Ueber die Unvereinbarkeit gewisser Ermüdungserscheinungen des Sehorgans mit der Dreifasertheorie.

Von

Dr. Carl Hess,

Privatdocenten u. erstem Assistenten an der Universitäts-Augenklinik
in Leipzig.

Mit 4 Figuren im Text.

In der zweiten Auflage seines Handbuches der physiologischen Optik bespricht v. Helmholtz (S. 517) eine von mir im Hering'schen Institute ausgeführte Arbeit „Ueber die Tonänderungen der Spectralfarben durch Ermüdung der Netzhaut mit homogenem Lichte“. (v. Graefe's Archiv für Ophthalmologie XXXVI. 1. S. 1.) Die v. Helmholtz'sche Kritik muss bei dem Leser, welchem mein Aufsatz nicht gegenwärtig ist, die Ansicht erwecken, dass die in dem letzteren gegebene Widerlegung der Young'schen Theorie eine unzutreffende, bezw. unvollständige sei, da sie nur einzelne Voraussetzungen der letzteren berücksichtige. Denn wenn v. Helmholtz schreibt „Hess's Einwendungen wären richtig einer Farbentheorie gegenüber, die die Grundfarben in einer oder einigen der Spectralfarben zu finden glaubt und ausserdem das Eigenlicht der Netzhaut als verschwindend klein betrachtet“, so könnte es scheinen, dass bei meiner Widerlegung nur diese ältere Fassung der Theorie

berücksichtigt worden wäre, welche v. Helmholtz selbst inzwischen verlassen hat, die aber neuerdings von seinem Schüler A. König gerade mit Bezugnahme auf die Ermüdungserscheinungen wieder vertheidigt wird (s. u.).

Nun ist aber in meiner Abhandlung die Unvereinbarkeit der Thatsachen mit der Dreifasertheorie sowohl ganz allgemein dargethan (S. 28), wie auch im Speciellen für alle wesentlichen bis dahin bekannt gewordenen Modificationen der Theorie, nämlich einmal (S. 20) für die von v. Helmholtz in die 2. Auflage seines Lehrbuches aufgenommene König'sche Farbentafel, dann auch (S. 23) für die Fick'sche Farbencurve, nach welcher ausser dem Violett keinem der homogenen Lichter „absolute“ Sättigung zukommen soll.

Was den Einfluss des „Eigenlichtes“ der Netzhaut angeht, so ist in meiner Abhandlung auf Seite 28 ausführlich gezeigt worden, dass die Thatsachen nicht nur dann mit der Theorie in Widerspruch stehen, wenn man das Eigenlicht als „verschwindend klein“ betrachtet, wie dies v. Helmholtz bisher angenommen hatte, sondern auch dann, wenn man dem Eigenlichte Werthe zuschreiben wollte, welche man nach den bis dahin bei den Anhängern der Dreifasertheorie geltenden Ansichten als verhältnissmässig grosse hätte bezeichnen müssen. —

In der sechsten und siebenten Lieferung der zweiten Auflage seines Handbuches der physiologischen Optik hat v. Helmholtz Anschauungen entwickelt, welche nach zwei Richtungen hin nicht unwesentlich von den früher von ihm vertretenen sich unterscheiden.

Nach dem neuen Farbendreieck, welches v. Helmholtz construirt hat¹⁾, würde die ganze Curve der homogenen Lichter dem Mittelpunkte des Dreiecks viel näher

¹⁾ Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane Bd. III, S. 12 ff. und Handbuch der physiol. Optik, 2. Aufl., S. 457 ff.

liegen als bei allen bisher construirten Farbendreiecken; es würde also sämmtlichen Spectralfarben eine viel geringere Sättigung zukommen als die Anhänger der Dreifasertheorie bisher allgemein angenommen hatten. Die gesättigteste Farbe soll das Grün sein, welches in allen früheren Curven als eine der wenigst gesättigten Farben des Spectrums angenommen worden war.

Als „provisorisch gefundene“ Grundfarben werden angenommen: Roth vom Tone des Carminroth, Grün (Gelbgrün zwischen $\lambda = 570 \mu\mu^1$) und $560 \mu\mu$) und Blau (Ultramarinblau). In der 7. Lieferung seines Handbuchs [S. 517] nimmt aber v. Helmholtz bei der Erklärung der Ermüdungserscheinungen wieder Violett als dritte Grundfarbe an.

Der zweite Punct, in welchem die neueren Anschauungen von v. Helmholtz sich von den früheren unterscheiden, betrifft die Stärke des „Eigenlichtes der Netzhaut“. v. Helmholtz schreibt demselben jetzt beträchtlich höhere Werthe zu, als früher.

S. 519 bespricht v. Helmholtz die Thatsache, dass ganz reines „Roth“²⁾ an Sättigung verliert, wenn das Auge durch längeres Fixiren dafür ermüdet wird, und fährt dann fort: „Man wird die Erklärung (sc. für die Sättigungsabnahme) theils von dem Lichtnebel des dunkeln Gesichtsfeldes, theils von der gemischten Natur der Eindrücke sämmtlicher Spectralfarben herleiten müssen“³⁾.

¹⁾ Anm. In beiden hier citirten Schriften von v. Helmholtz ist anscheinend in Folge eines Druckfehlers statt $570 \mu\mu$ angegeben $540 \mu\mu$.

²⁾ Zu diesem Versuche wurde mit Kupferoxydul roth gefärbtes Glas benutzt, „welches nur rothe Strahlen durchlässt“.

³⁾ In der ersten Auflage stand hier (S. 368): „Man könnte erstens an den Lichtnebel des dunkeln Gesichtsfeldes denken . . . Indessen scheint mir diese Erklärung nicht zu genügen, da die scheinbare Lichtintensität des Lichtnebels vor geschlossenen Augen doch nur sehr gering erscheint.“

Bei Erörterung der entsprechenden Versuche mit spectralen Lichtern sagt v. Helmholtz (S. 520): „Auch in diesem Falle könnte man glauben, dass der weissliche Schein, welcher den Grund überzieht, der innere Lichtnebel sei, dessen störende Theile im Nachbilde entfernt seien . . . Auch in diesem Falle halte ich diese Erklärung für ungenügend, weil die Erscheinung auf sehr hellen Spectralfarben zu sehen ist, gegen welche die scheinbare Helligkeit des Lichtnebels doch wohl zu klein erscheint“.

In der ersten Auflage hiess es hier „verschwindend klein“.

v. Helmholtz suchte auch die Stärke des Eigenlichtes zu berechnen und fand (2. Auflage, S. 412), dass die mittlere Stärke desselben der Helligkeit entsprechen würde, mit welcher einem durch ein Diaphragma von 1 qmm blickenden Auge eine weisse (mit Magnesiumoxyd überzogene) Fläche erscheint, die in einem Abstände von 1 m von etwa 75 englischen Normalkerzen senkrecht bestrahlt wird. Frühere Versuche von Volkmann, welche v. Helmholtz in der ersten Auflage citirte, hatten ergeben, dass die Stärke des Eigenlichtes gleich sei der Helligkeit einer schwarzen Sammetfläche, beleuchtet durch eine Stearinkerze aus 9 Fuss Entfernung. Nach der neuen Annahme von v. Helmholtz würde das Eigenlicht also ganz ausserordentlich viel grösser sein als nach der Volkmann'schen Rechnung.

Es ist nun meine Aufgabe, zu zeigen, dass die Ermüdungserscheinungen, bei deren Erörterung in meiner ersten Abhandlung alle wesentlichen bis dahin bekannt gewordenen Modificationen der Dreifasertheorie berücksichtigt worden waren, auch mit dem neuen v. Helmholtz'schen Farbendreieck nicht erklärt werden können, gleichviel wie grosse Werthe man dabei dem Eigenlichte der Netzhaut zuschreiben mag. Zu einem solchen Nachweise würden auch die in meiner ersten Abhandlung mitgetheilten messenden Versuche genügen. Es erschien aber zweckmässig, mit besonderer Bezugnahme auf das neue v. Helmholtz'sche

Farbendreieck und auf die neuen Grundfarben einige neue Versuche anzustellen, welche in noch anschaulicherer Weise die Unvereinbarkeit der Thatsachen mit der Theorie darzuthun gestatten, als dies mit meinen früheren Beobachtungen möglich wäre.

Durch die Güte meines verehrten Lehrers, des Herrn Professor Hering, konnte ich die im Folgenden mitgetheilten neuen Versuche in seinem Institute anstellen.

Die Versuchsanordnung war im Wesentlichen die gleiche wie die in meiner ersten Abhandlung bei der zweiten Versuchsreihe (S. 7) beschriebene.

Dem in das Fernrohr eines hierzu geeigneten Spectralapparates blickenden Beobachter wurde ein kreisförmiges Gesichtsfeld sichtbar gemacht, dessen scheinbarer Durchmesser, auf eine Entfernung von 25 cm projicirt, ca. 2,5 cm betrug. Ein schmaler, von oben nach unten ziehender, dunkel erscheinender Steg trennte das farbige Gesichtsfeld in zwei seitliche, annähernd gleichgrosse Hälften. Der Beobachter fixirte während des Versuches einen kleinen, in der Mitte des Steges sichtbar gemachten leuchtenden Punkt.

Die linke Gesichtsfeldhälfte konnte abwechselnd mit dem ermüdenden oder dem reagirenden Lichte, die rechte mit dem Vergleichslichte beleuchtet werden, dessen Wellenlänge leicht in messbarer Weise sich variiren liess.

Die Versuche wurden in der folgenden Weise angestellt: Der Beobachter fixirte den Mittelpunkt des Steges, während zunächst auf der linken Gesichtsfeldhälfte das ermüdende Licht sichtbar war. Nach entsprechend langer Ermüdung (bei den neuen Versuchen meist 50—75 Secunden) wurde an der Stelle des ermüdenden das reagirende Licht und gleichzeitig auf der rechten, bis dahin dunkel gebliebenen Hälfte das Vergleichslicht sichtbar gemacht und dieses durch Aenderung der Stellung des Collimatorrohres unter jedesmaliger Wiederholung des Versuches so lange variirt, bis es in angenähert gleichem Tone gesehen wurde, wie das

reagirende Licht nach der Ermüdung. Die Wellenlängen wurden jedes Mal auf Grund der Fraunhofer'schen Linien durch graphische Interpolation bestimmt.

Es handelt sich hierbei keineswegs um schwankende Schätzungen, wie v. Helmholtz meint, sondern um leicht controlirbare Beobachtungen, bei welchen es lediglich darauf ankommt, zwei nahe nebeneinander gesehene spectrale Lichter rücksichtlich ihres Farbentones zu vergleichen, was mit ziemlich grosser Genauigkeit möglich ist. Bei gleichen Versuchsbedingungen lieferten die Beobachtungen im Wesentlichen durchaus übereinstimmende Ergebnisse. Jedenfalls sind sie hinreichend genau für den Zweck, zu welchem sie angestellt wurden. Da die Methoden genau angegeben sind, ist es jederzeit leicht, sich durch Nachprüfung von der Richtigkeit meiner Angaben zu überzeugen.

Unsere neuerdings angestellten Versuche sind die folgenden:

1) Es wurde für ein der neuen v. Helmholtz'schen Grundfarbe Blau entsprechendes Licht von ca. $482\ \mu\mu$ Wellenlänge ermüdet; als reagirendes diente ein Licht von $517,5\ \mu\mu$ Wellenlänge. Behufs der später zu besprechenden Berechnungen war es nöthig, das ermüdende und das reagirende Licht unter Beibehaltung ihrer beim Versuche benutzten Intensitäten zu mischen und das zu diesem Gemische complementäre Licht zu bestimmen. Um weisses Licht zu erhalten, musste bei unverändertem Verhältniss der Spaltbreiten des ermüdenden und des reagirenden Lichtes diesen beiden noch ein Licht von $650\ \mu\mu$ zugemischt werden.

Nach Ermüdung während 50 Secunden erschien ein Vergleichslicht von $555\ \mu\mu$ Wellenlänge deutlich weniger gelb als das reagirende. Nach Ermüdung während 75 Secunden erschien ein Vergleichslicht von $560\ \mu\mu$ Wellenlänge gleich im Tone mit dem reagirenden Lichte.

Bei einem dritten Versuche wurde bei unveränderter Lichtstärke des reagirenden Lichtes die Lichtstärke des

Vergleichslichtes gegen früher etwas herabgesetzt, da dann die Vergleichung beider Lichter auf ihren Farbenton mit grösserer Genauigkeit möglich war. Nach Ermüdung während 75 Secunden erschien jetzt ein Vergleichslicht von $565 \mu\mu$ Wellenlänge minder gelb als das reagirende. Ein Vergleichslicht von $570 \mu\mu$ dagegen erschien deutlich gelber. Das ermüdende Licht war am Schlusse der Ermüdung stets noch deutlich blau erschienen.

2) Es wurde für ein zu der Grundfarbe Blau complementäres gelbes Licht von ca. $585 \mu\mu$ Wellenlänge ermüdet. Als reagirendes diente ein Licht von $540 \mu\mu$ Wellenlänge. Um weisses Licht zu erhalten, musste diesen beiden noch ein homogenes Licht von $470 \mu\mu$ Wellenlänge zugemischt werden.

Nach Ermüdung während 70 Secunden erschien ein Vergleichslicht von $495 \mu\mu$ Wellenlänge deutlich minder blau als das reagirende. Nach gleich langer Ermüdung erschien ein Vergleichslicht von $490 \mu\mu$ in dem gleichen Tone mit dem reagirenden.

Nach Ermüdung während 180 Secunden erschien ein Vergleichslicht von $490 \mu\mu$ deutlich minder blau als das reagirende (von $540 \mu\mu$). Bei diesem Versuche war das ermüdende Licht von $585 \mu\mu$ trotz der ungewöhnlich langen Ermüdungsdauer am Schlusse der Ermüdung noch deutlich gelb erschienen (insbesondere bei binocularer Vergleichung mit dem Tageslichte).

3) Es wurde für ein der neuen v. Helmholtz'schen Grundfarbe Grün entsprechendes Licht von $565 \mu\mu$ Wellenlänge ermüdet. Als reagirendes diente ein Licht von $615 \mu\mu$ Wellenlänge.

Um Weiss zu erhalten musste man diesen beiden noch ein Licht von $475 \mu\mu$ Wellenlänge zumischen.

Nach Ermüdung während 70 Secunden erschien das reagirende Licht von $615 \mu\mu$ Wellenlänge in einem bläulichen Purpurtone. Ein Vergleichslicht von $650 \mu\mu$ Wellen-

länge erschien neben demselben deutlich gelblich. Durch Zumischung blauen Lichtes zu dem Vergleichslichte von $650 \mu\mu$ konnte man ein bläulich-rothes Licht erhalten, welches in dem gleichen Tone gesehen wurde wie das reagirende nach der Ermüdung.

Es wurde nun die Complementäre zu diesem Mischlichte gesucht und die Wellenlänge derselben $= 552 \mu\mu$ gefunden. Damit war der Radius gegeben, auf welchem im v. Helmholtz'schen Farbendreieck das in diesem Falle binär zusammengesetzte Vergleichslicht liegt, welches in dem gleichen Tone gesehen wurde, wie das reagirende Licht nach der Ermüdung.

Es ist zu zeigen, dass diese Thatsachen mit der neuen v. Helmholtz'schen Modification der Dreifasertheorie unvereinbar sind.

In meiner ersten Abhandlung waren als Ausgangspunkt für theoretische Erörterungen solche Fälle gewählt worden, in welchen das ermüdende Licht einer Grundfarbe entsprach, und als Grenzfall der Ermüdung war die völlige Erschöpfung einer Faserart durch das ermüdende Licht gesetzt worden. Dieser Grenzfall war gewählt worden mit Rücksicht auf die bis dahin von v. Helmholtz und von den anderen Anhängern der Young'schen Theorie allgemein angenommene Fassung der Theorie, nach welcher durch das einer Grundfarbe entsprechende homogene Licht eine Faserart entweder ausschliesslich oder doch wesentlich stärker erregt werden sollte, als die beiden anderen Faserarten, und mit Rücksicht darauf, dass dem Eigenlichte verhältnissmässig kleine Werthe zukommen sollten.

Neuerdings nimmt nun v. Helmholtz an, dass „alle einfachen Farben die sämmtlichen lichtempfindlichen Nerven-elemente des trichromatischen Auges gleichzeitig und mit nur mässigen Intensitätsunterschieden erregen“. Danach würde eine bis zu völliger Erschöpfung einer Faserart ge-

triebene Ermüdung gleichzeitig die nahezu vollständige Erschöpfung auch der beiden anderen Faserarten zur Folge haben müssen; eine so hochgradige Ermüdung wurde aber bei unseren Versuchen niemals auch nur im Entferntesten erreicht.

Es ist aber auch gerade der neuen Fassung der Dreifasertheorie gegenüber nicht nöthig, als Grenzfall eine soweit gehende Ermüdung zu wählen. Lange bevor die Ermüdung zur völligen Erschöpfung einer Faserart geführt hat, müsste das ermüdende Licht farblos erscheinen, und es genügt durchaus, diesen Fall als Grenzfall zu setzen; thatsächlich wurde aber die Ermüdung niemals auch nur so weit getrieben; denn das ermüdende Licht erschien am Schlusse der Ermüdung immer noch deutlich farbig, wenn auch minder gesättigt.

Wird das Sehorgan durch ein homogenes z. B. blaues Licht vom Tone der Grundfarbe Blau getroffen, so werden dadurch alle drei Faserarten erregt, die Blaufasern aber mehr als die unter sich gleich stark erregten Roth- und Grünfasern. Länger dauernde Ermüdung mit dem homogenen Lichte hat eine verhältnissmässig stärkere Herabsetzung der Erregbarkeit der Blaufasern gegenüber jener der Roth- und der Grünfasern zur Folge. Der Unterschied zwischen den Erregungsstärken der drei Faserarten wird also bei zunehmender Ermüdung durch das homogene Licht immer kleiner und bei genügend langer Ermüdung $= 0$ werden, mit andern Worten: das ermüdende Licht wird bei zunehmender Ermüdung immer weniger gesättigt und schliesslich farblos erscheinen, was auch thatsächlich bei sehr langer Ermüdung der Fall ist.

Erörtern wir zunächst den Fall, dass das Eigenlicht $= 0$ sei. Wir setzen voraus, dass zu Beginn der Ermüdung die Erregbarkeit aller drei Faserarten normal oder wie wir sagen können $= 1$ ist.

Bezeichnen wir die Reizwerthe, welche das ermüdende blaue Licht für die Blaufasern bezw. die Roth- und Grün-

fasern hat, mit b bezw. r u. g , und die (in Folge der Ermüdung herabgesetzte) Erregbarkeit jeder Faserart entsprechend mit β , ϱ und γ , so wird das blaue Licht farblos erscheinen müssen, sobald $b\beta = r\varrho = g\gamma$ ist.

Da dieses blaue Licht für die Roth- und Grünfasern gleich grossen Reizwerth hat, beide gleich stark erregt und also auch gleich stark ermüdet, so wird $\varrho = \gamma$ sein.

Setzen wir nun, da es hier nur auf das Verhältniss der Erregbarkeiten ankommt, ϱ (bezw. γ) = 1, so wird also das ermüdende Blau weiss erscheinen, sobald $\beta = \frac{r}{b}$ bezw.

$$= \frac{g}{b} \text{ ist.}$$

Diess gilt indess nur für den Fall, dass das Eigenlicht = 0 ist. Wir können aber auch bei Annahme beliebig grosser Werthe für das Eigenlicht bestimmen, wann das ermüdende blaue Licht vom Tone der Grundfarbe in Folge der Ermüdung farblos erscheinen muss.

Das Eigenlicht, welches wir hier als farblos nehmen, ist nach v. Helmholtz auf innere Reize zurückzuführen, deren Reizwerthe für die drei Faserarten sich zu den Reizwerthen eines gleichzeitig wirkenden äusseren Lichtes hinzu addiren.

Wir wollen nun zunächst den Fall setzen, dass die Summe der drei Reizwerthe der inneren Reize gleich sei der Summe der drei Reizwerthe r , g , b des äusseren Lichtes, welches wir als das ermüdende bezeichnen. Diesen Falls wäre der innere Reizwerth für jede Faserart $= \frac{r + g + b}{3}$.

Hiermit haben wir dem Eigenlichte schon einen relativ sehr hohen Werth beigelegt.

Nehmen nun in Folge der Ermüdung die drei Erregbarkeiten (ϱ , γ , β) mehr und mehr ab, so wird das ermüdende blaue Licht vom Tone der Grundfarbe farblos erscheinen müssen, sobald

$$\left(b + \frac{r + g + b}{3}\right)\beta = \left(r + \frac{r + g + b}{3}\right)\varrho = \left(g + \frac{r + g + b}{3}\right)\gamma$$

und also, da wir aus dem oben angeführten Grunde wieder ϱ und $\gamma = 1$ setzen können, sobald

$$\beta = \frac{3r + r + g + b}{3b + r + g + b} = \frac{3g + r + g + b}{3b + r + g + b} \text{ ist.}$$

Betrüge die Summe der drei Reizwerthe der inneren Reize das n fache der Summe der drei Reizwerthe des ermüdenden blauen Lichtes, so würde das letztere farblos erscheinen, sobald

$$\beta = \frac{3r + n(r + g + b)}{3b + n(r + g + b)} = \frac{3g + n(r + g + b)}{3b + n(r + g + b)} \dots (1)$$

Somit lässt sich β für den Fall der Ermüdung mit dem homogenen Lichte vom Tone der Grundfarbe Blau berechnen; und da wir ϱ u. $\gamma = 1$ setzen konnten, so ist uns das Verhältniss der drei Erregbarkeiten für jenen Grad der Ermüdung bekannt, bei welchem das ermüdende Licht farblos erscheinen würde. In analoger Weise lässt sich dieses Verhältniss der drei Erregbarkeiten für den Fall finden, wo wir Licht vom Tone der Grundfarbe Roth oder Grün als ermüdendes Licht benutzen oder endlich für den Fall, wo wir ein Licht, welches zwei Faserarten gleich stark erregt, als ermüdendes wählen. Ist uns aber für den hier angenommenen Grad der Ermüdung, bei welchem das ermüdende Licht farblos erscheinen müsste, das nunmehr bestehende Verhältniss der drei Erregbarkeiten $\varrho:\gamma:\beta$ bekannt, so können wir auf Grund des Farbdreiecks für jedes beliebige reagirende homogene Licht bestimmen, welcher Ort auf diesem Dreieck ihm nunmehr zukommt; mit anderen Worten, wir können dasjenige homogene Licht finden, welches einer unermüdeten Netzhautstelle mit normaler Erregbarkeit der drei Faserarten in demselben Farbentone erscheinen müsste, in welchem das benutzte reagirende

Licht der ermüdeten Netzhautstelle mit ihren veränderten Erregbarkeiten erscheint.

In meiner ersten Abhandlung ist (S. 14 ff.) gezeigt, dass man im Falle der Ermüdung mit einer Grundfarbe die Richtung, in welcher der Farbenton des reagirenden Lichtes sich verschiebt, im Farbendreieck findet, indem man den Ort des reagirenden Lichtes mit derjenigen Ecke des Dreiecks verbindet, welche der Grundfarbe entspricht, für welche ermüdet worden ist, und diese Verbindungslinie bis zur gegenüberliegenden Seite des Dreiecks verlängert. Auf dieser Verlängerung müssen, wie dort ausführlicher gezeigt ist, alle Orte liegen, welche dem reagirenden Lichte bei allen denkbaren Ermüdungsgraden für die betreffende Grundfarbe zukommen können, da die beiden, der Grundfarbe nicht entsprechenden Faserarten durch dieselbe gleich stark erregt und ermüdet werden.

Aus Formel (1) können wir für jeden angenommenen Werth des Eigenlichtes berechnen, wie weit sich das reagirende Licht höchstens auf dieser Strecke verschieben kann für den Grenzfall, dass das ermüdende Licht am Schlusse der Ermüdung weiss erschienen wäre. Das Farbendreieck giebt uns für jedes homogene Licht das Verhältniss der drei Reizwerthe $r:g:b$ an. Somit kennen wir auch das Verhältniss der drei Erregungswerthe des reagirenden Lichtes für das chromatisch neutral gestimmte Auge, in welchem wir die Erregbarkeiten der drei Faserarten $= 1$ gesetzt haben. Den Ort des reagirenden Lichtes nach der Ermüdung finden wir, indem wir die den veränderten Werthen der Erregbarkeiten entsprechenden Werthe der Erregungsstärken berechnen und den ursprünglichen Werthen substituiren.

Dabei haben wir wieder den Einfluss zu berücksichtigen, welchen die Annahme bestimmter, dem Eigenlichte entsprechender, innerer Reizwerthe auf den Ort hat, welchen wir dem reagirenden Lichte im Farbendreieck deshalb zuweisen müssen, weil sich zu den Reizwerthen des reagiren-

den Lichtes die inneren Reizwerthe hinzugesellen und dasselbe dadurch einem minder gesättigten Lichte von demselben Farbentone gleichwerthig wird. Die dem so corrigirten reagirenden Lichte zukommenden Orte müssen sich also ändern je nach der Grösse der Werthe, die man den inneren Reizen zuschreiben will. Da das farblose Eigenlicht nur die Sättigung vermindern, nicht aber den Farbenton der Lichter beeinflussen kann, so müssen alle diese Orte auf dem Radius liegen, welcher den Ort des reagirenden homogenen Lichtes auf der Curve mit dem Mittelpunkte des Dreiecks verbindet. Nur wenn das Eigenlicht $= 0$ gesetzt wird, dürfen wir den Ort des reagirenden Lichtes im Farbendreieck in die Curve der homogenen Lichter selbst verlegen. In meiner Abhandlung ist (S. 28) gezeigt, dass man den Einfluss der Erregung der Netzhaut aus inneren Ursachen an dem Farbendreieck leicht in Rechnung ziehen kann, wenn man sich die Curve der homogenen Lichter ohne ihre Gestalt und Lagerung im Uebrigen irgend zu ändern, entsprechend verkleinert, also in etwas verjüngtem Maassstabe in das Dreieck eingezeichnet denkt, so dass jedes homogene Licht auf seinem Radius nach dem Mittelpunkte des Dreiecks verschoben ist.

Setzen wir die Summe der Reizwerthe eines homogenen Lichtes $= 1$ und nehmen für die Summe der inneren Reizwerthe einen gleich grossen Werth an, so wird der Ort für das reagirende Licht in die Mitte der betreffenden Strecke zu verlegen sein. Setzt man die Reizwerthsumme des Eigenlichtes $= n$, so findet man den Ort für das homogene Licht, indem man die Strecke im Verhältnisse von $1 : n$ theilt.

In der Gleichung (1) bedeutet der Factor n die Zahl der Maasseinheiten des Eigenlichts, wenn die benutzte Menge des ermüdenden Lichtes als die Maasseinheit des letzteren genommen wird. Ist aber im Farbendreieck für ein homogenes Licht eine bestimmte Lichtmenge als Maass-

einheit festgesetzt, so lässt sich auch für jedes beliebige andere homogene Licht die seiner Maasseinheit entsprechende Lichtmenge finden. Dies hatte bei unseren Versuchen für das reagirende Licht zu geschehen. Zu diesem Zwecke wurden zunächst das ermüdende und das reagirende Licht mit den beim Versuche benutzten Intensitäten gemischt und sodann dasjenige homogene Licht gesucht, welches diesem Gemische noch zugesetzt werden musste, um das Weiss des Tageslichtes zu erhalten. Aus der Wellenlänge dieses dritten Lichtes ergab sich sein Ort auf dem Farbendreieck. Dieser Ort wurde mit dem Mittelpunkte des Dreiecks durch eine Gerade verbunden und dieselbe bis dahin verlängert, wo sie die Verbindungslinie der Orte des ermüdenden und des reagirenden Lichtes schnitt. Der Schnittpunct theilt diese Verbindungslinie in zwei Theile, aus deren Grössenverhältniss sich nach Newton's Mischregel die in Maasseinheiten ausgedrückte Menge des benutzten reagirenden Lichtes bestimmen lässt, wenn die Menge des ermüdenden Lichtes gleich einer Maasseinheit des letzteren gesetzt wird. War auf diese Weise die Maasszahl für das reagirende Licht gefunden, so liess sich nunmehr der Ort feststellen, welcher dem sozusagen corrigirten (d. h. mit dem angenommenen Eigenlichte zusammengesetzt gedachten) reagirenden Lichte auf dem Farbendreieck zukam, je nachdem man dem Eigenlichte 1, 2, 3, . . . n Maasseinheiten beilegte.

Auf Grund dieser allgemeinen Erörterungen können wir nun im Folgenden für die einzelnen oben angeführten Fälle berechnen, wie weit sich der Farbenton des reagirenden Lichtes durch die Ermüdung würde verschieben können für den Grenzfall, dass das ermüdende Licht am Schlusse der Ermüdung farblos erschienen wäre. Da wir bei unseren Versuchen niemals bis zu dieser Grenze der Ermüdung gekommen sind, so würde thatsächlich eine so starke Verschiebung nicht vorkommen können.

Um die unvermeidlichen Ungenauigkeiten der Construction auf ein möglichst kleines Maass einzuschränken, benutzte ich zu den im Folgenden angegebenen Berechnungen und Constructionen nicht die kleine v. Helmholtz'sche Curve selbst, sondern construirte mir ein grösseres gleichseitiges Dreieck von 200 mm Höhe. In diesem Dreieck trug ich die einzelnen Punkte der Curve ein auf Grund der von v. Helmholtz

Fig. 1.

gegebenen Zahlen für das Verhältniss der drei Reizwerthe der einzelnen homogenen Lichter (Handbuch der physiol. Optik, 2. Aufl., S. 455). Nach der von v. Helmholtz gezeichneten Curve würde der Grundfarbe Grün ziemlich genau ein Licht von $565 \mu\mu$ Wellenlänge entsprechen; dieser Werth wurde auch meinen Beobachtungen zu Grunde gelegt. Nach der Construction derselben auf Grund der angeführten Zahlen ergibt sich aber für dieses Grün ein Werth von ca. $562 \mu\mu$. Für

unsere Versuche kommt diese Differenz, wie sich zeigen wird, gar nicht in Betracht.

In Fig. 1 ist das neue v. Helmholtz'sche Dreieck wiedergegeben. Fig. 2, 3, 4 sind nach den grossen von mir construirten Zeichnungen verkleinert. Ich habe die

Fig. 2.

Curvenlinie hier nicht ausgezeichnet sondern nur durch die ihr zu Grunde liegenden aus den v. Helmholtz'schen Zahlen berechneten Punkte angedeutet, um die Klarheit der Constructionen nicht zu beeinträchtigen. (Die berechneten Punkte fallen nicht alle genau in die Linie der v. Helmholtz'schen Curve; die Differenzen sind für das endgültige Er-

gebniss der vorliegenden Untersuchung nicht von Belang.)
In diesen 3 Figuren bedeuten:

R , G , B : die den drei Grundfarben Roth, Grün, Blau
entsprechenden Ecken des Dreiecks.

Fig. 3.

ω den Dreiecksmittelpunkt.

a das ermüdende homogene Licht.

E_0 das reagirende homogene Licht.

c dasjenige homogene Licht, welches zu dem aus dem ermüdenden und dem reagirenden Lichte hergestellten Mischlichte zugefügt werden musste, um Weiss zu erhalten.

$\omega \varepsilon_0$ bzw. $\omega \varepsilon_1, \omega \varepsilon_2 \dots \omega \varepsilon_{10}$ die Radian, welche dem Farbentone entsprechen, in welchem das reagirende Licht nach der Ermüdung gesehen werden könnte für den Grenzfall, dass das ermüdende Licht am Schlusse der Ermüdung farblos erschienen wäre und unter der Voraussetzung, dass das Eigenlicht $= 0$, bzw. $= 1, 2 \dots 10$ gesetzt worden wäre.

$\omega \varepsilon$ den Radius, welcher dem Farbentone entspricht, in welchem das reagirende Licht nach der Ermüdung bei unseren Versuchen thatsächlich gesehen worden ist.

1) Es wird für das der Grundfarbe Blau entsprechende Licht von $482 \mu\mu$ Wellenlänge ermüdet.

Wird die Summe der drei Reizwerthe dieses Lichtes $= 200$ gesetzt, so sind die Erregungsstärken für dieses Licht (bei normaler Erregbarkeit der drei Faserarten)

$$\begin{aligned} r &= 60,0 \\ g &= 60,0 \\ b &= 80,0. \end{aligned}$$

Dieses Licht wird in Folge der Ermüdung weiss erscheinen:

1)	für den Fall, dass das Eigenlicht $E = 0$ gesetzt wird, wenn	$\frac{\beta}{\varrho} = \frac{3}{4}$
2)	„ „ „ „ „ „ „ $E = 1$ „ „ wenn	$\frac{\beta}{\varrho} = \frac{19}{22}$
3)	„ „ „ „ „ „ „ $E = 3$ „ „ wenn	$\frac{\beta}{\varrho} = \frac{13}{14}$
4)	„ „ „ „ „ „ „ $E = 6$ „ „ wenn	$\frac{\beta}{\varrho} = \frac{23}{24}$
5)	„ „ „ „ „ „ „ $E = 10$ „ „ wenn	$\frac{\beta}{\varrho} = \frac{109}{112}$

Die nach Maasseinheiten bestimmte Menge des reagirenden Lichtes von $517,5 \mu\mu$, dessen Ort im Farbdreieck E_0 (Fig. 2) ist, verhielt sich zu derjenigen des ermüdenden Lichtes wie $33:49$, d. i. wie $0,673:1$. Bei Einrechnung des Eigenlichtes E ergeben sich für die Orte des reagirenden Lichtes auf dem Radius ωE_0 für die verschie-

denen Werthe von E folgende Abstände vom Mittelpunkte des Dreiecks (von 200 mm Höhe).

für $E=0$	ist	$\omega E_0 = 39$	mm
„ $E=1$	„	$\omega E_1 = 15,6$	„
„ $E=3$	„	$\omega E_3 = 7,1$	„
„ $E=6$	„	$\omega E_6 = 3,9$	„
„ $E=10$	„	$\omega E_{10} = 2,4$	„

Die entsprechenden Erregungsstärken sind bei normaler Erregbarkeit der drei Faserarten

für E_0 : r = 32,2	für E_6 : r = 63,1
g = 100,5	g = 70,5
b = 67,3	b = 66,4
für E_1 : r = 53,0	für E_{10} : r = 64,5
g = 80,4	g = 69,2
b = 66,6	b = 66,3
für E_3 : r = 60,0	
g = 73,5	
b = 66,5	

Wenn wir nun hierfür die Werthe substituieren, welche sich aus den veränderten Erregbarkeiten der drei Faserarten am Schlusse der Ermüdung für Blau ergeben, so finden wir, wenn wir die Summe der Erregungsstärken wieder = 200 setzen,

wenn $E=0$	ist	b = 55,0
„ $E=1$	„	b = 60,1
„ $E=3$	„	b = 63,2
„ $E=6$	„	b = 64,5
„ $E=10$	„	b = 65,0

Diese Werthe für die Erregungsstärke b der Blaufasern bedeuten zugleich, dass der neue Ort, welcher dem mit dem Eigenlichte gemischten reagirenden Lichte auf dem Farbendreieck (von 200 mm) zukommt, um die gleiche Zahl von Millimetern von der Dreiecksseite RG abliegt. Da wir nun wissen, dass dieser Ort zugleich auf der Geraden

liegen muss, welche durch die Ecke B und durch den Ort des (mit dem angenommenen Eigenlichte zusammengesetzt gedachten) reagirenden Lichtes gelegt wird, so ist der neue Ort des letzteren für jeden Einzelfall bestimmt.

Nach dem Gesagten müssen also die Orte der reagirenden Lichter für alle Ermüdungsgrade bei Annahme der verschiedenen Werthe für E auf den Strecken BE_0 bzw. $BE'_1 \dots BE'_{10}$ (Fig. 2) liegen. Sucht man auf jeder dieser Strecken den Punkt auf, für welchen die zugehörigen Erregungsstärken der Blaufasern die hier gefundenen Werthe haben, so ist damit die Grenze bestimmt, bis zu welcher der Farbenton des reagirenden Lichtes sich verschieben könnte, wenn das ermüdende am Schluss der Ermüdung farblos erschienen wäre. Der von dem Dreiecksmittelpunkte durch diesen Punkt gezogene Radius zeigt an, in welchem Tone für diesen Grenzfall das reagirende Licht würde erscheinen können.

Nun zeigt die Construction, dass für den Fall, wo das Eigenlicht $= 0$ wäre, das reagirende Licht höchstens im Tone eines Lichtes von etwa $543 \mu\mu$ erscheinen könnte ($\omega \varepsilon_0$); wenn jedoch die Summe der Erregungsstärken der drei Faserarten durch das Eigenlicht gleich jener durch das homogene Licht gesetzt wird, so könnte für den Grenzfall das reagirende Licht im Tone eines Lichtes von $551 \mu\mu$ gesehen werden ($\omega \varepsilon_1$); bei Annahme noch höherer Werthe würde die Verschiebung aber nur um ein ganz Geringes weiter stattfinden können, als bei Annahme kleinerer Werthe für das Eigenlicht ($\omega \varepsilon_3, \omega \varepsilon_6, \omega \varepsilon_{10}$). Nun hatte aber die Beobachtung gelehrt, dass eine nicht entfernt bis zu der angenommenen Grenze getriebene Ermüdung genügte, um das reagirende Licht im Tone eines Lichtes von grösserer Wellenlänge als $565 \mu\mu$ erscheinen zu lassen ($\omega \varepsilon$).

Diese Thatsache ist also nach der Dreifasertheorie nicht zu erklären, auch dann nicht, wenn man das neue v. Helmholtz'sche Dreieck zu Grunde legt und dem Eigen-

lichte so ausserordentlich hohe Werthe zuschreiben wollte, wie dies hier geschehen ist.

In ganz analoger Weise wurde auch bei der Berechnung der Grenzfälle für die anderen Versuche vorgegangen; ich beschränke mich hier darauf, das Ergebniss der Rechnungen an den beigegebenen Farbendreiecken zu erläutern.

2) Wenn als ermüdendes ein der neuen v. Helmholtz'schen Grundfarbe Grün entsprechendes Licht dient, und als reagirendes ein Licht von $615 \mu\mu$, so ergibt sich Folgendes (Fig. 3):

Wird das Eigenlicht $= 0$ gesetzt, so kann das reagirende Licht für den Grenzfall höchstens im Tone eines Lichtes gesehen werden, welches dem Radius $\omega \varepsilon_0$ entspricht. Für $E=1$ würde der Grenzfall durch den Strahl $\omega \varepsilon_1$ gegeben sein. Setzt man $E=2$ oder $=4$ oder $=10$, so sind die Grenzen, bis zu welchen das reagirende Licht sich verschieben kann, nur ausserordentlich wenig voneinander verschieden; sie entsprechen den Strahlen $\omega \varepsilon_2$ bis $\omega \varepsilon_{10}$. Der Versuch aber hatte gelehrt, dass eine viel geringere Ermüdung genügte, um das reagirende Licht in einem Tone erscheinen zu lassen, welcher dem Radius $\omega \varepsilon$ entspricht. Die Dreifasertheorie kann dies nicht erklären.

3) Wird als ermüdendes Licht ein homogenes Gelb von $585 \mu\mu$ Wellenlänge gewählt (Fig. 4), welches complementär ist zu dem der Grundfarbe Blau entsprechenden Lichte, und als reagirendes ein Licht von $540 \mu\mu$ Wellenlänge, so ergibt Berechnung und Construction, dass in diesem Falle das reagirende Licht für den Grenzfall der Ermüdung im Tone eines Lichtes von etwa $498 \mu\mu$ Wellenlänge würde gesehen werden können. Man kann dabei dem Eigenlichte beliebig hohe Werthe zwischen 0 und 10 geben, ohne dass dies auf die Grenzen, bis zu welchen das reagirende Licht sich nach der Theorie würde verschieben können, einen wesentlichen Einfluss hätte; diese Grenzen liegen alle zwischen den Strahlen $\omega \varepsilon_0$ und $\omega \varepsilon_{10}$ (Fig. 4). Die Beobach-

tung lehrte aber, dass bei viel geringerer Ermüdung das reagirende Licht im Tone eines Lichtes von weniger als $490 \mu\mu$ gesehen wird (entsprechend dem Strahle $\omega\epsilon$).

Die mitgetheilten Thatsachen werden genügen, um zu zeigen, dass die Tonänderungen der Spectralfarben nach Ermüdung des Sehorgans mit homogenem Lichte nach der Dreifasertheorie auch dann nicht erklärt werden können, wenn man das neue v. Helmholtz'sche Dreieck zu Grunde legt und dem Eigenlichte ganz beliebig hohe Werthe giebt; denn wir haben hier sogar so hohe Werthe für das Eigenlicht gewählt, wie sie die Anhänger der Dreifasertheorie selbst nicht werden annehmen wollen. Uebrigens war in meiner ersten Abhandlung (S. 28 f.) die Unvereinbarkeit der Beobachtungen mit der Dreifasertheorie ganz allgemein dargethan. Die in dem vorliegenden Aufsätze gegebenen Erörterungen bestätigen nur von Neuem den dort schon ausdrücklich hervorgehobenen Satz: „Die thatsächlichen Ergebnisse der Ermüdungsversuche würden sich nur erklären lassen, wenn die homogenen Lichter als ermüdende genommen, sehr gesättigt, als reagirende genommen aber ausserordentlich wenig gesättigt wären, was selbstverständlich nicht möglich ist“.

v. Helmholtz findet neuerdings (Handbuch der physiol. Optik, 2. Aufl., S. 466) wahrscheinlich, dass das Eigenlicht nicht farblos sondern gelbweiss sei und dass überhaupt der gleichstarken Erregung aller drei Faserarten die Empfindung Gelbweiss entspreche. Ersteres kommt hier deshalb nicht in Betracht, weil wir nach wie vor die dem Eigenlichte entsprechenden inneren Reizwerthe für alle drei Faserarten gleich gross setzen müssten. Wie aber ein der Mitte des Farbendreiecks entsprechendes Licht empfunden oder bezeichnet wird, ist für den wesentlichen Theil unserer Untersuchung ebenfalls gleichgültig, weil es sich dabei nur darum handelte, dasjenige homogene Licht zu bestimmen, welches einer unermüdeten Netzhautstelle in demselben Farbentone erscheint, wie der ermüdeten Stelle das reagirende Licht, wobei es im Uebrigen gleichgültig ist, wie uns dieser Farbenton erscheint und wie wir ihn nennen wollen.

Nur für die Bestimmung des Verhältnisses der (nach Maasseinheiten gemessenen) Mengen der zum Versuche benutzten ermüdenden und reagirenden Lichter, wobei wir ein Weiss mischen mussten, wäre es nicht ganz gleichgültig, wenn das weiss erscheinende Tageslicht nicht, wie wir annahmen, alle drei Faserarten gleich stark erregen würde. Aber auch wenn die Qualität des Tageslichtes dem Mittelpunkte des Dreiecks nicht genau entspräche, worüber sich v. Helmholtz nicht genauer ausgesprochen hat, so könnte dies auf das Ergebniss unserer Versuche keinen nennenswerthen Einfluss haben. Würde aber das Tageslicht einem vom Mittelpunkte erheblich abliegenden Punkte entsprechen, so würden in dem Maasse, wie der eine oder andere unserer Versuche minder schlagend erschiene, die übrigen nur um so schlagender sein, da die Verlagerung des dem Tageslichte entsprechenden Ortes sich immer nur in einer Richtung geltend machen könnte. Da übrigens nach v. Helmholtz schon die homogenen Lichter sehr weisslich sind, so könnte der Ort des Tageslichtes unmöglich erheblich vom Mittelpunkte des Dreiecks abweichen. Das ganze Bedenken kommt also gegenüber der grossen Abweichung der Thatsachen von dem nach der Theorie Zulässigen nicht in Betracht. Endlich könnte noch daran erinnert werden, dass nach der Theorie von v. Helmholtz der Farbenton bei ungeändertem Verhältniss der drei Erregungsstärken auch innerhalb der bei unseren Versuchen in Betracht kommenden Werthe von ihrer absoluten Grösse nicht ganz unabhängig ist. Man könnte deshalb vielleicht einwenden wollen, dass an der ermüdeten Netzhautstelle wegen der hier geringeren Werthe der drei Erregungsstärken der Farbenton von dem im Obigen angenommenen abweichen könnte. Aber diese Abweichung müsste, wie auch v. Helmholtz selbst (S. 469) angibt, derart sein, dass sich der Farbenton einer zwischen zwei Urfarben gelegenen Zwischenfarbe „der auf gleicher Seite der Gegenfarbe liegenden Urfarbe nähert“. Ein Blick auf Fig. 2 lehrt, dass dann die Verschiebung des Farbentones für den angenommenen Grenzfall nicht einmal so weit gehen könnte, wie wir berechnet haben. In dem durch Fig. 4 versinnlichten Falle könnte die Verschiebung allerdings ein klein wenig grösser sein als unsere Berechnung für den Grenzfall erfordert, aber sie könnte, wie dies im Wesen der erwähnten Hypothese liegt, unmöglich weiter gehen als bis zu dem der Mitte der Dreiecksseite $G B$ entsprechenden Punkte, während sie in Wirklichkeit weit

darüber hinausging. Nur in dem in Fig. 3 wiedergegebenen Falle würde sich aus der Hypothese eine über das von uns berechnete Maximum hinausgehende Verschiebung des Farbentones ergeben können. Wenn man aber bedenkt, dass in diesem Falle nur 70 Secunden lang, also nicht entfernt so lange ermüdet wurde, wie es für den von uns angenommenen Grenzfall nöthig wäre, und dass ferner das reagirende Licht in einer Helligkeit und Sättigung erschien, bei welcher nach der erwähnten Hypothese eine erhebliche Verschiebung des Farbentones noch gar nicht möglich wäre, so fällt der erhobene Einwand nicht ins Gewicht. Denn aus denselben Gründen, aus welchen die Hypothese bei Abnahme der Erregungsstärken eine Verschiebung des Farbentones fordert, verlangt sie auch eine gleichzeitige Minderung der Sättigung der Farbe. Bedenkt man endlich, dass unter unseren früheren Versuchen viele sind, deren Ergebniss ebenso wie das der hier besprochenen Versuche 1 u. 3 der Hypothese direct zuwiderläuft, so darf man die letztere als völlig ungeeignet zur Erklärung unserer Beobachtungen bezeichnen. Es wurde derselben hier überhaupt nur Erwähnung gethan um zu zeigen, dass wir uns bemüht haben Alles zu berücksichtigen, woran sich etwa beim Versuche der Erklärung unserer Beobachtungen aus der Young'schen Theorie überhaupt denken liesse.

Auch A. König kritisirt in einem Referate¹⁾ die in meinem Aufsatze entwickelten Ableitungen und kommt zu folgendem Ergebnisse: „Mit dem Verfasser ist Referent der Ansicht, dass die beobachteten Tonänderungen in vollem Einklange mit der Hering'schen Farbentheorie stehen, kann ihm aber nicht beipflichten, wenn er glaubt, einen Widerspruch mit der Young-Helmholtz'schen Theorie zu finden“. Zum Beweise dafür wählt er folgendes Beispiel:

„Wir wollen uns, sagt er, auf die Verhältnisse des vom Referenten gemeinsam mit C. Dieterici aufgestellten Farbendreiecks beziehen. Wenn das Auge für gelbes Licht von 575 $\mu\mu$ ermüdet worden ist, so erscheint unmittelbar nachher rothes Licht von 700 $\mu\mu$ „„bläulichroth““. Hess argumentirt nun in folgender Weise: Da durch Licht von 575 $\mu\mu$ die Roth- und Grünfasern in gleicher Weise gereizt, also

¹⁾ Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Bd. III, S. 511.

auch in gleicher Weise ermüdet werden, so muss Licht von $700\ \mu\mu$, welches nur die Roth- und Grünfasern reizt, seinen Ton unverändert beibehalten. Dieses wäre nach Ansicht des Referenten zwar möglich, ist aber nicht nothwendig, ja nicht einmal wahrscheinlich. Wenn nämlich Roth- und Grünfasern gleich stark ermüdet, also schwerer reizbar als gewöhnlich sind, so wird der im Vergleich zum Grünwerth starke Rothwerth des Lichtes von $700\ \mu\mu$ viel mehr zur Geltung kommen als bei unermüdetem Auge. Da nun aber die Grundempfindung Roth einen bläulicheren Ton hat als das Licht von $700\ \mu\mu$ unter normalen Verhältnissen, so ist damit das Hinüberücken der Empfindung nach dieser Richtung erklärt.“

Die Unhaltbarkeit dieses durchaus irrthümlichen Einwandes wird Jedem einleuchten, wenn ich auf eine nothwendige Consequenz desselben hinweise. Hätte König recht, so müsste ja in genau gleicher Weise wie nach Ermüdung für Gelb auch nach Ermüdung für farbloses, alle drei Faserarten gleichstark erregendes Licht, jedes Licht von mehr als $575\ \mu\mu$ Wellenlänge in einem dem reinen Roth näher gelegenen bzw. rein rothen (oder nach König „bläulich-rothen“) Tone erscheinen, was thatsächlich nicht der Fall ist. In analoger Weise müssten nach Ermüdung für Weiss im Allgemeinen sämtliche Farben des Spectrums ihren Ton ändern und zwar in der Richtung gegen eine der 3 „Grundfarben“ hin, was aber nicht der Fall ist. Ermüdung für Weiss würde danach für die Anhänger der Dreifasertheorie ein einfaches und durchaus sicheres Mittel zur Auffindung der 3 Grundfarben sein.

Auf eine eingehendere Widerlegung dieses und eines anderen in dem gleichen Aufsätze gemachten Einwandes kann ich um so leichter verzichten, als ja v. Helmholtz selbst schon zugegeben hat, dass die in meinem ersten Aufsätze gebrachten Einwände berechtigt seien gegenüber einer solchen Fassung der Theorie, nach welcher (wie bei der König'schen Curve) eine oder einige Spectralfarben nur einer oder zweien Grundfarben entsprächen, also nur eine oder nur zwei Faserarten erregen würden.