axen  $K_1K'_1$  u. s. w. mit den in ihnen enthaltenen Nebenvalenzen hinzunimmt. Auch für die Nebenvalenzen auf  $WK'_1$  und  $WK'_2$  einerseits und  $WK_1$ ,  $WK_2$  andererseits gilt nur, dass für ihre Componenten nach  $CD$  die Resultante einer entsprechend großen Nebenvalenz des  $MW$  nach  $CD = WQ$  von der Lage der  $\mathfrak{S}$  unabhängig bleibt. Die Veränderung der absoluten Summe aller ihrer Componenten, die ebenso wie diejenige der Hauptvalenzen je nach Lage der Sehne variirt, ist jedoch nicht etwa dazu geeignet, die Ver-

änderungen der absoluten Summe der Hauptvalenzen der  $\mathfrak{S}$  zu compensiren und das Ganze stets zu einer constanten Maßeinheit der ganzen Valenztafel zu ergänzen, wie es beim Farbenquadrat der Fall war. Dies wird schon an dem rechnerisch einfachsten Beispiel der Function für die Ausbreitung der hypothetischen Reizmomente über das ganze System deutlich, wonach die Nebervalenzcomponenten nach  $WK_1$  und  $WK'_1$  beide wieder halb so groß wie  $a$ , diejenigen nach  $WK_2$  und  $WK'_2$  halb so groß wie  $b$  sind, was der oben erwähnten Archimedischen Spirale nicht mehr unmittelbar entspricht, aber zu dem ihr entsprechenden Endeffect doch nur mehrfach superponirt zu werden braucht. In diesem Falle erscheint die absolute Summe der Nebervalenzen nach  $K_1K'_1$ , auf die es hier allein noch ankommt, als  $WT_1 = WS_1 = a$  und diejenige nach  $K_2K'_2$  als  $WT_2 = WS_2 = b$ . Da ferner der Winkel  $\sphericalangle S_1WR_1 = \sphericalangle T_1WV = 90 - \alpha$  und  $\sphericalangle S_2WD = \sphericalangle T_2WV = 90 - \beta$ , so ist die gesammte für uns in Betracht kommende Summe  $a (\cos \alpha + \sin \alpha) + b (\cos \beta + \sin \beta)$ , ein Werth, der für die oben näher bezeichneten Bedingungen niemals von der Lage der Sehne unabhängig wird.

Daran wird auch nichts geändert, wenn man irgend eine andere Function der Ausbreitung der hypothetischen Nebervalenzen eines homogenen Reizes aufsuchen wollte. Bei der hier völligen physiologischen Coordination aller Erregungen der Peripherie des Farbenkreises dürfte dieselbe doch niemals von der speciellen Lage der Mischelemente  $\mathfrak{S}$  abhängig sein, sondern müsste stets die nämlich symmetrische Gruppierung um die Achse  $WI$  ausmachen. Dadurch kann aber die Abhängigkeit des Zusammenwirkens der Sinus- und der Cosinusfunction des Winkels  $\alpha$  und  $\beta$  von der speciellen Lage der Sehne niemals aus der Function entfernt werden. Auf irgend welche Bestimmungen einer nur annäherungsweise Erfüllung der Bedingungen brauche ich aber wohl nicht einzugehen, da sie der durch die Beobachtung wirklich nachweisbaren exacten Gültigkeit gerade des v. Kries'schen Satzes doch nicht genügen würden. Der principielle Hinderungsgrund gegen eine solche Verallgemeinerung jener unter Abschnitt E versuchten Ausgestaltung der Hering'schen Hypothese für diese allgemeinste Form der antagonistischen Farbentheorien ist ja übrigens auch unmittelbar aus einem Vergleich mit jenem Farbenquadrat zu ersehen. Es liegt in der Natur einer solchen Coordination aller einzelnen Farben-

töne, dass sie jedes beliebige Reizmoment von der in der ganzen Tafel festgehaltenen äquivalenten Maßeinheit, z. B. also das Moment für  $\mathfrak{S}_1$ , dieses ganze Maß ausschließlich in der gerade für diesen Farbenton  $\mathfrak{S}_1$  charakteristischen Erregungsweise besitzen lässt, so dass zu seiner Mischung die Valenzen zweier um  $90^\circ$  von einander entfernten benachbarten Farbtöne, etwa  $A$  und  $C$ , in der für die Tafel gültigen Maßeinheit nicht mehr ausreichen, am allerwenigsten für ein von  $A$  und  $C$  beiderseits um je  $45^\circ$  abweichendes  $\mathfrak{S}$ . Die entsprechende Menge von Farbenwerthen  $A$  und  $C$  würde nur durch Ueberschreitung der Gesamtsumme für diese Tafel, also mit dem unbrauchbaren Nebenerfolg der Aufhellung des  $\mathfrak{S}$  zu erreichen sein. Deshalb kommen dann natürlich auch je nach Lage der durch  $M$  gelegten Sehne Valenzen in die Mischung, deren Resultirende sich zwar immer wieder auf  $M$  reduciren muss, deren absolute Werthe aber eben wegen jener Ueberschüsse an den für die eben benützten Zwischenfarbe selbst charakteristischen Valenzen nicht mehr auf eine stets constante Combination der nämlichen Qualitäten gebracht werden können. Auch ist die Behandlung dieses allgemeinsten Falles der Ueberschreitung der Vierzahl von elementaren Processen zugleich die Erläuterung des Verhältnisses für jede geringere Vermehrung der Stufenzahl überhaupt. Immer würde mit der Ueberschreitung des Quadrates wegen ähnlicher Ueberschüsse über die aus zweien der vier Eckpunkte mischbare Zwischenfarbe ein Einfluss der speciellen Lage des um  $M$  gedrehten Strahles zu den ein für allemal beliebig ausgewählten Coordinatenaxen sich geltend machen müssen.

## 6. Die Erklärung der negativen Nachbilder als secundärer Beimischungen mit besonderer Rücksicht auf den Fechner-Helmholtz'schen Satz.

1. Die Ausführungen des ganzen vorigen Capitels bezogen sich durchweg auf den Versuch, die Erscheinungen der negativen Nachbilder, wie sie sich bei längerer Fixation von Helligkeits- und Farbdifferenzen nach den nunmehr näher bekannten quantitativen Verhältnissen entwickeln, ausschließlich auf Erregbarkeitsveränderungen der normalen Substrate zurückzuführen. Die Qualitäten der Vorgänge, welche ein bestimmter physikalischer Reiz nach Entstehung des

Nachbildes anzuregen und im allgemeinen theilweise zu freier Erregung zu bringen im Stande ist, werden nach diesem Erklärungsversuche nur in neuen Mengenverhältnissen angeregt. In der historischen Entwicklung entsprach die Ausgestaltung dieser Hypothese zuerst der einfachen Ermüdungstheorie, die bereits von Fechner wenigstens für die Helligkeitsnachbilder aufgestellt und von Helmholtz auf die negativen Nachbilderscheinungen überhaupt ausgedehnt worden war. Weiterhin wurden dann allerdings auch die Anschauungen von der Richtung der Veränderung der Erregbarkeitsfactoren als Herabsetzung oder Steigerung, welche natürlich auch schon bei v. Helmholtz miteinander in der Theorie inbegriffen waren, je nach den allgemeinen Sätzen der neuen Farbentheorien mannigfach complicirt und im engeren Anschluss an die quantitative Schätzung der Erscheinungen verfeinert. Aber gerade die allgemeine Gültigkeit des Fechner-Helmholtz'schen Satzes und die constante Qualität der Nachbildfärbung für alle Erscheinungen der negativen Nachbilder lassen diesen Erklärungsversuch doch niemals davon loskommen, dass allein an dem während der Ermüdung thätigen Substrate, bzw. zugleich an dem seiner Complementärfarbe eine Veränderung vorgegangen sei, so dass schließlich sogar zu den complicirten Beziehungen zwischen Reiz und Substrat Zuflucht genommen werden musste, damit man den v. Kries'schen Satz und die Erscheinung auf ganz beliebigen reagirenden Farben in ihrer thatsächlichen Größe erklären könne. Man verschafft sich hingegen beiden Sätzen gegenüber mit einem male eine viel freiere und in sich zunächst widerspruchslose Position, wenn man die Beimischungshypothese dem Fechner-Helmholtz'schen Satze nicht nur im allgemeinen, sondern auch für diese Erscheinungsweise des Nachbildes auf beliebigen Farben anzupassen versucht. Schon von Fechner war in der bekannten im ersten Theile meiner Arbeit näher bezeichneten Abhandlung neben der Auffassung des Helligkeitsnachbildes als einer Ermüdungserscheinung wenigstens für das Farbenachbild eine besondere Entstehung auf Grund einer Art von spontanen Ausgleichungsvorgängen gegenüber der Umgebung wegen des nur theilweisen Verbrauches der gesammten Farbenenergie als wahrscheinlich hingestellt worden, ohne dass der ganze hypothetische Process näher ins Einzelne ausgeführt worden wäre. U. a. hat aber dann vor

allem auch F. C. Donders in einer concreteren Ausgestaltung dieses älteren Gedankens<sup>1)</sup> in seiner Untersuchung »Ueber Farbensysteme«<sup>2)</sup> die farbigen Nachbilder als Beimischungen spontaner Erregungen aufgefasst, welche sich aus der secundären, ohne Reizeinwirkung vor sich gehenden Dissociation der Moleküle ergeben, nachdem die primäre Dissociation der Ermüdungsfarbe auf Grund der Einwirkung des fixirten Reizes nur eine theilweise Zersetzung des auf vollständigen Verbrauch in dem Weißprocess angelegten Substrates herbeiführen konnte. Die Form, in der hier das Ganze gegeben war, schloss sich natürlich an die specielle Farbentheorie Donders' an, gegen welche sich Hering in der bereits citirten Abhandlung in verschiedenen Punkten gewandt hatte. Hering hat speciell gegen diesen Punkt eingewandt<sup>3)</sup>, dass in diesem Falle ein Blau für sich allein eine gleiche Ermüdung für Weiß herbeiführen müsste wie das objective Weiß, welches durch gleichzeitige Reizung mit dem zu Blau complementären Gelb erregt wird. Dieser Einwand bezieht sich aber natürlich nur auf eine Form der Theorie, welche den Helligkeitsprocess noch nicht verselbständigt hat. Da nach einer solchen Abtrennung die Veränderungen im Weißprocess nur noch von dem mit der Ermüdungsfarbe gleichzeitig gegebenen Weißprocess abhängig sind, wie er der gesammten Intensität der äußeren Reize proportional ist, so wird Blau allein die Weißsubstanz natürlich viel weniger als das aus Blau und dem ihm hinsichtlich des Farbenprocesses äquivalenten Gelb gemischte Weiß verändern, gleichgültig ob man nun auch die Veränderung im Weißprocess nach der Erregbarkeits- oder der Beimischungshypothese erklären will.

Was mit einer derartigen Umgestaltung der Hypothese von Donders, wie vom Standpunkte der Beimischungshypothese überhaupt sehr einfach erklärt wäre, ist offenbar der v. Kries'sche Satz, wie schon im vorigen Capitel angedeutet wurde. Ueber die gesammte Fläche des Nachbildes lagert sich ja ganz gleichmäßig

<sup>1)</sup> Vergl. E. Hering, Kritik einer Abhandlung von Donders »über Farbensysteme«, Lotos, Neue Folge, II, 1882, S. 68, hier S. 84.

<sup>2)</sup> F. C. Donders, Ueber Farbensysteme, Graefe's Archiv f. Ophthalmologie XXVII, 1, 1881, S. 154.

<sup>3)</sup> a. a. O. S. 84 f.

die Beimischung, so dass das gleiche Aussehen der Mischung ohne Rücksicht auf ihre physikalische Herstellung an und für sich zum gleichen Endeffect auch nach Entstehung der »Ermüdung« hinreichen muss. Auch die Aehnlichkeit der Werthe des negativen Nachbildes auf allen beliebigen reagirenden Farbentönen wäre leicht zu erledigen, wenn es sich um eine spontane Beimischung handelt. Hingegen fehlt der Hypothese in dieser Form noch durchaus die Erklärung der Abhängigkeit dieser secundären Beimischung vom reagirenden Reiz, d. h. also die Subsumption des Fechner-Helmholtz'schen Satzes. Eine spontane secundäre Dissociation, wie sie von Donders angenommen wurde, müsste doch eine größere Annäherung an eine ungefähre Constanz des Werthes bei allen Reactionsreizen herbeiführen, wie es allerdings früher ohne quantitative Bestimmungen noch nicht mit Sicherheit verneint werden konnte. Das secundäre Farbensubstrat, welches durch die Restbestände auf Grund einseitiger Reizung gegeben und daher in gewisser Weise als ein abnormes zu bezeichnen ist, darf überhaupt nur nach Maßgabe der neuen reagirenden Reize in Action treten<sup>1)</sup>. Wie dieses secundäre Substrat des Näheren zu denken ist, wäre natürlich ein rein physiologisch-chemisches Problem und kann auch hier die subjective Methode nur die formalen Principien an die Hand geben. Hiernach muss also die dem secundären Substrat entsprechende Qualität ausschließlich in der Nachbildfarbe, d. h. in der Complementärfarbe zur ermüdenden, bestehen. Hieraus könnte aber vielleicht abgeleitet werden, dass es nun doch wiederum nur den ihm besonders adäquaten Reizen proportional in Action treten würde. Die subjective Nachbildfarbe selbst sowohl wie die physiologische Zurückführung auf Restsubstrate und dergl. wür-

---

<sup>1)</sup> Das nämliche gilt natürlich auch bezüglich aller andern theilweise noch früheren Versuche, das negative Nachbild als eine selbständige spontane Erregung ohne Rücksicht auf den reagirenden Reiz aufzufassen. Auch die complementären Erholungsvorgänge an der von der Farbe gereizten Stelle und die gleichartigen Prozesse in der Umgebung, welche nach der Hering'schen Farbentheorie einen wesentlichen Bestandtheil der negativen Nachbilderscheinung bilden, könnten als bloße Dispositionen zu selbständig beigemischten complementären oder gleichfarbigen Sondererregungen gedacht werden, welche erst von beliebigen reagirenden Reizen, dem Helligkeitsprocesse direct proportional ausgelöst werden. Nur erscheint eine so abnorme Beziehung der Reize zu den nur in ihrer Erregbarkeit veränderten Substraten weniger wahrscheinlich.

den natürlich die zur Ermüdungsfarbe complementären Reize als besonders adäquat erscheinen lassen. Es müsste also gerade umgekehrt wie bei der Erregbarkeitshypothese in ihrer einfachsten Form ohne Annahme der Nebervalenzen eine Einschränkung des Nachbildes auf die Complementärfarbe und ihre Umgebung vorhanden sein, wie es den Thatsachen widerspricht. Eine Verbindung der Erregbarkeitshypothese mit der in dieser Weise ausgestalteten Beimischungshypothese ist aber wegen des v. Kries'schen Satzes nur unter der im vorigen Capitel durchgeführten Ausgestaltung der Erregbarkeitshypothese möglich, welche dann ihrerseits wiederum die Beimischungshypothese überhaupt ganz unnöthig machen würde. Außerdem ist aber eine solche mehrfache Erklärung des analogen Thatbestandes aus so heterogenen Principien schon an und für sich nicht sehr wahrscheinlich. So bleibt also für eine in sich consequente Durchführung dieser zweiten Hypothese nichts weiter übrig, als die secundären Substrate zu den reagirenden Reizen in eine solche Beziehung zu setzen, dass ausschließlich deren »Aequivalenzwerth«, wie er in der Reaction auf die reinen Helligkeitsnachbilder zu Tage tritt, über die Miterregung entscheidet, gleichgültig, welche Qualität diese Reize im normalen Hauptsubstrate erregen. Die Zersetzung des secundären Substrates müsste eine ähnlich allgemeine Wirkung der Reize sein, wie die Erregung des reinen farblosen Helligkeitsprocesses, sei es, dass infolge eines besonders labilen Gleichgewichtes der Restsubstrate die äußeren Reize unabhängig von ihrer Wellenlänge in größerer Unmittelbarkeit die Nachbildfarbe proportional zu ihrer Intensität erregen, oder dass erst der unmittelbar erregte Weißprocess diesen Nebenerfolg auf das secundäre Farbsubstrat mit sich führt. Von diesem zweiten der beiden für die Beimischungshypothese möglichen Gesichtspunkte aus erschiene das negative Farbennachbild gewissermaßen als eine farbige Entartung des Weißprocesses. Die gleichzeitige Bedeutung des für die Helligkeitsnachbilder gültigen »Aequivalenzverhältnisses« für die Farbennachbilder wäre ja mit beiden Deutungen verträglich. Ebenso wie für die Erklärung dieser Uebereinstimmung nach der Erregbarkeitshypothese eine relative Gleichwerthigkeit einer bestimmten Wellenlänge für das primäre Helligkeits- und Farbsubstrat angenommen werden musste, könnte auch das Intensitätsverhältniss der unmittelbaren Erregung des Restsubstrates

durch die äußeren Farbenreize verschiedener Wellenlänge nach der ersten Variante der Beimischungshypothese dem Aequivalenzverhältnisse entsprechen. Am einfachsten begriffe sich aber diese Uebereinstimmung wohl nach der zweiten Auffassung mit ihrer näheren Zuordnung der Erregung der Restsubstrate zu dem jeweils actuellen Weißprocesse, weil hier über das Quantitätsverhältniss der Wirkungsfähigkeit auf das Helligkeits- und Farbensubstrat überhaupt nichts ausgemacht zu werden braucht.

Auch für die Beimischungshypothese ist natürlich überall die Annahme zulässig, dass die secundären Substrate, welche von beliebigen Reizen mittelbar oder unmittelbar erregt werden können, sich nicht nur an der von der Ermüdungsfarbe getroffenen Stelle mit einer deren Complementärfarbe entsprechenden specifischen Qualität ihrer Erregungen entwickeln, sondern auch, auf Grund von Contactwirkungen, in ihrer Nachbarschaft mit der nämlichen Qualität wie die Ermüdungsfarbe.

Die Abweichungen von dem reinen Aequivalenzverhältniss, wie sie für die verschiedenen Ermüdungsfarben als jeweilige Begünstigung des Nachbildwerthes für die Ermüdungsfarbe selbst beobachtet wurden, müssten von diesem Standpunkte aus natürlich ganz anders erklärt werden, als bei der Erregbarkeitshypothese. Sie scheinen ja der Auffassung des Nachbildes als Miterregung eines complementärfarbigem Restsubstrates ganz besonders zu widersprechen, weil man von hier aus, wie oben gesagt, eher eine Steigerung des Werthes für die zur ermüdenden Farbe complementäre Region erwarten müsste. Es wurde aber schon oben erwähnt, dass die Zurückführung dieser Abweichungen auf ein Zurückbleiben des Erholungsfactors hinter dem Ermüdungsfactor, wie sie natürlich allein der Erregbarkeitshypothese angepasst ist, keineswegs die einzige Erklärungsmöglichkeit ausmacht. Die andere Möglichkeit ist aber nun vor allem auch für die Beimischungshypothese widerspruchslos durchführbar. Alle quantitativen Messungen, sogar die sog. plötzliche Einstellung auf subjective Gleichheit, welche in den Messungen dieses dritten Theiles gar nicht einmal zur Anwendung kam, bedürfen ja immer einer gewissen Zeit, während der sich bereits neue secundäre Vorgänge entwickeln können. Sobald z. B. nach Fixation einer rothen Fläche auf grauem Grunde das Nachbild auch auf rothem Grunde gemessen wird, so wird die Steigerung

der complementären Beimischung keineswegs sogleich mit dem Ende der eigentlich gewünschten Entstehungszeit abschließen. Es wird ja an der bisher von Roth erfüllten Stelle fortgesetzt Roth einwirken und bei der gewählten reagirenden Intensitätsstufe sogar noch etwas mehr als vorher. Wenn man also auch annimmt, dass keine weitere Steigerung des gesammten Nachbildwerthes in der bis zum Abschluss der Messung nothwendigen Zeit eintritt, weil ja nun auch in der ursprünglich grauen Umgebung Roth einwirkt, so wird doch die Beibehaltung des Rothreizes überhaupt dem Verschwinden der secundären Beimischung weniger günstig sein. Kommt hingegen die Complementärfarbe zur Reaction, so entstehen von Anfang an bei dem Ueberwiegen des Grün über das an der Nachbildstelle noch beigemischte Roth, welches höchstens noch ein etwas weniger gesättigtes Grün sehen lässt, Antriebe zur Entstehung des entgegengesetzten Nachbildes, welche schließlich einen etwas kleineren Werth für diese Region auffinden lassen. Damit ist keineswegs vorausgesetzt, dass das von der Fixation des Roth her stammende Restsubstrat, entgegen der obigen Behauptung, gerade durch Einwirkung des Grün zunächst doch in einer intensiveren Nachbildwirkung zur Geltung kommen müsste. Die Störung des Nachbildes bei Reaction der Complementärfarbe würde ja nach dieser Erklärung nicht durch intensivere und raschere Aufzehrung des Restsubstrates in actualer Thätigkeit, also unter subjectivem Auftreten der Nachbildfärbung, sondern durch sofortige Anregung zur Entstehung der antagonistischen Restsubstrate erklärt sein. Es würde also das Restsubstrat und das farbige Nachbild bei successiver Einwirkung von Complementärfarben in ähnlicher Weise ohne besondere begleitende Empfindungen gestört, wie es bei simultaner Einwirkung von Complementärfarben überhaupt nicht entstehen kann. Die relativ geringe Größe all dieser Abweichungen vom reinen Aequivalenzverhältniss steht einer solchen Zurückführung auf diese in der Dauer der Messung begründeten Beobachtungsfehler keineswegs entgegen, wobei übrigens die Möglichkeit einer anderen vielleicht noch passenderen Variante dieser Vermuthung gern zugestanden werden soll. Um so leichter begreift sich aber dafür nach der Beimischungshypothese die große Aehnlichkeit der Curven bei Hell- und Dunkeladaptation. Bei der Erregbarkeitshypothese bedurfte ja die Erklärung des immer noch relativ bedeutenden Werthes für die complementäre Region eines besonderen

Zusatzes, der den Erholungsstand für sämtliche Farben in der Dunkeladaptation als einen immer noch untermaximalen auffassen ließ. (S. S. 111.) Für die Beimischungshypothese muss höchstens umgekehrt wieder besonders erklärt werden, warum die Wirkung in der complementären Region relativ etwas geringer ist, als bei Helladaptation, und lässt sich auch hier diese Thatsache wie bei Helladaptation aus der entgegengesetzten Wirkung bei Reaction der Complementärfarbe in Folge der günstigen Erholungsverhältnisse dem Verständniss näher bringen.

Als Einfluss der verschieden starken actuellen Erregung des secundären Substrates durch den reagirenden Reiz könnten hingegen die Beobachtungen über den Verlauf des allmählichen Verschwindens der Nachbildwirkung bei den verschiedenen reagirenden Reizen angeführt werden, wie sie schon in den beiden ersten Theilen der Arbeit mitgetheilt wurden. In diesen Messungen glaubte ich gefunden zu haben, dass ein negatives Nachbild um so rascher verschwinde, je größer die reagirende Intensität war, je höher sich also die entsprechenden Nachbildwerthe nach dem Fechner-Helmholtz'schen Satze beliefen. Bedenkt man, dass die zur reagirenden Intensität proportionale Steigerung des Nachbildwerthes nach der Beimischungshypothese als eine stärkere Inanspruchnahme der Restsubstanz betrachtet werden muss, so wird eine zum Nachbildwerth proportionale Geschwindigkeit der vollständigen Verbrauchung des Restsubstrates, das nach Abschluss des Ermüdungsreizes eine endlich begrenzte Menge besitzt, besonders leicht begreiflich.

Wenn man nun auch für das farbige Nachbild diese Beimischungshypothese als nothwendig zugeben will, so kann man trotzdem für das Helligkeitsnachbild immer noch gleichzeitig die Erregbarkeitshypothese beibehalten, weil hier zur Ermöglichung der letzteren niemals jene complicirten Hypothesen nothwendig werden, welche durch den v. Kries'schen Satz und die Wirkung auf beliebigen Farbentönen bei den farbigen Nachbildern erforderlich wurden. Auch Fechner hat ja, wie erwähnt, eine besondere Betrachtungsweise für die Veränderung der subjectiven Farbauffassung für geboten erachtet.

Allerdings ist ja die Durchführung der Beimischungshypothese auch für das Helligkeitsnachbild in einer in sich widerspruchslosen

Weise möglich. Ohne weiteres könnte zunächst die Aufhellung an den während der Ermüdung dunkleren Stellen als eine solche positive Miterregung eines secundären Helligkeitssubstrates in Betracht kommen. Hier fällt dies ja ganz und gar mit der einfachen Erregbarkeitssteigerung des Weißsubstrates überhaupt in seinem Endeffecte zusammen. Die zur Intensität proportionale Verdunkelung der im Ermüdungsbilde helleren Stellen aber wird ohne Annahme eines positiven, den übrigen Erregungen coordinirten Schwarzprocesses nach der Beimischungshypothese höchstens dadurch erklärt werden, dass man die auch hier angenommenen Restsubstanzen nach Einwirkung des Weißprocesses als eine Hemmung oder Absorption der auf das normale Weißsubstrat eindringenden mittelbaren oder unmittelbaren Reizwirkungen auffasst. Die Proportionalität des Werthes zur reagirenden Helligkeit würde hierbei geradezu nach dem einfachsten Gesichtspunkte als proportionaler Abstrich von der Gesamtwirkung auf Grund jener Hemmung oder Absorption aufzufassen sein. Damit wäre aber bei dem Versuch zur Vereinheitlichung sogar für das Helligkeitsnachbild selbst ein zweifacher Gesichtspunkt zur Erklärung nothwendig geworden, was eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit für sich besitzt. Es würde also eine einheitliche Durchführung der Beimischungshypothese für die Helligkeitsnachbilder nur dadurch möglich sein, dass man die zur reagirenden Helligkeit ebenfalls direct proportionale Verdunkelung der im Ermüdungsfelde relativ helleren Stellen als eine proportionale Miterregung eines secundären Schwarzsubstrates auffasst, welche ebenso unabhängig von der normalen Helligkeitsqualität des auslösenden Reizes erfolgt, wie die secundären Farbenprocesse nach dieser Theorie in der specifischen Qualität der Nachbildfarbe von der speciellen Farbenqualität des reagirenden Reizes unabhängig gedacht werden müssen. Bei der Beimischung des farbigen Nachbildes ist nun allerdings der Weißprocess eine noch einigermaßen verständliche Vermittelung, welcher ebenso, wie alle einzelnen Farbenerregungen, als positiver Process zu denken ist, während hier alle Schwierigkeiten in Betracht kämen, welche dem Schwarz schon in der gewöhnlichen Auffassung eine Sonderstellung gegenüber den positiven Erregungen zuschreiben lassen und bereits früher der Hering'schen Auffassung des Schwarzprocesses gegenüber öfters zur Sprache kamen. Der

Unterschied zwischen dem Helligkeits- und Farbenprocess ist übrigens groß genug, um auch den Verlauf der beiderseitigen Adaptationen als einen verschiedenartigen vermuthen zu lassen. Bei genauerem Zusehen erweist sich nicht einmal der Vorsprung an Einheitlichkeit bei dieser gewaltsamen Uebertragung der Beimischungshypothese auf die Helligkeitsnachbilder als irgendwie bedeutend. Berücksichtigt man nämlich, dass auch die Beimischungshypothese für die Farbenachbilder doch immer noch insofern ausschließlich mit dem Begriffe der Erregbarkeit arbeiten muss, als auch sie die zur reagirenden Intensität proportionale Nachbildgröße nur durch Beibehaltung der allgemeinen positiven Erregbarkeitsbeziehung zwischen den irgendwie vermittelten Reizen und dem secundären Substrate erklären kann, so wird man die ausschließliche Durchführung der Erregbarkeitshypothese für das Helligkeitsnachbild auch unter Anwendung der Beimischungshypothese für die farbigen Nachbilder als keine unwahrscheinliche Störung der Einheitlichkeit innerhalb der gesammten Erklärung der negativen Nachbilder ansehen. Auch besteht dann für eine Farbentheorie, welche die Beimischungshypothese annimmt, die Möglichkeit, die Verschiedenheiten zwischen den einzelnen Farben je nach dem Grade der gesammten Helligkeitsadaptation einer Stelle, also das Purkinje'sche Phänomen u. s. w., auch weiterhin in der bisherigen, einfachsten Weise als Veränderungen der Erregbarkeitsverhältnisse aufzufassen. Auch die Steigerung oder Verminderung der Farbenerregbarkeit im ganzen kann daneben beibehalten werden. Es dürfen nur eben keine einseitigen Veränderungen der Erregbarkeit für eine einzige Farbe, z. B. die Ermüdungsfarbe für eine bestimmte Intensitätsstufe angenommen werden, durch welche alle Hülfsypothesen des vorigen Capitels zur Erklärung des v. Kries'schen Satzes wieder nothwendig würden. Die Veränderung der gesammten Farbenerregbarkeit und insbesondere die eben genannte ausschließlich von der Helligkeitsstufe abhängige Abweichung des gegenseitigen Verhältnisses der verschiedenen Farben ist hingegen von den Schwierigkeiten, die zu jenen Hülfsypothesen des vorigen Capitels nöthigten, völlig unabhängig. Die Annahme solcher Veränderungen der Farbenerregbarkeit, welche von den negativen Nachbildern natürlich ohnehin scharf geschieden sind, kann also mit der Erklärung der negativen Nachbilder als einfacher Beimischungen

völlig widerspruchslos zusammen bestehen. Nach alledem besitzt also diese zweite Hypothese für alle, welche nicht die specielle Form der Vierfarbentheorie nach Capitel 4, E übernehmen wollen, für die Erklärung des negativen Farbennachbildes einstweilen hinreichende Empfehlungen. Im Gegensatze zur Erregbarkeitshypothese, welche sich zwar mit der Abhängigkeit des Farbennachbildes von den reagirenden Farbtönen eher in Uebereinstimmung bringen ließ, aber durch den v. Kries'schen Satz so sehr specialisirt wurde, ist von ihr vor allem der letztere ohne besondere Zusätze zu erklären, während freilich hier die Wirksamkeit des farbigen Nachbildes für beliebige Farbtöne, also die Unabhängigkeit der Erregung des Restsubstrates von der Wellenlänge, zu kühneren Hilfs-hypothesen nöthigte, die vorläufig wohl ebenfalls durch keine anderweitigen Beobachtungen unterstützt werden können.

2. Die Beimischungshypothese stimmt in der hier beschriebenen Form mit der Erregbarkeitshypothese doch wenigstens insofern völlig überein, als zunächst, vom physiologischen Standpunkte aus betrachtet, die Miterregung des secundären Substrates in einer dem Reize entsprechenden Intensität mit der Einwirkung des reagirenden Reizes ebenso untrennbar verknüpft ist, wie nach der Erregbarkeitshypothese die veränderte Functionsfähigkeit des normalen Substrates jedem neuen adäquaten Reizmomente gegenüber zur Geltung kommen muss. Sie leistet somit ebenso wie jene der gewöhnlichen Auffassung von der psychologischen Erscheinung der negativen Nachbilder Genüge, wonach dieselben den Empfindungsthatbestand während der ganzen Nachwirkung continuirlich in ihrem Sinne verändern, so dass man sie auch in allen beliebigen Zeitpunkten dieses Verlaufes erkennen kann, so oft die allgemeinen Voraussetzungen für eine hinreichend vollkommene Analyse der subjectiven Ausfüllung des jeweiligen Sehfeldes in den augenblicklichen Beobachtungsbedingungen erfüllt sind. Da jedoch die Beimischungshypothese das negative Nachbild durch ein besonderes Substrat physiologisch fundirt sein lässt, welches neben dem normalen Substrate in Thätigkeit tritt, so bliebe sie auch mit einer anderen Auffassung vom Wesen der psychologischen Erscheinung der Nachbilder verträglich, wonach der Empfindungsthatbestand, welcher der Erregung des Restsubstrates durch den reagirenden Reiz entspricht,

nur unter besonders günstigen Bedingungen zur normalen Empfindung sich hinzugesellen kann, wenn nämlich der Wettstreit der verschiedenen gleichzeitigen Prozesse im normalen und im secundären Substrate zu Gunsten des selbständigen Nachbildprocesses ausfällt. Martius hat bekanntlich diese neue Auffassung für alle negativen Nachbilder durchzuführen versucht<sup>4)</sup>. Nach den vorigen Ausführungen über die Beimischungshypothese überhaupt bestünde hiebei allerdings gerade für die Helligkeitsnachbilder, an denen Martius seine Theorie zunächst klar gemacht hat, die besondere schon vorhin erwähnte Schwierigkeit, dass die zur reagirenden Intensität ebenfalls proportionale Verdunkelung, welche nach der auch von Martius getheilten Auffassung wenigstens einen Theil der im gesammten negativen Nachbildwerth bestehenden Modificationen ausmacht, als selbständige positive physiologische Erregung aufgefasst werden müsste, die auch psychologisch als besondere Empfindungscomponente im Wettstreit verselbständigt werden könnte, so dass sie im Bewusstseinscorrelat der betreffenden subjectiven Sehfeldstelle fehlen und wieder auftreten kann. Außerdem könnte ja für die Erklärung der zur reagirenden Helligkeit direct proportionalen Verdunkelung von Seiten der Beimischungshypothese höchstens noch zum Princip einer proportionalen Absorption der Reizwirkung durch Restsubstrate gegriffen werden. Damit wäre aber dann schon von vorne herein ausgeschlossen, dass das Nachbild während des Vorhandenseins physiologischer Restsubstrate an der betreffenden Stelle auf Grund eines centraleren Wettstreites für die Helligkeitsempfindung nicht immer zur Geltung zu kommen brauche. Martius müsste also dann einen Theil der Helligkeitsnachbilder, nämlich die Verdunkelungen, aus seiner Hypothese ausschalten oder umgekehrt wie eine Ermüdungstheorie, die alle negativen Helligkeitsnachbilder aus verschiedenen starken Verdunkelungen ableitet und alle Aufhellungen nur für relative und scheinbare erklärt, nun alles als Aufhellungen der im primären Bilde relativ dunkleren Stellen auffassen und alle Verdunkelungen für nur relative und scheinbare halten, um alle Modificationen wenigstens auf eine den übrigen Vorgängen coordinirte positive Erregung zu

<sup>4)</sup> G. Martius, Das Gesetz des Helligkeitswerthes der negativen Nachbilder. Beiträge zur Psychologie und Philosophie. I, 1, 1894 S. 17 ff. und: Ueber die Dauer der Lichtempfindung, I, 3, 1902 hier speciell S. 362 ff.

basiren. Dem ständen aber natürlich die nämlichen Schwierigkeiten entgegen, die Martius gegen den umgekehrten Versuch geltend machte. Für die Helligkeitsnachbilder begegnet also schon die jener Wettstreithypothese entsprechende Verwerthung der physiologischen Beimischungshypothese den eben genannten Bedenken, ganz abgesehen von den schon früher erwähnten Schwierigkeiten, welche gegen die Annahme eines gegenseitigen Wettstreites zwischen den einzelnen Erregungscomponenten, die an der nämlichen Sehfeldstelle von einem Auge herkommen, geltend gemacht werden können und gerade mit der von Martius selbst angeführten Analogie zu dem doch stets empfundenen Weißprocesse<sup>1)</sup> neben dem Farbenprocesse nur vermehrt werden. Für die farbigen Nachbilder könnte wenigstens gegen die Beimischungshypothese nichts eingewendet werden und würde höchstens die Formulirung des physiologischen Wesens, des Nachbildes, wonach dasselbe »wahrscheinlich auf einem besonderen, durch die peripheren Reizvorgänge nur eingeleiteten, selbständig verlaufenden Prozesse beruht«<sup>2)</sup>, durch die Anerkennung der für die Miterregung selbst wesentlichen Abhängigkeit vom reagirenden Reize im Sinne des Fechner-Helmholtz'schen Satzes zu ergänzen sein. Bei den farbigen Nachbildern ist aber wiederum gerade der besondere psychologische Thatbestand, die Unerkennbarkeit der negativen Nachbilder während einer raschen Augenbewegung und im ersten Momente nach derselben u. s. w. nicht so ausgeprägt, wie ebenfalls schon früher hervorgehoben wurde<sup>3)</sup>. Die Möglichkeit einer einseitigen Durchführung jener psychologischen Auffassung vom Wesen der negativen Nachbilder für einen beschränkten Theil des ganzen Gebietes würde aber natürlich nichts helfen.

Mit Recht hat aber Martius die physiologische Erklärung des Thatbestandes in die zweite Linie gerückt, welche erst nach der Analyse des subjectiven Thatbestandes versucht werden kann, und so bleibt auch für seine Wettstreithypothese die wichtigste Frage zunächst die psychologische Erscheinung der Nachbilder in einer thatsächlichen Modification der Empfindung als solcher, welche wie erwähnt nach seiner Theorie keineswegs dem selbständigen physiolo-

1) Ebenda I. 3 S. 362.

2) Ebenda I, S. 91.

3) Philos. Studien Bd. XVI, S. 475 ff.

gischen Prozesse ohne weiteres dauernd parallel gehen. In der ersten Veröffentlichung dieser Nachbildmessungen habe ich denn auch diese zunächst rein psychologische Frage ausführlicher besprochen und ich versuchte dabei, auf das Wesen der subjectiven Analyse des Sehfeldes überhaupt einzugehen<sup>1)</sup>. Dabei stellte ich mich wie bisher ganz auf den Boden der gewöhnlichen Auffassung, wonach das Nachbild auch psychologisch als eine während der ganzen Nachwirkung continuirlich anhaltende Modification der Gesichtsempfindungen an der betreffenden Sehfeldstelle ausmacht, die allerdings bei ungünstigen Beobachtungsbedingungen unerkant bleiben muss, insbesondere bei nicht völlig starrer Fixation und den hieraus folgenden Schwierigkeiten der Analyse subjectiver Gesichtsercheinungen, bei nur mittlerem Helligkeitswerthe der Nachbilder, bei mangelnder Uebung in der Abstraction subjectiver und in der Peripherie gelegener Erscheinungen etc., wie schon Hering in der Hauptsache ausgeführt hatte. Durch die Erwiderung, die Herr Professor Martius jenen Ausführungen gewidmet hat<sup>2)</sup>, scheint mir dieser entscheidende Punkt nicht entkräftigt zu sein. Martius betont nur die lange Zeit, welche ungeübte Beobachter zum Erkennen von Nachbildern trotz Angabe von Fixationsmarken auf der reagirenden Fläche brauchen. Und doch treten gerade bei diesen Beobachtern die sämmtlichen Gründe zum Uebersehen des Nachbildes in Kraft, ganz abgesehen von unvermeidlichen Fixationsschwankungen, die jedenfalls im naturgemäßen Betrachten der Gegenstände beim Interesse für ihre objectiven Eigenschaften, insbesondere bei Beginn des Fixationsversuches wirklich das Normale sein dürften. Ist hingegen die Fixation begünstigt, weil man überhaupt den Blick von vorne herein nicht verschieben ließ, dann bedarf es gar keiner besonderen Umstände, welche die Erkennung und Beachtung einer besonderen Beimischung begünstigen, um die Modification der Empfindungen auch bei dem ungeübtesten Beobachter indirect feststellen zu lassen, wie die Einstellungen auf subjective Gleichheit mit der Umgebung nach längerer Fixation nach meiner Methode bei den ungeübtesten Beobachtern zeigen<sup>3)</sup>. Auch Martius nimmt ja an, dass die zu-

1) Philos. Studien Bd. XVI, S. 494.

2) a. a. O. I, 3 S. 362 ff.

3) Philos. Studien XVI, S. 493.

nächst fixirte Fläche vor der Blickbewegung ohne weiteres immer modificirt gesehen wird. Es ist aber doch wohl nicht ohne weiteres leicht verständlich, wie die Ruhelage des Auges allein für sich die hinreichende Bedingung für die anhaltend ganz bestimmte Entscheidung des Wettstreites zwischen den gleichzeitig an einer beliebigen Stelle des Sehfeldes vorhandenen Erregungen im Sinne einer Begünstigung des Nebenprocesses sein soll, wenn man sich noch dazu für diesen Enderfolg der einmal in der Empfindung zur Geltung gekommenen Modification gar nicht als eines besonderen Elementes bewusst zu sein braucht. Ein solch einseitiger Verlauf ist z. B. auch beim binocularen Wettstreit unter ähnlichen Concurrentzbedingungen nicht vorhanden.

Es scheint mir aber gerade für die Brauchbarkeit der Martius'schen Messungsmethode, die als einfache Beobachtung von der genannten Theorie wohl zu unterscheiden ist, von Wichtigkeit, dass auch der hinreichend geübte Beobachter nach Ausführung einer raschen Blickbewegung thatsächlich niemals das beabsichtigte Object sogleich vom ersten Moment an ganz starr fixiren kann, wofür ebenfalls mehrere Gründe zusammenwirken. Auch abgesehen von den positiven Nachwirkungen, welche das negative Nachbild im allerersten Momente compensiren können, wird für jeden Beobachter eine rasche Blickbewegung nicht plötzlich, sondern allmählich am Ziele angehalten. Es gibt einen Uebergangsaugenblick, in welchem keine scharfe Unterscheidung benachbarter subjectiver Helligkeitsdifferenzen möglich ist, wohl aber ein Gesamteindruck, der seinerseits im ganzen mit der bereits apperipirten Helligkeit des zuerst fixirten Objectes verglichen werden kann. Ich habe also nicht etwa »durchaus ohne Grund«, sondern überhaupt nicht geglaubt, dass bei Martius selbst in der Anwendung seiner Methode ein Moment entscheide, das nur mit der Ungeübtheit in der Fixation u. dergl. verbunden vorkommt, sondern ich war gerade bemüht, die in der Natur der Analyse der subjectiven Gesichtswahrnehmungen liegenden Gründe für die allgemeine Möglichkeit und den eindeutigen Verlauf der Martius'schen Methode aufzusuchen. Dass zunehmende Uebung in der willkürlichen Augenbewegung und der subjectiven Analyse den Moment bis zur Wiederauffindung des Nachbildes immer kürzer werden lässt, so dass ein mehr auf die

Analyse der objectiven Verhältnisse angelegter Beobachter schließlich die Messungen nach der Martius'schen Methode bequemer ausführen wird, wird trotzdem zugestanden werden müssen. Der auf die Analyse subjectiver Erscheinungen eingeübte Beobachter müsste hingegen besonders wieder lernen, recht lange von denselben absehen zu können<sup>1)</sup>.

Somit habe ich also insbesondere der Martius'schen Messungsmethode nicht »beizukommen« versucht, sondern mir dieselbe nur vom eigenen Standpunkte aus verständlich gemacht. Ja ich versuchte sogar einen Weg anzugeben, auf welchem der Werth nach der Martius'schen Methode wirklich in exacterer Weise als das erwiesen werden könnte<sup>2)</sup>, als was er zunächst nur nach ungefährender Schätzung festgestellt werden kann, nämlich als annähernd »normaler« Helligkeitseindruck. Was ich gegen das absolute Helligkeitsgedächtniss als einzige Basis dieser Schätzung anführte, sollte nicht etwa dieses Gedächtniss in jeder Hinsicht discreditiren. Im Gegentheil erwarte ich von einer ausdrücklichen Einübung desselben gerade über die absolute Veränderung der Empfindung noch manchen Aufschluss. Als irgendwie exactere Bestimmung aber kann es ohne solche Einübung zunächst nicht betrachtet werden. Damit ist nicht die Möglichkeit einer wesentlichen Täuschung über zeitlich unmittelbar nacheinander gesehene Helligkeiten behauptet, also keineswegs eine Täuschung über das Verhältniss zwischen dem complicirten Hellig-

<sup>1)</sup> Für die psychologische Erscheinung der positiven Nachbilder, welche Martius in seiner an zweiter Stelle genannten neuesten Arbeit eben so wenig für integrirende Bestandtheile der Lichtempfindung in allen für sie in Betracht kommenden Zeitstrecken ansieht, lassen sich ganz analoge Gesichtspunkte im Sinne der gewöhnlichen Auffassung geltend machen. Auch compensiren sich bekanntlich unter Umständen die qualitativ entgegengesetzten positiven und negativen Wirkungen besonders bei Helligkeitsnachbildern am Anfang teilweise, wie schon öfters hervorgehoben wurde. Die physiologische Verselbständigung des Processes im Sinne der Beimischungshypothese begegnet hier natürlich gar keinen Schwierigkeiten. Bei der Verschiedenheit der beiderseitigen Bedingungen für einen besonders ausgeprägten Verlauf versucht es auch Martius nicht, die positiven Nachbilder ebenso wie die negativen Erscheinungen, welche letztere von den complementären positiven Stadien an der Hand des Fechner-Helmholtz'schen Satzes als eines Kriteriums für die negativen scharf zu scheiden sind, als eine besondere Seite der durch ein secundäres Restsubstrat fundirten Vorgänge zu betrachten.

<sup>2)</sup> Philos. Studien XVI, S. 480 ff.

keitseindrücke sofort nach der raschen Blickbewegung auf die neue Reactionsfläche hin einerseits und dem klaren Bilde dieser Fläche im nächsten Momente oder der zuerst fixirten Scheibe andererseits. Das Vergleichsurtheil, dass die im gemischten Eindrücke gesehene Helligkeit mit dem Aussehen dieser Fläche ohne Entstehung eines Nachbildes überhaupt, also mit der »normalen« Helligkeit übereinstimme, beruht aber eben auf einer ganz anderen Leistung des absoluten Helligkeitsgedächtnisses, insofern hier die verglichenen Empfindungen keineswegs in dem hier allein zulässigen strengen Sinne zeitlich unmittelbar benachbart sind. Es müsste die vor aller localen Adaptation gesehene Helligkeit der Fläche, auf welche später das Nachbild projectirt werden soll, mit dem im ersten Momente dieser Projection vorhandenen Helligkeitseindruck verglichen werden. Auch Martius gibt aber ja zu, dass dem Verlauf der Veränderung der Adaptation gewisse Täuschungen des absoluten Helligkeitsgedächtnisses parallel gehen. Diese brauchen gar nicht sehr groß zu sein, um den Resultaten der Martius'schen Methode zu einer irrigen Deutung zu verhelfen, sobald man sich ausschließlich auf diese Erinnerung verlässt, zumal bei verschiedener Größe der eingetretenen Verschiebungen. Der Nachweis, dass jener Helligkeitseindruck im ersten Momente nach der Bewegung wirklich dem »normalen« entspreche (was wegen der hiermit bewiesenen Compensation der subjectiven Differenzen bei der naturgemäßen, nicht starr fixirenden Betrachtung auch für die gewöhnliche Auffassung von Interesse wäre), könnte also vor einer eventuell möglichen speciellen Ausbildung des absoluten Helligkeitsgedächtnisses nur indirect geführt werden. Er würde außer den Werthen nach der Martius'schen Methode nur noch die an sich einwandfreien Bestimmungen nach der mit Hülfe des Marbe'schen Apparates verbesserten alten Methode und den ebenso sicher ableitbaren Fechner-Helmholtz'schen Satz für Helligkeitsnachbilder einzuführen brauchen. Da indessen solche indirecten Bestimmungen nach Art des von mir vorgeschlagenen Verfahrens noch nicht versucht worden waren, so konnte ferner von mir allerdings auch noch nicht behauptet werden, dass die Martius'schen Werthe »durchaus denen nach der alten Methode entsprechen.« Eine Uebereinstimmung der nach beiden Methoden abgeleiteten rohen Werthe aber könnte ja ohnehin auch von Martius nicht erwartet werden, da

in der Martius'schen Methode eben nur die absolute Veränderung eines einzigen Sehfeldbezirkes gemessen würde, nach der alten Methode hingegen stets die Summe, bezw. Differenz der benachbarten Bezirke.

Schon aus jener Ueberlegung, durch welche ich den Werth nach der Martius'schen Methode zu demjenigen nach der gewöhnlichen Messung in Beziehung zu setzen versuchte, kann man aber ersehen, dass ich niemals bestritten habe, dass die Modification der Helligkeitsempfindung gegenüber der normalen durch das negative Nachbild ebensowohl absolute Aufhellungen wie Verdunkelungen sein können. Da in dem seinerzeit von mir gewählten Beispiele eine hellere Scheibe auf dunklerem Grunde fixirt worden sein sollte, so bildete eine absolute Verdunkelung die Veränderung der Scheibe. In der Umgebung hingegen gab ich Herrn Professor Martius ausdrücklich eine absolute Aufhellung als Abweichung von der Normallage zu, und zwar nahm ich diese entsprechend geringer an, da für die locale Adaptation das Ausdehnungsverhältniss jedenfalls maßgebend sein wird. Für die Fixation der Scheibe in entsprechend hellerer Umgebung hätte das umgekehrte Verhältniss Platz greifen können, falls die Helligkeit der Scheibe der mittleren Helligkeitsadaptation vor Beginn des Versuches entsprochen hätte. Diese ursprüngliche Gesamtadaptation würde ja neben der Nachbarschaft unstreitig immer vor allen zur Bestimmung der absoluten Veränderungsrichtungen im Verhältniss zu der Helligkeit bei Beginn des Versuches maßgebend sein. Es ist also bei allen meinen Ausführungen zum Fechner-Helmholtz'schen Satze niemals eine Ermüdungstheorie in dem Sinne vorausgesetzt gewesen, als ob das negative Helligkeitsnachbild immer nur auf verschieden großen Verdunkelungen der benachbarten Stellen im Verhältniss zu den Helligkeiten bei Beginn des Versuches beruhe. Auf einen Schluss von den nach der alten Methode allein erreichbaren Differenzen der benachbarten absoluten Veränderungen auf diese letzteren selbst wurde ausdrücklich verzichtet. Es wurde nur der Nachweis geführt, dass wegen der Proportionalität der eben bezeichneten Differenzen sowohl die Verdunkelung als auch die Aufhellung stets zur Intensität des reagirenden Reizes direct proportional sei und dass das negative Nachbild seinem ganzen Wesen nach vom reagirenden Reize abhängig gedacht werden müsse, ohne

einen solchen also überhaupt keinen actualen Sinn besitze<sup>1)</sup>. Der Begriff der »Ermüdung« ist also bisher immer nur im ganz allgemeinen Sinne einer abnormen Veränderung des Organs auf Grund einer einseitigen Leistung angewendet worden, ohne dass hiermit über die quantitativen Bestimmungen irgend etwas ausgemacht wäre. So ist er ja auch gerade von Hering, Hess u. a. fortwährend der Kürze des Ausdruckes halber unbedenklich für den ganzen Vorgang gebraucht worden. Unter der von mir im Gegensatz zu Martius vertretenen alten Auffassung war also keineswegs eine Ermüdungstheorie in dem von Martius angegriffenen Sinne gemeint, sondern lediglich die Anschauung, dass von jeder solchen Modification, sowohl von der Verdunkelung als auch von der Aufhellung, die Empfindung als solche während der ganzen Dauer der Nachwirkung thatsächlich verändert werde, also nicht nur, wie Martius annimmt, unter besonders günstigen Wettstreitbedingungen, und scheint mir abgesehen von diesem letzteren Punkte die Differenz zwischen Martius und mir viel geringer zu sein, als es aus seiner Erwiderung hervorgehen könnte. Ueber den genauen Gang der absoluten Veränderungen jeder einzelnen Helligkeit in ihrer Abhängigkeit von der ursprünglichen Gesamttadaptation und den im Sehfelde vorhandenen Differenzen mit ihren Ausdehnungsverhältnissen etc. wird aber freilich erst nach jener oben besprochenen Ausbildung des absoluten Helligkeitsgedächtnisses und indirecter Methoden entschieden werden können, zu denen auch die Martius'sche nach Herstellung jener oben genannten Beziehung zu dem Normalwerthe gehören kann. Noch deutlicher wurde aber inzwischen meine Stellung zu der von Martius angegriffenen Ermüdungstheorie bei der Behandlung der farbigen Nachbilder, und wird nun insbesondere die Darlegung in den beiden letzten Capiteln über viele Punkte, die auch im zweiten Theile nur erst angedeutet worden waren, die wünschenswerthe Vervollständigung gebracht haben. Die Schwierigkeiten, welche einer endgültigen theoretischen Entscheidung auch nach allen quantitativ verfeinerten Beobachtungen immer noch begegnen, sind auf diesem Gebiete freilich groß genug, um den von

<sup>1)</sup> Vergl. Wundt, Grundzüge der physiologischen Psychologie. 5. Aufl. 1902. II, S. 207.

Martius unternommenen Versuch, das ganze Gebiet einmal von einem ganz neuen theoretischen Gesichtspunkte aus zu betrachten, rein als solchen hinreichend motivirt erscheinen zu lassen.

## 7. Zusammenfassung der Hauptergebnisse.

Da meine quantitativen Bestimmungen negativer Nachbilder mit dieser dritten Veröffentlichung ihren vorläufigen Abschluss finden, soll noch eine kurze Recapitulation der wesentlichsten Resultate hinzugefügt werden:

### A. Hinsichtlich des Beobachtungsmaterials.

1. Nach längerer Fixation einer Helligkeits- oder Farbendifferenz enthält die Wahrnehmung einer objectiv gleichmäßig gefärbten Fläche subjective Differenzen, welche durch Zurückbehaltung des nämlichen Bruchtheiles der ermüdenden Lichter an allen von ihnen ermüdeten Stellen des Sehfeldes subjectiv ausgeglichen werden können. Dieser Bruchtheil kann als vergleichbarer Werth eines bestimmten Nachbildes unter den verschiedenen Reactionsbedingungen betrachtet werden.

Zusatz. Streng genommen gilt dieser Satz nur für reine Helligkeits- oder Farbennachbilder. Bei gleichzeitigen Helligkeits- und Farbendifferenzen im Ermüdungsfeld ist der Bruchtheil zur Ausgleichung des Helligkeitsnachbildes im ersten Momente ca.  $\frac{2}{3}$  mal kleiner als für das Farbennachbild.

2. Der Werth aller negativen Nachbilder ist für alle Qualitäten des reagirenden Reizes zu dessen Intensität direct proportional (Fechner-Helmholtz'scher Satz).

3. Das Verhältniss der Intensitäten, in denen die verschiedenen Farbtöne auf ein reines Helligkeitsnachbild mit gleichen absoluten Werthen reagiren, weicht von der Gleichheit ihrer scheinbaren Helligkeit in der Weise ab, dass die äquivalente reagirende Intensität in Gelb heller aussieht als in Blau, während reines Roth und Grün einen mittleren Werth besitzen. Der Werth der Mischfarben lässt sich ungefähr aus denjenigen der Componenten berechnen. Außerdem scheinen gleich hell aussehende Farben bei größerer Sättigung höher zu reagiren.

4. Die farbigen Nachbilder zeigen bei allen Ermüdungsfarben auf sämtlichen Reactionsfarben die ungefähr ihrem Aequivalenzwerthe für Helligkeitsnachbilder entsprechenden Werthe.

5. Die Ermüdungsfarbe selbst reagirt relativ am stärksten, die complementäre Region am geringsten. Die Werthe für die benachbarten Farben bilden einen continuirlichen Uebergang. Die kalte und die warme Region des Spektrums zeigen in sich eine engere Verwandtschaft.

6. Alle diese Verhältnisse gelten fast ganz gleichmäßig für Hell- und Dunkeladaptation. Bei letzterer seheinen die äquivalenten Werthe für beide Regionen des Spectrums schärfer auseinander zu treten.

7. Das Nachbild zeigt sich als eine nach Abschluss der Ermüdungseinflüsse continuirlich abnehmende Modification der Lichtempfindungen während der ganzen Dauer des Processes.

8. Das Nachbild verschwindet auf den verschiedenen reagirenden Reizen um so schneller, einen je höheren absoluten Werth es bei der neuen Reizung besitzt.

#### **B. Hinsichtlich der theoretischen Verwerthung.**

9. Die Helligkeitsdifferenz der äquivalenten reagirenden Intensitäten erklärt sich am einfachsten aus der Einwirkung des Farbentones auf den psychologischen Gesamteindruck der Helligkeit abgesehen vom selbständigen farblosen Process. Sie ist nicht mit dem Begriffe der sog. specifischen Helligkeit der Farbe nach Hillebrand und Hering zu verwechseln.

10. Alle Nachbilderscheinungen können vorläufig noch in doppelter Weise erklärt werden, entweder als bloße Erregbarkeitsänderung der normalen Substrate oder als Beimischung einer zur reagirenden Intensität proportionalen Miterregung eines selbständigen Restsubstrates.

11. Die Annahme einer bloßen Erregbarkeitsveränderung erfordert für die farbigen Nachbilder unter Berücksichtigung des v. Kries'schen Satzes über die Unabhängigkeit der Farbgleichungen vom negativen Nachbilde die Hülfs-hypothese einer (in neutraler Stimmung antagonistisch bis auf eine einzige Erregungsweise compensirten) Ausbreitung jeder Reizwirkung über das gesammte Farben-substrat im Rahmen einer Vierfarbentheorie, die hiezu am besten als

einfachster Specialfall der Wundt'schen Periodicitätstheorie gedacht wird. Sie ist zugleich die einfachste Erklärung aller Helligkeitsnachbilder, auch zusammen mit einer etwaigen anderen Erklärung der farbigen Nachbilder.

12. Die Beimischungshypothese verlangt die Annahme der zur Reizintensität proportionalen Erregung eines secundären Substrates in der ihm specifischen Qualität der Nachbildfarbe durch alle beliebigen Reize. Wollte man sie auch für die Helligkeitsnachbilder verwenden, so erforderte sie wegen der zur reagirenden Helligkeit proportionalen Verdunkelung besondere Hilfsannahmen. Die Beimischungshypothese kann vorläufig am leichtesten mit irgend einer allgemeinen Farbentheorie in Einklang gebracht werden.

---