

Untersuchungen zur Psychophysik der Farbenempfindungen am Spectrum.

Von

Paul Mentz.

Mit vier Figuren im Text.

I. Einleitung.

1. Die Farbenbezeichnungen der Sprache.

Da die bekannte Scheidung der unmittelbaren Farbenwahrnehmung in Farbenton, Farbegrad und Helligkeitsgrad als ihre drei Factoren zur Grundlage der folgenden Untersuchung genommen werden soll, so ist es wohl zweckmäßig, zunächst diese Begriffe selbst mit Rücksicht auf die in der Sprache ausgeprägten Einzelheiten auf ihren Inhalt zu prüfen.

Der Begriff »Farbenton« bezeichnet zunächst ein qualitativ Gegebenes. Die einzelnen als verschieden zu beurtheilenden Farbtöne stellen, nach partieller Identität und Verschiedenheit geordnet, continuirliche Reihen dar, die man wiederum in verschiedene Gruppen zusammenfassen kann, wobei jedoch die Anzahl derselben zunächst vollständig unbestimmt gelassen werden muss. Die Bezeichnung »Farbenton« kann man nun einmal im engeren Sinne fassen als die eigentlichen »Farben« berücksichtigend, sodann in weiterem Sinne auch die Reihe Weiß, Hellgrau, Grau, Dunkelgrau, Schwarz mit ihren Zwischengliedern und Uebergängen unter sich begreifend. Auch diese können ja für die Beurtheilung nicht anders denn als bestimmte qualitative Verschiedenheiten gefasst werden. Die eigentlichen Farben, überhaupt alle Punkte größerer Verschiedenheit in diesen Reihen, besitzen eine beschränkte Verbindbarkeit, wie schon die Unmöglichkeit der entsprechenden sprachlichen Zusammensetzungen zeigt.

In den hierher gehörigen Fällen fällt nun zunächst einerseits die Fülle der sprachlichen Unterscheidung der verschiedenen Farbtöne selber, andererseits die Gruppierung nach Punkten größerer Verschiedenheiten auf, die jedoch, an bestimmte Objecte sich heftend, vielfach von äußeren Bedingungen abhängig ist. Diese Züge weisen sämmtliche entwickelteren Sprachen auf, wie z. B. die altgriechische, altrömische, französische, deutsche, englische, und sie lassen sich theilweise sogar in den Sprachen sogenannter Naturvölker nachweisen, sofern hier praktische Interessen, z. B. diejenigen der Viehzucht, die Entstehung einer genaueren sprachlichen Unterscheidung nothwendig gemacht haben. Angeführt seien, möglichst in eine Reihe geordnet, aus dem Deutschen die allerdings zum Theil unter Mitwirkung von Fremdwörtern zu Stande gekommenen Farbentbezeichnungen: »Bordeauxroth, Rubinroth, Ponceau, Scharlachroth, Scharlach, Granatfarben, Amethystfarben, Kirschroth, Feuerroth, Kupferroth, Blutroth, Ziegelroth, Knallroth, Fuchsroth, Pfirsichblüthroth, Heliotrop, Lachsroth, Rostfarben, Rosenroth, Rosa, Fleischfarben, Isabelle, Orange, Chamois, Nankinggelb, Schwefelgelb, Honiggelb, Safrangelb, Dottergelb, Citronfarben, Strohgelb, Strohfalten, Wachsgelb, Crémegelb, Crémefarben, Elfenbeinfarben, Blond, Lauchgrün, Smaragdgrün, Giftgrün, Grasgrün, Saftgrün, Papageigrün, Spangrün, Moosgrün, Reseda, Apfelgrün, Olivgrün, Olivfarben, Meergrün, Seegrün, Himmelblau, Stahlblau, Türkisblau, Lasurblau, Cyanblau, Kornblumenblau, Kornblau, Marineblau, Preußischblau, Veilchenblau, Schieferblau, Violett, Pensée, Purpurfarben, Purpur, Carmoisin, Fliederfarben, Lila, Lavendel, Hechtgrau, Havannabraun, Havanna, Kastanienbraun, Kastanienfarben, Terracottabraun, Rehbraun, Rehfalten, Nelkenbraun, Zimmetbraun, Tabakbraun, Tabakfarben, Erdfalten, Perlgrau, Mausgrau, Aschgrau, Bleigräu, Kreideweiß, Milchweiß, Schneeweiß, Pechschwarz, Rabenschwarz, Kohlschwarz« und viele andere mehr, und in Verbindung mit Glanz: »Taubengrau. Silbergräu, Gold, Altgold, Broncefalten, Kupferfarben« u. s. w. Aus dem Griechischen sind als Bezeichnungen anzuführen: πορφυροῦν, φοινικῶν, ὕσγιον (von ὕσγη), φλογοειδές, πυρρόν, πυρρόν, ἐρυθρόν, μίλτινον, ῥόδεον, οἰνωδες, κροκάον, κροκοειδές, ἰώδες (von ἰώ: rosten), ἰσατῶδες, κνηκόν, κίτρινον, ξανθόν, μήλινον, μηλινοειδές, μήλωψ, σιτόχρουν, χρυσόχρουν, ξουθόν, κερρόν, ὠχρόν (ursprünglich ἄχροον), θάψινον, χλωρόν,

χλωῶδες, ποῶδες, πράσιον, πράσινον, πρασοειδές, σμαράγδινον, γλαυκόν (in Beziehung auf γλαῦξ), κυάνεον, κυανοειδές, ιοειδές, ἰωνιάδες, ἄερινον, ἀεροειδές, ἀερίζον, οὐρανόχρουν, ἰάνθινον, ἰοβαφές, ἀμεθύστινον, οἰνωπόν, ἄλουργές, ἄλουργόν, κελαινόν, μελάγχρουν, μέλαν, ῥούσιον (von ῥοῦς), φαιόν, καρύκινον (von καρύκη), ὄρφνιον, ὄρφνιον, σπόδιον, σποδοειδές, τεφρόν, μύϊνον, λευκόν, ἀφρῶδες, πόλιον, ὄρφνόν. Aus dem Lateinischen seien die allerdings zum Theil in nahem Zusammenhange mit den griechischen stehenden Ausdrücke angeführt: Purpureum, molochinum, puniceum, coccinum, rubicundum, rubidum, miniaceum, rubrum, igneum, russum, rufum, rubeum, cervinum, fulvum, aureum, flavum, flavens, luteum, croceum, silaceum, gilvum, melinum, helvum, sulphureum, mellum, cereum, cerinum, galbinum, luridum, buxeum, herbidum, herbacum, porraceum, prasinum, viride, aerugineum (von aerugo), psittaceum, hyalinum, venetum, glaucum, thalassinum, cumatile, caeruleum, cyaneum, caesium, ianthinum, violaceum, ferrugineum, fulvum, pullum, fuscum, adustum, badium, spadix, furvum, cineraceum, incanum, canum, candidum, album, albidum, ater, nigrum. Unter ihnen stehen candidum und nigrum in Verbindung mit Glanz.

Manche dieser Bezeichnungen zeigen in ihrer Unbestimmtheit, dass noch in den späteren Stadien der Sprachenentwicklung, falls die Aufmerksamkeit nicht besonders geweckt wird, vielfach nur geringe Unterscheidungen getroffen werden. Im allgemeinen aber weisen sie eine ziemlich hohe Unterschiedsempfindlichkeit auf. Doch ist die letztere, wie schon die gewöhnliche Lebenserfahrung lehrt, einer solchen Ausbildung fähig, dass dann die Sprache nicht mehr gleichen Schritt zu halten im Stande ist. So haben wohl Gelbgrün, Gelblichgrün, Grüngelb, Grünlichgelb oder Orangeroth, Rotherorange, Röthlichorange ihre bestimmten Bedeutungen, obgleich dies schon im letzteren Falle etwas unsicher ist. Dagegen ist keine Bezeichnung für die Fälle vorhanden, wo etwa für die Reproduction des Beurtheilenden Grün und Gelb, oder Orange und Gelb, Violett und Blau, Violett und Schwarz, Violett und Grau, Violett und Purpur u. s. f. gerade im Gleichgewicht sind, oder für andere quantitative Verhältnisse. Dass die sprachlich einfacheren Bezeichnungen, wie z. B. »Purpur, Roth, Orange, Gelb, Blau, Violett, Schwarz, Braun, Grün, Rosa, Lila«, jedoch keineswegs die Fülle entschiedener Verschiedenheiten erschöpfen, ist nach diesen Aufzählungen aus so verschiedenen Sprachen wohl kaum

mehr hervorzuheben nöthig. Ebenso sei auf die sprachliche und sachliche Unmöglichkeit gewisser Verbindungen, wie Orangelila, Blau-rosa u. s. w., hier nur kurz hingewiesen.

Der Farbenton ist als solcher keiner Steigerung fähig. Wenn er aber gleichwohl einer Steigerung folgend vorgestellt wird, so wird er eben hierdurch als Farbengrad gedacht. Auch die Helligkeit als solche kann man sich ganz wohl als besondere Qualität vorstellen. Die Möglichkeit der Steigerung ist dagegen nothwendig in den Begriffen Farbengrad und Helligkeitsgrad enthalten. Ein solches Vorhandensein einer Steigerung wird 1) sinnenfällig wahrgenommen und ist 2) auch oft in den Bezeichnungen der Sprache angedeutet, wenn man von »gesättigteren« und »helleren« Farben spricht. Schließlich ist 3) entsprechend dieser Zu- oder Abnahme der Steigerung eine im ganzen continuirlich fortschreitende Zu- oder Abnahme des Gefühlscharakters zu bemerken, wobei man selbstverständlich den Eigencharakter von Schwarz und Weiß mit berücksichtigen muss. Doch lässt sich derselbe leicht abgetrennt in der Reihe Schwarz-Grau-Weiß untersuchen.

Eben diese Thatsachen, die sich wohl kaum leugnen lassen, sprechen dafür, dass der Farbenton im allgemeinen die Qualität, der Farbengrad die Intensitäten der Farben in engerem Sinne, der Helligkeitsgrad die Intensitäten der Weiß-Grau-Schwarz-Reihe enthält, denn sonst ließe sich die intensive Vergleichung, welche in den Aussagen »Mehr« oder »Weniger«, z. B. mehr Blau, weniger Blau, mehr Weiß u. s. w., und in den Aussagen: hier ist mehr Sättigung als dort vorhanden, diese Farbe ist heller als jene, gar nicht verstehen, zumal da dann noch die Vielfachheit der Unterscheidung hinzukommt. Diese Möglichkeit der Steigerung des Empfindungs- sowohl wie des Gefühlsinhaltes wird durch die Begriffe Farbengrad und Helligkeitsgrad eben sachgemäß wieder gegeben.

Man kann aber dies als psychische Thatsache auch in den sprachlichen Bezeichnungen verfolgen. So sprechen die Zusammensetzungen: Hochroth, Hochgelb, Tiefroth, Tiefgelb, Tiefgrün, Tiefviolett, Tiefpurpur, Tiefschwarz, Hochweiß u. s. w., welche einen hohen Farbengrad bezeichnen, geradezu für eine Affektwirkung, entsprechend den Bezeichnungen: Hochsinnig, Hochmüthig, Tiefsinnig,

ein tiefer Kummer u. s. w. ¹⁾, und hierbei lassen sich natürlich wieder Grade denken. Auf die Erfüllung eines durch die Erfahrung gegebenen Schemas des Erlebens bis zum Gipfel gehen ferner die Zusammensetzungen: Voll Roth, ein volles Orange, ein volles Gelb, ein volles Blau u. s. w. Den Gefühlscharakter mit seiner Steigerung nach seinen zwei Extremen selbst drücken die Bezeichnungen aus: Lebhaft Roth, Lebhaft Orange, Lebhaft Gelb, und auf der anderen Seite Schwach Roth, Matt Roth, Schwach Orange, Matt Orange u. s. w. Zwischen ihnen lassen sich wieder natürlich die entsprechenden Zwischenglieder denken, wobei bei vielen Farben der Farbenton nicht nothwendig als verändert vorgestellt zu werden braucht, wenigstens innerhalb einer größeren Reihe von Gliedern der Steigerung. Im Altgriechischen und im Lateinischen entsprechen der Zusammensetzung mit »Hoch«: ὀξύ, acriter und excitatum in der gleichen Bedeutung und Anwendung, und der Zusammensetzung mit »Tief«: βαθύ, βαρύ, profundum. Dem Ausdruck »voll« entspricht: plenum, saturum, in se consumptum. Der subjectiven Hineinversetzung bezw. Auffassung des »Lebhaft«: vehemens, ferner: εὐανθές, ἀνθηρόν, oder floridum, die letzteren zunächst als Reproduction blühender Pflanzen zu verstehen, sodann aber auch subjectiv den gesteigerten Gefühlsinhalt ausdrückend. Dem äußerlichen Anlass entsprechen auch zunächst die Ausdrücke: κατακορές, exaturatum, saturum, »gesättigt«, entnommen den Beobachtungen beim Färben und Lösen von Farbstoffen jeder Art. Sie setzen jedoch außerdem ein Hineinversetzen in den Zustand des Zusichnehmens von Speise oder Trank voraus. Lediglich subjectiv ist πεπεισμένον, das eigentlich sogar »zuversichtlich« bedeutet und lediglich durch den entsprechenden Gefühlsinhalt zu verstehen ist.

Die Verschiedenheit des Farbengrades bezeichnen schließlich die Zusammensetzungen: ἐξ-έρυθρον, ἔγ-χλωρον, διά-λευκον, ἐπί-λευκον, ὑπό-λευκον, ὑπό-χλωρον, welche deutlich auf die Annäherung oder die Entfernung gegenüber höchsten Farbengraden gehen. Im Lateinischen ähnlich, fast eine Scala bildend: acriter viride; rubicundum; rubrum, rufum, nigrum, viride; subrufum, subrubrum, sufflavum, subnigrum; rubicundulum, nigricans. Ferner: incanum gegenüber canum. Im

1) Vergl. hierzu: Philos. Studien Bd. XI, 1895, S. 385 f.

Deutschen, als Scala: stark Roth, sehr Roth, Roth, schwach Roth, matt Roth, röthlich, schwach röthlich, matt röthlich, ein »Schimmer« von Roth.

Der englische Ausdruck *dead*, der sowohl tiefschwarz wie schwarz bedeutet, kann auch in der Zusammensetzung *deadblack* vorkommen, wird jedoch auch für die Charakterisirung »tiefer«, »dumper« Töne gebraucht und weist dadurch auf die Ausnahmestellung des Schwarz hin, bei welchem sich zugleich bei höchster möglicher Steigerung ein eigenartiger Gefühlsinhalt entwickelt, der bei den eigentlichen Farben nicht vorkommt.

Den Helligkeitsgrad bezeichnet ebenfalls treffend, nur ihm gleichsam von der Rückseite her nehmend, der von Maxwell vorgeschlagene Ausdruck »*shade*«, der dann natürlich auch in der Schwarz-Grau-Weiß-Reihe einzeln vorkommen kann, obgleich Maxwell ihn unmittelbar nicht so gefasst hat¹⁾. Die Steigerung, die mit ihm nothwendig verbunden ist, bekunden auch die Ausdrücke: »Sich aufhellen«, »sich lichten«, und übertragene Ausdrucksweisen, wie »eine Schwierigkeit aufhellen«, »ein Problem beleuchten« u. s. w., auch die Thatsache der »festlichen« Beleuchtung. Ebenso zieht das »Sich verdunkeln« als Steigerung der Schwarzempfindung die entsprechende gradweise Zunahme des Gefühlscharakters mit sich, wie die Erfahrung zeigt.

Abgesehen von Schwarz, Grau, Weiß selbst sind hier als Zusammensetzungen vorhanden: Schwärzlich Roth, Schwärzlich Blau, Schmutzig Grün, Dunkel Roth, Dunkel Orange, Hell Roth, Hell Orange, Weißlich Roth, Weißlich Orange u. s. w. Im Griechischen sind als Zusammensetzungen mit Schwarz und Weiß selbst vorhanden: *μαλάγ-χλωρον*, *λευκ-έρυθρον*, *λευκό-χλωρον*, auch *έρυθρό-χλωρον*, im Lateinischen in sehr bezeichnender Weise: *e nigro rufum*, ferner: *rubrum subalbicans*, *rufum subalbicans*. Allgemeinere Ausdrücke für den Dunkelheitsgrad bezw. Helligkeitsgrad sind: *ὄρφνινον*, *ὄρφνῶδες*, *nubilum*, *furvum*, *albidum*, *clarum*. Hierher gehören wiederum die Zusammensetzungen mit *ὕπό* und *sub*. Ganz allgemein scheinen

1) Maxwell wendet ihn an in: *Phil. Transactions of the R. S. of Edinburgh*, Vol. XXI, 1857, S. 279, jedoch als Aufzählung der drei Variablen ohne weiteren Commentar; an den übrigen Stellen, *Phil. Transactions of the R. S. of London*, Vol. CL, 1861, S. 72, 81, 84, gebraucht Maxwell den Ausdruck *brightness*; ebenso: *Transactions of the R. S. of Edinburgh*, a. a. O. S. 295.

gewesen zu sein: *πελλόν, πελιόν, ὑποπόλιον, ὑποπέλιον*, pullum, vielleicht auch *ravum*. Auch das deutsche »Schmutzig Roth«, »Blass Roth«, »Matt Roth«, »Schwach Roth« u. s. w. sind hier zu erwähnen. Zugleich Glanz setzen voraus: *λαμπρόν, candidum*. Hier ist zu bemerken, dass, wie Weiß leicht mit Glanz selbst verbunden ist, so der Glanz seinem Ursprunge entsprechend infolge diffuser Reflexion etwas Weißliches an sich hat¹⁾.

Selbst anscheinend so unentschiedene Farbenbezeichnungen wie »weinfarben, kieselfarben, meergrün, *κυάνεον*, silaceum, *πορφυροῦν*, purpurn u. s. w.«, auch »modefarben« unter gewissen Umständen sind deshalb bemerkenswerth, weil sie trotz der Farbentonverschiedenheit, die sie in sich begreifen können, gleichwohl zureichend verständlich, wenn eben auch nicht »eindeutig« sind. Dies kann nur darauf beruhen, dass, von der objectiven Constanz der Objecte abgesehen, hier eine Schätzung des Farbengrades und Helligkeitsgrades mitgewirkt hat, indem nämlich ziemlich als Reihe zusammenliegende oder zum Theil genau gleiche Farbengrade oder Helligkeitsgrade oder selbst zum Theil Beides zusammen solche summarische sprachliche Zusammensetzungen ermöglichten und bis auf die Gegenwart erhalten haben.

Alle diese Fälle zeigen, wie Farbenton, Farbengrad, Helligkeitsgrad (»shade«) alle Möglichkeiten der Erfahrung im Gebiete der Farbenwahrnehmung auszudrücken im Stande sind. Einige weitere Bezeichnungen werden noch im Folgenden gegeben werden.

2. Die Beziehungen zwischen Farbenton, Farbengrad und Helligkeitsgrad.

Manche Thatsachen der Farbenbezeichnung lassen bereits erkennen, dass die drei Variabeln Farbenton, Farbengrad, Helligkeitsgrad in gewissen Beziehungen zu einander stehen. Namentlich zwischen der Qualität und den beiden Intensitäten lassen sich ohne weiteres functionale Beziehungen erkennen. Wenn sich nämlich ein Farbenton in einem gegebenen Falle, z. B. bei Aenderung der Amplitude der Licht-

1) Vergleiche hierzu die irrthümliche Vermengung von Maxwell, Phil. Transactions of the R. S. of Edinburgh, a. a. O. S. 295.

schwingungen oder der Lichtmenge ändert, und wenn gleichzeitig der Farbengrad oder Helligkeitsgrad oder beide zusammen sich ändern, so kann man dem tieferen Zusammenhange in sehr verschiedenen Richtungen nachgehen. Denn man kann annehmen: 1) Die Aenderung des Farbentons ist die unmittelbare Wirkung der physikalischen Aenderung; die Aenderung des Farbengrades oder diejenige des Helligkeitsgrades ist aber nur eine mittelbare Folge. 2) Die Aenderung des Farbengrades ist die unmittelbare Wirkung der physikalischen Aenderung; die Aenderung des Farbentons dagegen erst ein mittelbares Ergebniss. 3) Die Aenderung des Helligkeitsgrades ist die unmittelbare Folge der physikalischen Aenderung; die Aenderung des Farbentons dagegen ein mittelbares Ergebniss. 4) Die Wirkung der physikalischen Aenderung ist unmittelbar auf zwei oder gar alle genannten Factoren zu beziehen.

In eben diesen Richtungen kann man aber den zureichenden Grund auch für die Aenderungen suchen, welche bei sehr kurz wirkenden Reizen, bei nachwirkenden Reizen, bei Synthesen zuweilen in sehr auffallender Weise zur Wahrnehmung kommen.

Auf das Vorhandensein andererseits einer gewissen Selbständigkeit von Farbengrad und Helligkeitsgrad scheint dagegen die Thatsache des Widerstreits von Farbengrad und Helligkeitsgrad, im Diffractionsspectrum sowohl als im Dispersionsspectrum, hinzuweisen. Als ein solcher ist nämlich die im allgemeinen vor sich gehende Abnahme des Farbengrades bei Zunahme des Helligkeitsgrades gegen die Mitte des Spectrums hin am ehesten zu verstehen. Weiterhin kann man hierfür die Thatsache anführen, dass überhaupt allgemein, und nicht nur im Spectrum, ein specifisches »Gelb« nicht einen so hohen Farbengrad aufweisen kann, als z. B. ein specifisches Violett. Sobald dies nämlich gleichwohl vorgestellt wird, oder in Wirklichkeit vorhanden zu sein scheint, dann wird immer in Wirklichkeit jenes Gelb entweder einen sehr geringen Helligkeitsgrad, oder aber eine Aenderung des Farbentons nach Röthlich-Gelb, oder gar Gelblich-Roth aufweisen.

Diese Thatsache subsumirt sich indessen bei genauerer Verfolgung, wie es scheint, einfach, wenn auch erst mittelbar, den causalen Beziehungen zwischen Qualität und Farbengrad, oder denjenigen zwischen Qualität und Helligkeitsgrad. In letzterer Hinsicht scheint

hier ein Widerstreit der Intensitäten vorhanden zu sein, nämlich des Farbengrades der Farben mit demjenigen von Weiß oder Schwarz, und da eben mit den Intensitäten nothwendig irgendwelche Qualitäten verbunden sind, eigentlich der Qualitäten selbst als Widerstreit der Auslösung. So ist denn zwar scheinbar eine gewisse Selbständigkeit der Intensitäten, in Wirklichkeit aber doch eine solche der Qualitäten vorhanden. Die Einzelheiten bei diesem Vorgange bleiben hier noch im Dunkeln, namentlich die Punkte ihrer Abgrenzung. Auf die weitere Thatsache, dass es Stellen diesseits des äußersten Roth des Spectrums und jenseits des äußersten Violett gibt, welche merkwürdiger Weise heller sind als diese selbst, wird später genauer einzugehen sein.

Sprachlich sind für die oben erwähnten Beziehungen gewisse undenkbbare Ausdrücke bezeichnend, wie: Rothscharz, Gelbscharz, volles Schwarzroth, volles Röthlichschwarz, volles Schwarzblau, denen auf der anderen Seite durchaus gangbare, wie: Schwärzlich Roth, Röthlich Grau, Graublau, Blaugrau gegenüberstehen. Noch bezeichnender sind vielleicht solche Ausdrücke, wie Matt Roth, Matt Gelb, Schwach Gelb u. dergl., die wohl ursprünglich den Fällen äußerer Absorption, z. B. durch den Nebel, entnommen, aber dann unbedenklich für Farbentöne selbst angewandt sind.

Sprachlich sind für diesen Fall überhaupt folgende Bezeichnungen vorhanden: Schwärzlich Roth, Weißlich Roth, Schwärzlich Blau, Weißlich Blau, Schwach Roth, Schwach Gelb, Matt Roth, Blassroth, Röthlich, Gelblich, Schwach Röthlich, Schwach Gelblich und allgemein: Fahl oder falb. Im Griechischen: μελάγχλωρον, λευκέρουθρον, λευκόχλωρον, ἔγχλωρον, ὑπέξανθον, ὑπόχλωρον, ὑποπόλιον, ὑποπέλιον, ἐπίξανθον, ἐπιπόρφυρον, welche ihrer Endwirkung wegen zum Theil bereits früher angeführt wurden. Im Lateinischen: e nigro rufum, ferner rufum sulbalbicans, subcaeruleum, sufflavum, helvolum, rubicundulum, ravum, pallidum, pallum.

Nebenbei bemerkt sei noch, dass »mattscharz«, wie das englische »deadblack«, bezeichnender Weise doppelsinnig sein kann, und zwar: 1) ein schwaches oder als »deadblack« ein sehr tiefes Schwarz bezeichnet, 2) aber ein Schwarz, welches geringe, oder gar keine Mitwirkung von Glanz hat. Der letztere Fall gab denn auch die Zusammensetzungen: mattbronze, mattgold, mattsilber an die Hand.

3. Allgemeine Aufgaben der Untersuchung.

Bei der Aufsuchung der causalen Beziehungen zwischen Farbenton, Farbengrad, Helligkeitsgrad bieten sich die folgenden Abhängigkeiten dar: 1) Die eigenthümliche Vertheilung dieser drei Factoren innerhalb des durch Sonne, Acetylenlicht oder Bogenlicht erzeugten Diffractions- oder Dispersionsspectrums. 2) Der Wechsel dieser Verhältnisse in Folge des Wechsels der Erleuchtungsstärke. 3) Der Wechsel dieser Verhältnisse in Folge des Contrastes, der, wie sich zeigen wird, bei Spectralfarben überaus stark ist. 4) Die Veränderungen der Farben durch Synthese. 5) Die Einflüsse der Dauer der Reizung. 6) Die Verschiedenheit der bisher genannten Verhältnisse in den centralen und peripheren Regionen der Netzhaut.

Bei der starken Verwicklung, welche die drei Factoren: Farbenton F , Farbengrad G , Helligkeitsgrad H bieten, handelt es sich nun für die Untersuchung ihrer Beziehungen zu einander, sodann auch ihrer Beziehungen zu den physikalischen Factoren: Schwingungszahl Z und Erleuchtungsstärke J , um eine möglichste Isolirung jener psychischen Factoren. Da jedoch eine vollständige Elimination der einzelnen undenkbar ist, so kann es sich nur handeln um eine Untersuchung: 1) bei Constanterhaltung eines oder zweier dieser Factoren, 2) bei quantitativ messbarer Steigerung derselben, und zwar jedesmal möglichst durch das ganze, gerade angewandte Spectrum hindurch.

Man hat hiernach (gesetzt, dass man unter F, G, H einen gegebenen, und unter F', G', H' einen davon abweichenden Farbenton, Farbengrad, Helligkeitsgrad versteht) in der Weise zu verfahren, dass man durch das ganze Spectrum hindurch jedesmal je zwei gleichartige Combinationen aus diesen sechs gegebenen Elementen für die Untersuchung und Vergleichung hinsichtlich der Abwägung der Möglichkeiten herausucht. Die Auswahl wird im besonderen unter zugleich erfolgender physikalischer Bestimmung von Z und J zu geschehen haben. Man erhält auf diese Weise die folgenden Fälle der Vergleichung:

Reihe 1: FGH und $F'GH$		Reihe 4: FGH und $F'G'H$
» 2: FGH und $FG'H$		» 5: FGH und $F'GH'$
» 3: FGH und FGH'		» 6: FGH und $FG'H'$
Reihe 7: FGH und $F'G'H'$		

Hiermit sind alle denkbaren Möglichkeiten erschöpft, von der eventuell bereits implicite vorhandenen Synthese abgesehen; die letztere aber kann zunächst völlig außer Betracht bleiben. Die in dieser Tabelle gegebene Reihenfolge (Reihe 1—7) zeigt zugleich die zunehmende psychologische Complicirtheit, während die experimentelle Herstellungsschwierigkeit gerade die entgegengesetzte Reihenfolge darbietet. Theoretisch unmittelbar verwertbar sind dabei zuerst nur diejenigen Fälle, in denen lediglich Farbenton, Farbengrad, Helligkeitsgrad allein verschieden sind, also die Fälle 1, 2, 3. Dieselben können nun, da man noch keine Bekanntheit der gegebenen Verhältnisse des Spectrums voraussetzen darf, nach einer genügenden Feststellung der letzteren 1) experimentell aus den Fällen 4, 5, 6 und 2) interpolatorisch aus den Fällen 7 gewonnen werden. Voraussetzung ist dabei, dass für das ganze Spectrum eine genügende Feststellung der Reihe für F, F' u. s. w., G, G' u. s. w., H, H' u. s. w. nach psychophysischen Methoden stattgefunden hat. Gerade die Fälle 4—7 fallen ja mit den Bedingungen des unmittelbar gegebenen Spectrums im allgemeinen zusammen und sind zunächst aus diesem Grunde auch als Ausgangspunkte der Untersuchung zu nehmen.

Sodann sind die Fälle der Steigerung jedes der überhaupt einer Steigerung fähigen Factoren zu untersuchen. Hier können in Betracht kommen: G und H , und vom Standpunkte der physikalischen Betrachtung aus J . Diejenigen Fälle sind auszuschneiden und mit einander zu vergleichen, bei denen die Größen G und H Multipla ihrer psychologischen Werthe darstellen, also: FGH und $F3GH$, FGH und $F2GH$, FGH und $F\frac{1}{2}GH$, FGH und $F\frac{1}{3}GH$ u. s. w. In gleicher Weise: FGH und $FG3H$, FGH und $FG2H$, FGH und $FG\frac{1}{2}H$, FGH und $FG\frac{1}{3}H$ u. s. w. Dieselben stellen selbstverständlich nur empirische Stufen und keine absoluten Vielfache dar. Sie können in beliebig kleinen Maßeinheiten genommen werden, was wegen der Begrenztheit der Grade von G und H innerhalb des gegebenen Spectrums von Vortheil ist. Die Herabsetzung der äußeren Intensität der Lichtquelle, als $3J, 2J, J, \frac{1}{2}J$ u. s. w., geschieht in einwandfreier Weise durch Anwendung des Episkotisters. Die Ergebnisse derselben sind ebenfalls auf die Reihen F, F' u. s. w., G, G' u. s. w., H, H' u. s. w. zu beziehen, und daher wiederum die Fälle $FGH, FG'H, FG'H'$ u. s. w. ihrem Werthe gemäß zu berücksichtigen.

Die Synthese (auch Mischung genannt) hat ebenfalls F , G , H festzustellen, und sich möglichst auf die Fälle FGH , $FG'H$, FGH' u. s. w. zu beziehen. Sie hat sich daher möglichst in derselben Richtung, wie in den vorigen Fällen, zu bewegen. Es haben hier nämlich ganz entsprechend in Betracht zu kommen: 1) Das Auftreten je einer Qualität und nur je einer psychischen Intensität bei jeder der zur Synthese gelangenden Farben: dieser Fall ist jedoch wahrscheinlich nur bei den achromatischen Empfindungen verwirklicht. 2) Die Synthese zweier psychischer Intensitäten bei gleicher Qualität, soweit dies überhaupt zu verwirklichen ist, also als: FGH und $FG'H$, FGH und FGH' . 3) Die Synthese zweier Qualitäten bei gleicher oder multipler Intensität bzw. Intensitäten: FGH und $F'GH$, FGH und $F'2GH$, FGH und $F'G2H$. 4) Diejenige mehrerer Qualitäten bei gleicher psychischer Intensität: FGH , $F'GH$, $F''GH$, und bei multipler psychischer Intensität: FGH , $F2GH$, $F3GH$ oder FGH , $FG2H$, $FG3H$, soweit dies überhaupt möglich ist. 5) Diejenige mehrerer Qualitäten bei verschiedener psychischer Intensität: FGH , $FG2H$, $F'GH$, ferner FGH , $F2GH$, $F'G2H$, ferner FGH , $F'2GH$, $FG\frac{1}{2}H$, ferner FGH , $F'3GH$, $F''GH$ u. s. w. Es hat dies natürlich jedesmal unter vorheriger und nachheriger Bestimmung von G und H zu geschehen. Außerdem ist noch möglich, hierbei die äußere Intensität zu ändern. Wichtig ist jedesmal die genaueste Feststellung des Thatbestandes vor und nach der Synthese.

Diese Fälle erschöpfen die Combinationen, die am Spectrum überhaupt möglich sind, und wenn irgendwo, so liegt hier der Aufschluss zu einem Verständniss der Verhältnisse, die bereits das gegebene Spectrum ohne Isolirung und Aenderung bietet. Directes Experiment, rechnerische Vergleichung und Erwägung der Möglichkeiten gegenüber dem thatsächlichen Vorkommen müssen sich dabei in zweckmäßiger Weise ergänzen. Vorzeitige Folgerungen sind dadurch, dass die Untersuchung bereits zu Anfang fast die vollständige Anzahl der thatsächlich vorhandenen Verschiedenheiten bietet, und durch das Verlegen der bei durchgreifender Behandlung am schwierigsten zu bewältigenden Synthese an den Schluss der Versuche, bei genügender Vorsicht der Beobachtungen und einer genügenden Anzahl derselben, ziemlich ausgeschlossen, oder doch im Verlaufe der

Versuche selbst und durch zweckmäßige Nachprüfungen unmittelbarer Berichtigung fähig.

Für diese Untersuchung sind natürlich Spectralfarben zu nehmen, da nur diese die zureichende Isolirung der Schwingungszahlen bieten, während bereits Gelatinefarben eine Synthese von Schwingungszahlen geben, deren Auswahl zwischen 24 und 63 $\mu\mu$ Wellenlängendifferenz schwankt. Insbesondere sind die Spectralfarben des objectiven Spectrums gegenüber denjenigen des subjectiven vorzuziehen, einmal wegen der bedeutenden, bei ihm ohne Beeinträchtigung der Schärfe herstellbaren Größe des Spectrums, das die denkbar beste Isolirung der gebrauchten Schwingungszahlen ermöglicht, sodann auch wegen der großen räumlichen Ausdehnung der Versuchsanordnung, welche die Anwendung mannigfacher äußerer Hilfsapparate und Hilfsanordnungen gestattet, unter denen in erster Linie die Aubert'schen Episkotister als einwandfreieste Mittel zur Veränderung der Intensität zu nennen sind. Die subjectiven Spectren dagegen würden eine Anwendung derselben schwierig machen. Sie sind daher auf Spaltveränderung und polarisirende Prismen mit ihren Ungenauigkeiten und Ungleichmäßigkeiten angewiesen, um sämtliche Stufen von *H* zu erreichen. Auch sind hier die Refractionsverhältnisse gerade bei Untersuchung der geringeren Stufen von *G* und *H* nicht ganz einwandfrei, wenn es sich um eine Vergleichung derselben handeln soll, wie sich später zeigen wird. Wenn somit das objective Spectrum möglichst günstiger Verhältnisse, insbesondere größte Entfaltung der *F*, *G*, *H* und größter Spielraum für dieselben, vorzuziehen ist, so ist dasselbe zuvor einer kurzen Erörterung zu unterziehen, insbesondere für den Fall günstigster Intensität, der, wie sich später zeigen wird, eine ziemlich hohe Intensität, wenn auch nicht die höchste erreichbare darstellt.

4. Das objective Spectrum günstigster Verhältnisse.

Gegenüber der an sich sehr durchsichtigen Versuchsaufgabe bietet nun das objective Spectrum einer gewissen, z. B. einer höheren oder der höchsten Erleuchtungsstärke die folgenden Verhältnisse dar. Anstatt sämtliche Farbentöne in gleichmäßigem Umfange, soweit das überhaupt möglich ist, in gleicher Anzahl und gleichem Auf-

und Abstieg der Uebergänge zu enthalten, bietet es dieselben vielmehr 1) nicht in gleichmäßigem Umfange, 2) nicht in sämtlichen Uebergängen, wie z. B. die Vergleichung mit den durch Spectren anderer Erleuchtungsstärke gegebenen Farbentönen zeigt, und ebenso 3) nicht in durchaus gleichmäßigen Uebergängen, wie die Vergleichung der einzelnen Bezirke unter einander erkennen lässt.

Dasselbe gilt nun für die Farbengrade und Helligkeitsgrade des Spectrums, wobei die Vergleichung mit den Spectren etwas geringerer Erleuchtungsstärke lehrreich ist, da hier die Verhältnisse theilweise an sich günstiger liegen.

Gerade diesen Ungleichheiten gegenüber ist eine Auflösung leicht zu erwarten. Dieselbe ist erforderlich in der Form von Einzelfeststellungen von F , G , H selbst hinsichtlich ihrer Verhältnisse, um dann die nothwendigen Vergleichungen vornehmen und auf Grund derselben den Sachverhalt psychologisch auf einfachere Verhältnisse reduciren zu können. Hierbei kann nun nicht nur die ebenmerkliche Identität und Verschiedenheit und die strenge mittlere Abstufung mit Zuhilfenahme jener, sondern selbst die übermerkliche Verschiedenheit schon von nicht zu vernachlässigendem Nutzen sein, um die Verhältnisse nach allen Richtungen einander gegenüberzustellen, und so eine allseitige Prüfung zu ermöglichen, insbesondere gegenüber den immerhin doch schwer vollständig auszuschließenden Schwankungen der drei Variablen in Folge etwaiger Aenderungen der Intensität, die sich leicht bei einer Zusammenstellung der Versuche zeigt.

Hätte man die ganze Fülle möglicher Farbentöne vor sich und sollte hier Feststellungen treffen, so würde sich dieses in der Hauptsache nur durch Anwendung exacter Maßmethoden vollziehen lassen, indem man z. B. durch die Methode der Minimaländerung bestimmte, wie viel Stufen für F , wie viele für G , wie viele für H zunächst für die vollständigen und gleichmäßigen Uebergänge zweier ziemlich verschiedener Farben vorliegen, und die Ergebnisse mit einander vergleicht. Dasselbe würde dann für eine weitere Reihe gelten, und so fort. Schon bei diesen Ergebnissen würde sich das Verhältniss von F zu G und H bemerklich machen, und sich so etwas über ihre causalen Beziehungen aussagen lassen. Die Anwendung freilich der Methode der mittleren Abstufungen würde wegen der Vielheit der möglichen Ausgangspunkte gerade für F bei der Zusammenstellung

der Ergebnisse besondere Schwierigkeiten bieten. Die beiden Fehlermethoden sind zwar anwendbar, kosten aber in diesem Falle zu viel Zeit. Jedenfalls wird, wie z. B. schon die Anordnung einer nicht gar zu geringen Anzahl von Wollproben, farbigen Pulvern u. s. w. nach *F*, *G* und *H* zeigt, die übermerklich vor sich gehende Anordnung nothwendig zu einer Feststellung eben merklicher Identitäten und Verschiedenheiten oder mittlerer Abstufungen bis herunter zu den kleinsten, überhaupt nur feststellbaren Distanzen.

Bei den Farbentönen, Farbengraden und Helligkeitsgraden des Spectrums liegen die Verhältnisse anders. Da hier die *F*, *G*, *H* für jede dieser drei Variablen 1) nicht in gleichem Umfange, 2) nicht in sämmtlichen Uebergängen, 3) nicht in durchaus gleichmäßigen Uebergängen geboten sind, so ist die Uebersicht eine leichtere, insofern die Auswahl für jede der drei Variablen eine beschränkte wird, wie bereits die Vergleichung gegenüber Spectren anderer Erleuchtungsstärke zeigt.

Hiernach sind nun folgende Methoden als zweckmäßiger Beginn der Untersuchung für das Spectrum günstigster Erleuchtungsstärke der Anwendung werth: A. Zur Feststellung der Farbentonverhältnisse: 1) Die Feststellung der subjectiven Identitäten und der übermerklichen Verschiedenheiten als Abgrenzung von Farbentongruppen, 2) die Anwendung der Methode der Minimaländerungen, 3) die Anwendung der Methode der mittleren Abstufungen, die jedoch in Anbetracht der hervorgehobenen Schwierigkeiten nur als Nachprüfung zu verwenden ist. B. Für die Farbengradverhältnisse: 1) Die Anwendung der Methode der Minimaländerungen, 2) die Anwendung der Methode der mittleren Abstufungen, welche hier keine solche Schwierigkeiten mit sich führt, da man innerhalb des höchsten und geringsten gegebenen Farbengrades nur immer stetig in der Richtung fortzuschreiten hat, und da man die höchsten und geringsten Farbengrade anderer Spectren durch Vergleichung in ihrem Verhältniss zu denjenigen der Spectren bereits untersuchter Erleuchtungsstärken selbst sicher zu bestimmen im Stande ist. C. Für die Helligkeitsgradverhältnisse sind dieselben Methoden wie für die Farbengradverhältnisse anzuwenden, und man kann dann zu den Reductionen auf einfachere Verhältnisse und zur Untersuchung der Synthese übergehen, die erst nach Erledigung dieser Feststellungen mit vollem Ver-

ständniß und genauer Uebersicht des Thatbestandes vorgenommen werden kann.

Wie sich jedoch voraussehen läßt, sind die Ergebnisse dieser Einzeluntersuchungen nicht ohne weiteres zu vergleichen und auf einander zu beziehen. Die Verhältnisse der Umgebung, der Contrast, die räumlichen und zeitlichen Verhältnisse der Netzhautreizung, die Adaptationsgröße u. s. w. machen sich, wie auch sonst im optischen Gebiet, so hier trotz aller besonderen Vorsichtsmaßregeln, die sich irgend anwenden lassen, geltend, ja können zum Theil überhaupt gar nicht völlig ausgeschlossen werden. Selbst wenn sie einzeln ihrem möglichen Einflusse nach auf die hier vorliegenden Verhältnisse bestimmt werden, so kommt dann immer noch ihr Zusammenwirken unter den verschiedenen Umständen und zum mindesten als Combination ihrer verschiedenen Möglichkeiten in Betracht und erschwert so die Uebersicht der vorhandenen Gesetzmäßigkeiten.

II. Versuchsanordnung und Technik der Versuche.

Diese Untersuchungen wurden, ausgehend zunächst von *F*, im April 1892 im psychologischen Laboratorium der Universität Leipzig begonnen und seitdem, mit Ausnahme im wesentlichen der Wintermonate, fast ununterbrochen daselbst fortgesetzt. Zunächst wurde nur Sonnenlicht höchster Erleuchtungsstärke benutzt, und deshalb auch lediglich in den Stunden des höchsten Standes der Sonne mit ihrer größeren Constanz (12—3 bezw. 4 Uhr) gearbeitet: es ist dies wichtig, da nicht nur die Erleuchtungsstärke im Laufe des Tages, sondern auch die Empfindlichkeit des Auges im allgemeinen einen regelmäßigen Gang der Veränderung aufweist. Im späteren Verlauf der Versuche kam auch Bogenlicht zur Anwendung, um nicht auch in minder wesentlichen Punkten von der Sonne abhängig zu sein, und um dessen dauernde Constanz auszunutzen. Hiernach war die in der Regel angewandte Versuchsanordnung die folgende:

Das directe Sonnenlicht wird durch einen Heliostaten mit zwei Spiegeln zu dem 3 m von ihm entfernten äußeren lichtzuführenden Spalt (S_1 der übrigens nur schematische Distanzen zeigenden Fig. 1) des nach Süden zu gelegenen Dunkelzimmers geleitet. Hinter diesem

Spalte, welcher 12 cm hoch ist, befindet sich noch ein zweiter, genau gleicher (S_2), welcher nach der Anordnung Wollaston's die divergenten Randstrahlen abblendet und es ermöglicht, die Schärfe des Spectrums bedeutend zu erhöhen. Hierauf gehen die Strahlen durch ein Flintglasprisma (P) von 16 cm Höhe, 5,7 cm Breite und einem brechenden Winkel von 60° , sodann zu einer achromatischen biconvexen Linse (L_1), von 11 cm Apertur und 55 cm Brennweite, sodann zu dem eigentlichen spectrometrischen Apparate. Dieser ist bei geschlossenen Spalten vollständig lichtdicht, und erhält seine verticale Stellung durch zwei feste eiserne Träger, die auf einem feststehenden und durch Anschrauben unbeweglich gemachten Tische von Brusthöhe festgeschraubt werden. An den Trägern befinden sich

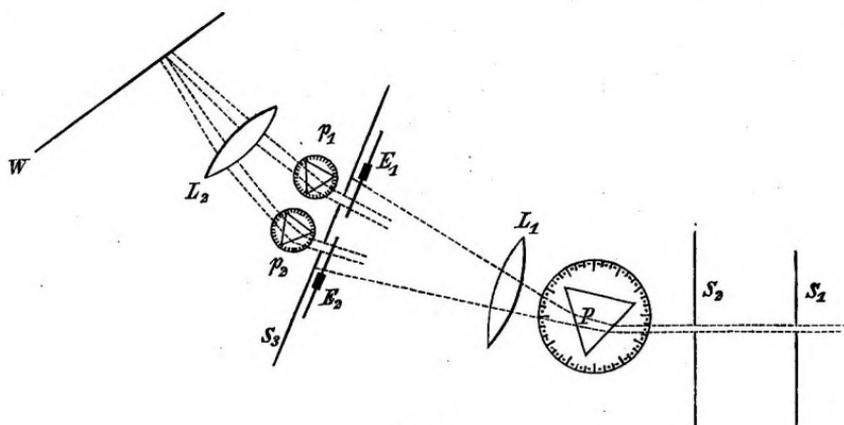


Fig. 1.

zwei starke eiserne Muffen, die in beliebiger Stellung durch Schrauben fixirbar sind und in sich zwei massive und unter sich verbundene horizontale Stahlstangen tragen. Die obere dieser Stahlstangen wird durch entsprechende umgreifende Hülsen an den verticalen Trägern in fester Stellung gehalten. Die untere Stahlstange trägt den eigentlichen spectrometrischen Apparat. Die obere sichert dessen lothrechte Stellung und trägt außerdem den zur Messung der Spaltverschiebungen erforderlichen Maßstab, wie aus Fig. 2 ersichtlich ist. Die besonderen Verhältnisse des spectrometrischen Apparates zeigt auf seiner der Dispersionspyramide des Prismas zugekehrten Seite ebenfalls Fig. 2. Durch Fassungen, welche die beiden Stahlstangen umgreifen, kann der Apparat längs der Stahlstangen horizontal als Ganzes bewegt,

und mittelst einer leicht handhabbaren Schraube in jeglicher Stellung fixirt werden. Der untere oder die unteren Spalte (S_3, S_4 der Fig. 2) können ferner mikrometrisch gegenüber dem oberen oder den oberen (S_1, S_2) ebenfalls horizontal verschoben werden. Es versteht sich von selbst, dass, wie alle anderen Gegenstände des Dunkelzimmers und seine Wände, so auch dieser Apparat und sein Tisch, mit Ausnahme der Skala und der beiden matten Stahlstangen, tief geschwärzt sind, um direct auffallendes und diffuses Licht in geringstem Maße zu reflectiren. Der Apparat besteht daher aus starkem Messing, das durch Behandlung mit salpetersaurem Silberoxyd und salpetersaurem Kupferoxyd geschwärzt wurde. Sein Halt an der unteren Stahl-

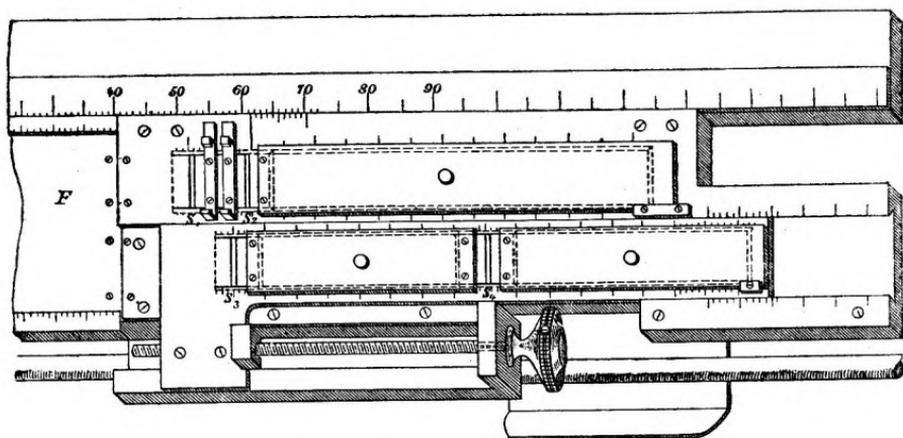


Fig. 2.

stange ist ein Schlitten aus Messing (s. Fig. 2), an dem der feste Theil des kleinen Apparates selbst mittelst Schrauben befestigt ist, so dass er, durch die cylindrischen umgreifenden Fassungen auf der Rückseite gehalten, längs der Stahlstangen im ganzen verschiebbar ist. Sein unterer Theil ist in erster Linie an dem in dem Schlitten verschiebbaren Messingklotz durch Schrauben befestigt, und durch Drehung der Mikrometerschraube verschiebbar.

Durch Verschiebung des ganzen Spaltapparates können somit die zwei oberen Spalte, und ebenso die zwei unteren zusammen durch das Spectrum hin bewegt werden, während die zwei unteren außerdem jede relative Verschiebung gegenüber den oberen erfahren können, wenn die letzteren bereits fixirt sind. Im ganzen werden 4

bezw. 5 Spalte angewandt, um auch Synthesen unter Vergleichung ihrer Ergebnisse herstellen zu können, während für bloße Vergleichungs- und Messungsversuche zwei, nämlich je ein Spalt oben und unten, genügen.

Beabsichtigt man nun, zwei verschiedene Schwingungszahlen in Bezug auf F oder G oder H zu vergleichen, so stellt man z. B. den Spalt S_1 auf eine bestimmte Schwingungszahl, z. B. $760 \mu\mu$, fest ein, indem man den Schlitten und den ganzen Apparat durch Anziehen einer starken, leicht handhabbaren Schraube fixirt, die sich hinter der cylindrischen Führung befindet und daher aus Fig. 2 nicht ersichtlich ist. Dann dreht man den Kopf der Mikrometerschraube und verschiebt dadurch den Spalt S_3 . Hierauf liest man die Stellung: 1) des festen Spaltes an dem Maßstab, 2) des verschiebbaren Spaltes, und zwar zunächst an der (in Fig. 2 ersichtlichen rechts befindlichen) Skalenthailung ab, welche zugleich die Führung für den verschiebbaren Theil des Apparates bildet. Die Bruchtheile werden 3) auf der Eintheilung des Kopfes der Mikrometerschraube abgelesen. Die Anzahl der ganzen Umdrehungen wird dadurch bestimmt, dass man die Vorübergänge des an ihrem Nullpunkte befindlichen (auch in der Figur ersichtlichen) Einschnittes zählt, um dann nach Erreichen der Ruhelage weiterhin Bruchtheile abzulesen. Man hat so die Entfernung des Spaltes S_3 gegenüber S_1 genau bestimmt, bei welcher z. B. die zu ermittelnde Gleichheit oder Verschiedenheit für F , G oder H stattfindet. Unter steter Ablesung kann man so den Spalt 3 bezw. 4 durch das ganze Spectrum hin bewegen. Statt der Spalte 1 und 3 kann man übrigens auch die Spalte 2 und 3 oder 2 und 4 nehmen, und es ist dies sogar nothwendig, da die Spindel der Mikrometerschraube nicht lang genug ist, damit der verschiebbare Spalt durch das ganze Spectrum hindurchzugehen vermag. In ähnlicher Weise kann man dem Spalt 3 eine beliebige Mittelstellung zu den Spalten 1 und 2 geben, und so die Methode der mittleren Abstufungen für F , G oder H anwenden. Den durch Spalt 1 gehenden Farbenstrahl kann man ferner, um Synthesen herzustellen, mit dem durch Spalt 2 gehenden mittelst kleiner Prismen p_3 und p_4 (Fig. 1) vereinigen, welche hinter den spectrometrischen Apparat gestellt werden, und das Ergebniss in Bezug auf F , G und H mit denen beliebiger, durch Spalt 3 gehender Farbenstrahlen vergleichen.

Nachdem nun die Farbenstrahlen durch die Spalte hindurchgegangen sind, treffen sie auf den hinter denselben befindlichen Projectionsschirm, der aus möglichst rein weißem Papier (ohne Magnesiumoxydüberzug) besteht, und auf dem schwarzen Untergrunde einer verticalen Holzplatte aufgezogen ist. Nach links von demselben sitzt der Beobachter. Um diesen Projectionsschirm vor dem durch Prisma, Linse und Sonnenstäubchen reflectirten Lichte möglichst zu schützen, wurde vor dem eisernen Gestell des Apparates ein auf seinen beiden Seiten tiefschwarzer Pappschirm, von 55 cm Höhe und 61 cm Breite, mittelst herübergestreifter Oesen befestigt, sodass nur durch eine Oeffnung desselben, in der Höhe der Spalte, die Spalte des Spectralapparates selbst den Farbenstrahlen zugänglich waren. Um zugleich den Reagenten vor dem seitlich in seine Pupille einfallenden Lichte zu schützen, wurde an dem tiefschwarzen Abblendungsschirm noch ein zweiter, von 55 cm Höhe und 44 cm Breite, in rechtem Winkel angebracht, und konnte mittelst Charniere lichtdicht gegen den ersteren in dem passenden Winkel eingestellt werden. Auf diese Weise wurde nicht nur die Fläche des Projectionsschirms, sondern auch Auge und Gesicht des Beobachters auf der ganzen rechten Seite völlig im Dunklen gehalten, sodass schließlich nur die den untersuchten Bildern eigenen Helligkeitsgrade und Farbengrade die Adaptation bestimmen konnten, und keinerlei Mischung mit Licht, soweit als dies überhaupt erreichbar ist, vorhanden war.

Die Breite des Sonnenspectrums auf dem innerhalb der horizontalen Dispersionsebene absichtlich etwas quer gestellten Projectionsschirm (siehe hierüber später) betrug 11,56 cm; die allenfalls brauchbare Höhe 10 cm. Da der oberste und unterste Theil der Höhe wegen der Krümmung der Linse L_1 unbrauchbar ist, so wurden hiervon nur die genau die Mitte darstellenden 4,1 cm benutzt. Die Höhe des Spaltapparates ist im ganzen, unter Abrechnung des die Silberscala tragenden Theils, 9,5 cm; die Breite (in Fig. 2 aus Raumrücksichten verkürzt) 40 cm; die Höhe jedes oberen Spaltes 18 mm; die Höhe jedes unteren ebenfalls 18 mm. Zwischen ihnen liegt ein für die Stabilität und sichere Führung erforderlicher Zwischenraum von 5 mm. Als Breite der Spalte des Apparats wurde durchweg 0,4 mm genommen, ausgenommen bei Anwendung der allergeringsten Lichtstärke, bei welcher ausnahmsweise eine Breite von 0,5 mm der

Deutlichkeit und Sicherheit der Beurtheilung wegen nothwendig war. In Folge der Projection nach Durchtritt der Strahlen durch den Spalt und der damit verbundenen Ausbreitung erhöhen sich diese Maße auf 0,52 oder 0,65 mm Breite und 23 mm Höhe und einen Zwischenraum von 6,5 mm für die farbigen Spaltbilder, doch kann dieses für die Präcision der Ausscheidung von keinem Einfluss sein. Die Innenflächen jedes Spaltes sind, um Brechung und Reflexion zu vermeiden, in einem Winkel von 20° zur Ebene der Vorderseite innen abgeschrägt. Auch sind sie eben deshalb in einem Winkel von 50° nach oben und unten zu an ihrer Innenfläche abgeschrägt, was zugleich den verschiebbaren Einsätzen die erforderliche sichere Führung gewährt. Der untere verschiebbare Theil des ganzen Apparates bewegt sich der sicheren Führung wegen in sogenannter Schwalbenschwanzführung, wie die rechte Seite der Fig. 2 zeigt. Die Peripherie der Mikrometerschraube, welche einen Durchmesser von 28 mm besitzt, ist in 10 Theile getheilt, innerhalb deren man wiederum die Zehntel ablesen kann, und deren erster, um die Zahl der Umdrehungen ohne Ablesung bestimmen zu können, zugleich, wie bereits bemerkt, durch starke Vertiefung an der Peripherie selbst sich vor den anderen hervorhebt. Ein Hundertstel einer ganzen Umdrehung ihres Kopfes entspricht einer linearen Verschiebung von 0,00769 mm.

Um stets dasselbe Spectrum unter durchaus gleichen Bedingungen zu haben, soweit dieses die Verschiedenheit der Erleuchtungsstärke überhaupt zulässt, welche auch bei Bogenlicht und Acetylenlicht vorhanden ist, wurde die günstigste Breite eines scharfen Spectrums erzielt und durch sorgfältige Notirung der mittleren Stellen der Fraunhofer'schen Linien *A*, *a*, *B*, *C*, *D*, *E*, *b* u. s. w. ein für alle Mal fixirt. Dies geschieht auf dem links gelegenen Theile des Apparates (Fig. 2 *F*), in welchen zu diesem Zwecke ein Papier eingeschoben wird. An dem aus der Figur ersichtlichen Maßstabe, und unter Beziehung desselben auf den festen Neusilbermaßstab geschieht dann die Ablesung. Mit Hülfe der sämtlichen Maßstäbe kann man jegliche Einstellung unter entsprechender Berechnung herstellen, nachdem der mittlere Theil des Spaltapparates an die Stelle der Vorrichtung *F* geschoben und daselbst fixirt ist. Da bei synthetischen Versuchen verschiedene Distanz der Farbenstrahlen erforderlich ist und ebenso bei der Anwendung der Methode der mittleren

Abstufungen, so geschah die Ausfüllung des durch Verschiebung der Einsätze entstehenden Zwischenraums durch einen weiteren jalousieschieberartigen Einsatz von passender Breite. Derselbe wurde mit seiner nach oben und unten hin übergreifenden Fortsetzung wiederum vollkommen lichtdicht befestigt und konnte, je nach seiner Breite, im Laufe der Versuche verschieden zusammengeschoben werden.

Die Episkotister hatten einen Durchmesser von 4,8 cm, sie wurden vor die kleinen Spalte selbst gestellt (E_1 und E_2 Fig. 1), bestanden aus Sektoren von 10° Breite, waren aus dünnem geschwärztem Messingblech gefertigt und ermöglichten durch Ueber- und Untereinanderschieben sichere Aenderungen von $\frac{1}{2}$ — 1° . Sie wurden auf ihrem Träger in dem Längsschlitz eines Bockes aus Messing, je nach Bedarf, horizontal und in einer festen cylinderartigen Führung vertical verschoben und in den gewählten Stellungen durch Anziehen leicht handhabbarer Schrauben festgehalten. Sie wurden dann entweder durch ein gut gearbeitetes Federuhrwerk oder durch einen Electromotor mittelst Uebertragung durch lange Schnurläufe in die nothwendige rasche Umdrehung versetzt. Die Episkotisterscheibe selbst und die ursprüngliche Tribscheibe sind dabei mit ihren V-förmigen Rinnen, auch der Sicherheit des Betriebes wegen, in die genau gleiche lothrechte Ebene zu stellen. Weitere Variationen der geschilderten Versuchsanordnung, die wegen der großen in ihr vorkommenden räumlichen Distanzen die vielfachsten Abänderungen ermöglicht, werden im Laufe der Versuche noch angegeben werden.

Der Beobachter saß, gegen seitlich und auf den Projectionsschirm einfallendes Licht in der bereits geschilderten Weise geschützt, in der stets gleichen Entfernung von 18 cm vor dem Projectionsschirm, die Spaltbilder direct fixirend. Der Erwartungsfehler war wegen der Vielfachheit der vorhandenen Farben, die man unmöglich in ihrer Reihenfolge und Art im Gedächtniss behalten kann, und wegen der Schwierigkeit der Beurtheilung der kleinen Spaltbilder auf dem Schirm an und für sich von verschwindender Bedeutung. Der Vorsicht wegen fand aber außerdem in den zu beurtheilenden Farben nach Möglichkeit ein Wechsel innerhalb der verschiedenen Regionen des Spectrums statt. Abweichungen hierbei ergeben sich aus der Anwendung der Methoden selbst und aus den Specialversuchen.

Die Ablesungen geschahen nach jedem Versuch mittelst einer kleinen, nur nach einer Seite offenen, bei den Versuchen selbst ganz verdeckt gehaltenen Blendlaterne mit fast weißem Glase der Oeffnung und dem ziemlich weißen Lichte des bekannten Gemisches von $\frac{2}{3}$ Brennöl und $\frac{1}{3}$ Petroleum. Die Intensität dieses Lichtes wurde durch Reguliren des Dochtes den gerade untersuchten Helligkeitsgraden möglichst gleich gemacht, im allgemeinen aber möglichst niedrig gehalten, um nicht den vorhandenen Adaptationsgrad des Beobachters bei Bewegungen desselben zu zerstören. Da der Beobachter vor diesem Lichte geschützt war, so brauchte er nicht während der Ablesung die Augen zu schließen, was manche innere Unzuträglichkeiten mit sich führen würde.

III. Vorüberlegungen und Vorsichtsmaßregeln.

1. Entwerfen des Spectrums.

Von besonderer Wichtigkeit ist es, dass die Untersuchung im vollständig verdunkelten Dunkelzimmer geschieht. Bei völliger Verdunkelung erscheint erstens eine größere Anzahl von Farbentönen mit größeren Unterschieden innerhalb derselben, als sie bei jeglicher, wenn auch noch so schwachen Erhellung auftreten. Sodann ist der Farbengrad ein bedeutend höherer, wozu außer der Abwesenheit der Mischung mit Weiß auch der Contrast mit dem schwarzen Hintergrund jedenfalls beiträgt, denn selbst das weiße Papier erscheint, wo es nicht unmittelbar beleuchtet wird, als tiefes Schwarz. Aus denselben Gründen erscheinen die Helligkeitsgrade deutlicher ausgeprägt. Die in physikalischer Hinsicht vorzüglichste Versuchsanordnung ist übrigens selbstverständlich diejenige, bei welcher die bedeutendste Anzahl der Fraunhofer'schen Linien auftritt. Sie lässt sich daher praktisch durch entsprechende Versuche ausfindig machen. Diese ergaben bei der Wahl nur eines Prismas und unter den gegebenen Verhältnissen des Dunkelzimmers, bei einer ungefähren Breite der äußeren Spalte, S_1 und S_2 , von nicht ganz 0,2 mm des ersten, und von 1 mm des zweiten, unter dem Einfluss ferner der gegebenen Dispersionsbreite des benutzten Prismas (P), und schließlich der gegebenen

Brennweite der Linse L_1 (55 cm) folgende Distanzen: 1) Entfernung des Mittelpunktes des Prismas P von dem zweiten (Wollaston'schen) äußeren Spalte: 55 cm, Entfernung des Mittelpunktes der Linse L_1 von demjenigen des Prismas P : 9 cm; 2) Entfernung des mittleren Theiles des etwas quer gestellten Spaltapparates (S_3) vom Mittelpunkte der Linse 107 cm, also 52 cm über die Brennebene hinaus, 3) Entfernung des Projectionsschirms W vom Spaltapparate: 16 cm. In dieser Stellung, die sich insbesondere auf die Querstellung des Spaltapparates und Projectionsschirms, in dem angeführten Winkel von 33° auf der horizontalen Dispersionsfläche, bezieht, traten bei höchster Erleuchtungsstärke und möglichst geringer Breite der äußeren Spalte: über 129 Fraunhofer'sche Linien ohne Anwendung subjectiver Vergrößerung auf. Bei einem nicht ganz so schmalen ersten äußeren Spalte, nämlich einer Breite von etwas über 0,2 mm: 97 Linien; bei einem noch etwas weniger schmalen, nämlich einer Breite von ungefähr 0,3 mm: 60 Linien. Diese Stellungen zeigen jedoch die folgenden Nachtheile: 1) Wegen der großen Schmalheit des ersten äußeren Spaltes weist das Spectrum eine so geringe Erleuchtungsstärke auf, dass die Höhe des F , G , H nicht unbeträchtlich herabgesetzt ist. Dieses ist, neben der Bedeutung als Störung, von psychologischer Wichtigkeit, denn es zeigt, da man sich den Einfluss der Unterbrechung durch die vielen Spectrallinien (im allgemeinen wenigstens) hinwegdenken kann, dass psychologisch homogene Farbentöne jeder Art, die sich in physikalischer Beziehung auf keinem anderen Wege exacter herstellen lassen, entweder in größerem Umfange überhaupt schon aus Anlass, wenn auch nur geringfügigster, physikalischer Synthese oder Breite der Auswahl der Schwingungen entstehen, oder aber, dass die Amplitude einen gewissen Umfang haben muss, um Farbentöne in möglichst großer Anzahl hervorzubringen, indem sie letztere gleichsam erst über die Schwelle hebt. Wahrscheinlich wirken aber die genannten Einflüsse zusammen. Auch können die Farbentöne durch Contrast über die Schwelle gehoben werden, wie man theilweise erkennt, wenn man nicht die Spaltisolirung anwendet, sondern das Spectrum auf dem weißen Papier des linken Theiles des Spaltapparates (F) oder auf dem Projectionsschirm (W) unter der Wirkung in diesem Falle des gegenseitigen Contrastes betrachtet. Auch die geringere Anzahl der Farbengrade und ihre geringere

Höhe, wenn man sie als Intensitäten betrachtet, ist verständlich, wenn man den hemmenden Einfluss des geringen Helligkeitsgrades der ersten Anordnungsweise hinzunimmt. Die geringe Anzahl der Helligkeitsgrade und ihre geringe Intensität ist ferner aus der directen Beziehung zur Amplitude verständlich, da die durchgängig niedrigere Intensität der ersten Anordnungsweise hier es auch nicht zur Entfaltung einer größeren Anzahl von Helligkeitsgraden kommen lässt. Ueber die Wechselwirkung aber, die durch alle diese Einflüsse eintritt, wird später gehandelt werden. 2) Zugleich macht sich bei der ersten Anordnungsweise die große Anzahl der Fraunhofer'schen Linien als überaus häufige und dadurch störende Unterbrechung, insbesondere nach der Isolirung durch die Spalte des Apparates, geltend. Sie beeinträchtigen, auch wenn die Unterschiedsempfindlichkeit für Helligkeitsgrade geringer ist als diejenige für Farbentöne, gleichwohl in sehr störender Weise die Reinheit der farbigen Spaltbilder in Folge der steten Aenderung von H . 3) Schließlich, jedoch am wenigsten störend, ist die große Anzahl horizontaler Staublinien bei der ersten Versuchsanordnung, in Folge der Schmalheit des Spaltes entstehend, als Folge von Ungleichheiten der Ränder oder wenigstens an den Rändern.

Da die psychologischen Rücksichten hier in erster Reihe und die physikalischen erst in zweiter maßgebend sind, so ist von der Benutzung dieses allerschärfsten Spectrums als Versuchsgrundlage, soweit es sich nicht um specielle Fälle der Schwellenbestimmung handelt, abzusehen. Es muss daher ein möglichst günstiges Compromiss zwischen den Anforderungen, welche Farbentöne, Farbengrade, Helligkeitsgrade stellen, und den physikalischen Rücksichten hergestellt werden. Dieses muss, da eine Entfernung aus der Stellung günstiger Schärfe die Erleuchtungsstärke nicht zu erhöhen im Stande ist, ohne wiederum der Breite des Spectrums zu schaden, durch möglichst geringe Verbreiterung des ersten äußeren Spaltes gewonnen werden. Es wurden hiernach als äußere Spaltbreite 0,5 mm genommen, da sich hierdurch zugleich die Anzahl der Farbentöne und Farbengrade und im allgemeinen auch der Helligkeitsgrad am günstigsten stellten. In Folge hiervon verschwanden allerdings die Fraunhofer'schen Linien theilweise, nämlich bis auf die bekannten 10, zumeist breiteren Hauptlinien, und etwa 18 schmale und matte Neben-

linien, die nun nicht wesentlich schaden konnten, aber doch ein Beweis für genügend vorhandene Schärfe waren.

Ein weiterer, sehr wichtiger Punkt ist die Erleuchtungsstärke, denn mit Aenderung derselben ändern sich auch die drei psychologischen Variablen, sei es mittelbar oder unmittelbar, was hier dahingestellt bleiben muss. Vor allem findet bei Verminderung der Erleuchtungsstärke bekanntlich ein Zusammenschrumpfen des Spectrums statt, was sich, wenn nicht berücksichtigt, namentlich für die Untersuchung der Extreme des Spectrums in unliebsamster Weise geltend machen kann. Die Messungen wurden daher, wie bereits früher bemerkt, lediglich an solchen Tagen angestellt, an denen die Sonne die höchste Erleuchtungsstärke zeigte, was natürlich nicht hindert, dass bei der großen Ausbreitung der Dispersionspyramide und in Folge weiterer noch zu erörternder Umstände das Spectrum selbst nicht das denkbar intensivste ist. Dass die höchste Erleuchtungsstärke vorhanden war, ist auch an dem größten Gegensatz zwischen dem Schwarz des Schattens beliebiger Gegenstände des Vorzimmers und dem daneben liegenden, durch Erleuchtung erzielten Helligkeitsgrad zu erkennen, indem die Halbschatten nach dem Weber-Fechner'schen Gesetz ganz verschwinden.

Die denkbar größte Sorgfalt ist dem allgemeinen und jedesmaligen Justiren des gesammten Apparates zuzuwenden. Zunächst wurde darauf geachtet, dass 1) der äußere Spalt der senkrechten Kante des Prismas genau parallel war: man erkennt dies auch an den Lichtstreifen, welche die Eintritts- und Austrittsfläche des Prismas in Folge des Durchganges des eintretenden Sonnenstrahls aufweisen. Diese Lichtstreifen haben 2) möglichst nahe der brechenden Kante des Prismas zu sein, da hierdurch die Reinheit des Spectrums nicht unwesentlich erhöht wird, 3) müssen sie genau symmetrisch zur brechenden Kante liegen, um dadurch das Minimum der Ablenkung mit seiner größten Schärfe und Reinheit zu geben. Wegen der vergrößerten Projection auf den Schirm ist dasselbe aber genauer an dem Verweilen und der nachfolgenden Umkehr der Bewegung des Spectrums bei stetiger und langsamer Drehung des Prismas und an der Zahl der Linien zu erkennen, und daher die Symmetrie zur brechenden Kante nur als Nachprüfung zu verwenden. 4) Die austretende Dispersionspyramide hat genau symmetrisch zu den Rändern

der Linse in Bezug auf alle Durchmesser hindurchzugehen, damit keine unsymmetrische Krümmung des Spectrums hervorgebracht wird, was auch leicht an dem Erleuchtungs- und Diffusionsbilde auf den Oberflächen und innerhalb der Linse zu erkennen ist. 5) Im Spaltapparate wurden zwei der benutzten Spalte zu Anfang jedesmal genau unter einander und in genau gleicher Breite eingestellt, damit dann die Fraunhofer'schen Linien genau parallel der Verbindungslinie ihrer Mitten eingestellt werden konnten, und so gleichfalls der senkrechten Prismakante bezw. dem äußeren Spalt parallel waren. 6) Die Spalte haben außerdem aus der Mitte der Spectrumshöhe ein genau symmetrisches Stück auszuschneiden, sodass oben und unten genau gleiche Stücke übrig bleiben, und nun, wie bereits bemerkt, abgeblendet werden können. Man erkennt diese einwandfreie Stellung daran, dass die durch Anwendung der Linse leicht gekrümmten Spectrallinien auf dem nach links zu befindlichen Theile des Apparates (F der Fig. 2) genau gleiche Punkte der oberen und unteren Skalentheilung schneiden, in der Mitte ein genau symmetrisches Stück übrig bleibt, und die Verbindungslinie der Skalentheile bezw. die Tangente an die Krümmung einer solchen Linie genau parallel der Mittellinie der kleinen Spalte des Apparates ist.

Die Fraunhofer'schen Linien erscheinen bei dieser Versuchsanordnung innerhalb der Dispersionspyramide des Prismas erst in einiger Entfernung von der Brennebene der Linse (entsprechend der ebenfalls etwas außerhalb des Brennpunktes gelegenen Stellung des Wollaston'schen Spaltes), und zwar erscheinen sie zuerst in geringer und erst im weiteren Verlaufe der Achse mehr und mehr in bedeutenderer Anzahl. Ersteres findet 1) wegen der hier noch vorhandenen Mischung, 2) in Folge der vorhandenen Zusammendrängung der Erleuchtungsstärke, und daher auch der Farbgrade, sodann 3) wegen der Kleinheit der Gesichtswinkel für die Spectrallinien statt. In gewisser Entfernung von der Brennebene ist nun aber ein Spielraum für die günstigste Schärfe, diese subjectiv genommen, vorhanden. Dieses führt folgende Vortheile mit sich: 1) Obgleich sich hier der Spielraum streng genommen zunächst auf die zur Achse der Dispersionspyramide senkrechte Richtung, also auch nur auf die Secante eines Kreisbogens bezieht, scheint es von geringem Belang, dass nicht für alle Dispersionsstrahlen gleichzeitig

auf das Minimum der Ablenkung eingestellt werden kann, sondern zunächst nur für die mittleren Strahlen. Hierbei ist es indessen gleichwohl nothwendig, streng auf die durchgängige Schärfe der Fraunhofer'schen Linien zu achten, um sich überhaupt innerhalb dieses günstigen Spielraumes zu bewegen. 2) Innerhalb dieses Spielraumes kann eine Querstellung des spectrometrischen Apparates und Projectionsschirmes eintreten. Hierdurch aber wird ohne einen wesentlichen Nachtheil zugleich a) die Ausdehnung des vorhandenen Dispersionsspectrums nicht unerheblich gesteigert¹⁾, und dabei werden b) insbesondere die am wenigsten brechbaren Strahlenbündel mehr auseinandergezogen und so das Dispersionsspectrum der Regelmäßigkeit des Diffractionsspectrums angenähert. Aber selbst dann bleibt, soweit dies möglich ist, immer noch ein etwas steilerer Abfall der Dispensionscurve zwischen den Linien *A* und *D* bzw. *E* zurück, wie die entsprechende graphische Darstellung zeigt. Zwischen *D* (bzw. *E*) und *G* oder gar bis *H'* hin ist der Abfall der Dispensionscurve fast eine gerade Linie und so fast demjenigen eines entsprechend großen Diffractionsspectrums gleich. Zwischen *G* und *H'* ist er nur unbedeutend geringer. Dass bei der gegebenen Wahl der Einstellung diese Vergrößerung aber der physikalischen Genauigkeit keinen Eintrag thut, ist aus der beschriebenen großen Anzahl der Fraunhofer'schen Linien zu erkennen, die ziemlich gleichmäßig innerhalb sämtlicher verticaler Streifen des Spectrums vorhanden sind. Diese also noch zurückbleibenden Verschiedenheiten gegenüber dem Normalspectrum sind für die folgenden Versuche, insbesondere für die Zahlenwerthe von Farbengrad und Helligkeitsgrad, in Berücksichtigung zu ziehen. Die Consequenzen, welche die Querstellung für die Berechnung mit sich bringt, werden später genauer erörtert werden.

Die Linse und die Episkotister vor den kleinen Spalten haben stets genau senkrecht auf der Achse der Dispersionspyramide zu stehen, wie die entsprechende Construction des Strahlenganges erkennen lässt. Die Linse hat außerdem immer in gleicher Entfernung von den beiden äußeren Spalten und dem Prisma zu stehen, die Episkotister aber dürfen nur auf einer und derselben Geraden verschoben

1) Vergleiche unten Fig. 3, welche den Maßstab $\frac{1}{2}$ darstellt.

werden, die mit dem spectrometrischen Apparate jenen Winkel von 33° bildet. Beides ist leicht durch entsprechende Markirung zu erreichen.

Von großer Wichtigkeit ist ferner die Constanz der kleinen Spalte des spectrometrischen Apparates, da hier leicht durch Aenderungen der Breite (genau wie bei Aenderung der Entfernung des Projectionsschirmes durch Aenderungen der Höhe) bedeutendere Aenderungen in den Ergebnissen eintreten. Die Gleichheit der Spaltbreiten (und ihre allein richtige symmetrische Stellung zu den Fraunhofer'schen Linien) wurde daher vor jedem Versuch durch genaueste geometrische Vergleichung und Ablesung der Breiten an den Skalen (s. Fig. 2), sowie als Nachprüfung durch Feststellung der absoluten psychologischen Gleichheit der Spaltbilder nach Farbenton, Farbengrad, Helligkeitsgrad bei genauer Untereinanderstellung der beiden bzw. drei Spalte festgestellt. Wenn die directe Vergleichung nicht möglich ist, so kann dies doch auf dem Wege geschehen, dass z. B. Spalt S_1 mit S_3 , S_3 mit S_2 und dieser wiederum mit S_4 verglichen wird. Die Schmalheit der kleinen Spalte wird dadurch beschränkt, dass bei sehr geringer Breite Abnahme der Helligkeit, durch Zurückwerfen an den Rändern, und schließlich sogar völlige Diffraction als Diffractionsspectrum homogener Art auftritt. Die minimalen Ungleichheiten der äußeren genau gearbeiteten Ränder kommen bei 0,4 mm Breite nicht mehr in Betracht.

Der todte Gang der Mikrometerschraube betrug nach ihrer fünfjährigen Benutzung hoch gerechnet 0,03 einer Umdrehung, also $\frac{1}{30}$ (0,02) mm als lineare Größe, in dem Falle, dass die Schraube keine Spur von Einölung besitzt. Zu Anfang war derselbe weit geringer. Ebenso setzt sich derselbe bei Einölung noch herab. Die etwaigen hieraus sich ergebenden höchstmöglichen und wahrscheinlichen Fehler bei Anwendung der angewandten Maßmethoden werden später genau erörtert werden.

Von Bedeutung ist schließlich die Absorption, welche durch die Schrägstellung der Heliostatenspiegel, die Staubtheilchen der Luft und das weiße Papier des Projectionsschirmes (von derjenigen durch Prisma und Linse abgesehen) ausgeübt wird, wie man schon durch Vergleichung mit dem unmittelbaren Hineinsehen in die Dispersionspyramide des Prismas in der Richtung der austretenden

Strahlen, in derselben oder anderen Entfernungen, wahrnimmt, ferner die Verringerung der Intensität in Folge der Länge des von den Strahlen zu durchlaufenden Weges. Schwarzer Sammet und Mattglas sind der hohen Absorption wegen hier für die Auffangung des Spectrums unbrauchbar, ebenso Milchglas und Barytpapier, da diese zugleich eine starke Zumischung von Glanz liefern. Möglichst reinweißes Papier von durchgängig gleichmäßiger Textur ist daher allem Uebrigen als Auffangfläche vorzuziehen, und man erhält in diesem Falle auch durch Ueberziehen mit Magnesiumoxyd keine weiteren Vortheile. Ob das Papier Unregelmäßigkeiten der Absorption besitzt, vermag, da das reinweiße Aussehen auch trügen kann, die Untersuchung durch das Polarisationsphotometer zu zeigen, wenn man einmal die directen, isolirten Dispersionsstrahlen und sodann diejenigen der durch das Papier hervorgebrachten Winkelreflexion in gleichen Entfernungen in Bezug auf die wahrgenommenen Helligkeitsgrade misst. Eine vorläufige Feststellung durch Vergleichung des unmittelbaren Spectrums ziemlich hoher Erleuchtungsstärke an einem gewöhnlichen Spectrometer und des durch Zurückwerfen oder gar Hindurchgehen durch jenes Papier hervorgebrachten Spectrums ergab, dass das Spectrum in den letzten beiden Fällen mit den directen Spectren etwas geringerer Erleuchtungsstärke ziemlich zusammenfiel.

2. Psychologische und physiologische Einflüsse.

Da die farbigen Spaltbilder eine Höhe von 23 mm, eine Breite von 0,5 mm und einen Zwischenraum von 6,5 mm zwischen sich haben, so ist selbst bei successiver Beobachtung derselben keine streng foveale Beobachtung vorhanden, vielmehr können, trotzdem subjectiv davon nichts bemerklich ist, hierbei auch die extrafovealen nächstgelegenen Netzhautpartien möglicher Weise Einfluss auf die Beurtheilung ausüben. Um jedenfalls eine Einmischung der noch mehr peripher gelegenen Netzhautpartien mit den bei ihnen auftretenden erheblichen subjectiven Aenderungen zu vermeiden, musste der Beobachter sich gewöhnen, seinen Blick bei der Beobachtung zunächst auf den untersten Theil des oberen Spaltbildes oder den obersten Theil des unteren zu richten, und dann zu dem obersten Theile des unteren, bezw. untersten Theile des oberen, mit einer ziemlich kurzen, aber

immer möglichst gleichen Zwischenpause auf dem kürzesten Wege übergehen zu lassen. So wurde ein bedeutenderer Einfluss des peripheren Sehens, der sich bei Untersuchung des eben verschwindenden Spectrums und Herstellung von Gleichungen für sehr geringe Helligkeiten am ehesten aufdrängt, so strenge als möglich vermieden. Durch die stete Succession der Beobachtungen wurde außerdem der mögliche Einfluss der Refraktionsverhältnisse des Auges ausgeschlossen, da die Zwischenzeit groß genug war, etwa erforderliche Aenderungen der Accommodation vorzunehmen. Dass die Refraktionsverhältnisse von Einfluss sind, zeigt sich nämlich: 1) an den Randerscheinungen bei Synthese mehr auseinander gelegener Schwingungen¹⁾, 2), was gerade hier in Betracht kommt, an den Schwankungen der Werthe der Helligkeitsgleichungen und Farbengradgleichungen, besonders bei sehr geringen Graden der Empfindung, wie unter verschiedenen Umständen durch eine geeignete Versuchsanordnung nachzuweisen ist, zumal wenn ein Wechsel zwischen Succession und Simultaneität eintritt. Freilich, der Einfluss einer gewissen Refraktionsgröße überhaupt ist vielleicht auch hier vorhanden gewesen, und es sind deswegen besondere Versuche erforderlich, um festzustellen, in welchem Verhältniss der Spielraum der sogen. Czermak'schen Accommodationslinien (Accommodationsbreite) zu den Refraktionsverhältnissen für Farben steht.

Als vorhandene Adaptation ist zunächst diejenige zu betrachten, die durch den jedesmaligen Farbengrad und Helligkeitsgrad und den Farbenton selbst (mit ihrem Streben nach Auslösung) gegeben waren, denn schon die vielfache Justirung (die den Versuchen vorauszugehen hatte) nahm einen Zeitraum von 25—30 Minuten vor den Versuchen in Anspruch. Am gegebenen Spectrum sind *G* und *H*, abgesehen von den beiden Enden desselben, im allgemeinen so hoch, dass die Adaptation zunächst nur eine geringe gewesen sein kann. Für die Untersuchung der Endstrecken und bei geringeren Helligkeitsgraden wird sich dieselbe entsprechend erhöht haben, da die Möglichkeit für eine (durch das Licht der Ablesung nicht wesentlich gestörte) Dunkeladaptation vorhanden war.

1) Wie bereits Maxwell bemerkte nach Phil. Trans. of the R. S. of Edinb., a. a. O. S. 290.

Der Contrast, die Nachbilder und die Mitwirkung anderer Netzhautstellen kommen einmal wegen des schwarzen Untergrundes und Hintergrundes des Projectionsschirms in Betracht, soweit dieser nicht unmittelbar durch die Spaltbilder erhellt wird, sodann in Folge des Nacheinander bezw. Nebeneinander der zwei bezw. drei farbigen Spaltbilder. Unter diesen Factoren ist der simultane und successive Contrast, wie die Vergleichung von Einzelwirkung und Zusammenwirkung erkennen lässt, am meisten von Einfluss. Derselbe kann durch Einzelversuche mit sehr rascher Verdeckung des einen der beiden Spalte und rasches Aufdecken eines vorher eingestellten dritten Spaltes, eventuell auch durch Vergleichsversuche mit längeren Zwischenräumen festgestellt werden, insofern in letzterem Falle keinerlei Nachwirkung zurückbleibt.

Der Einfluss ferner der Entfernung der zwei oder drei Spaltbilder von einander auf dem Projectionsschirm kann durch Anwendung zweier weiterer kleiner Prismen hinter den Spalten (p_1 und p_2 der Fig. 1) auf Null herabgesetzt werden. Es empfiehlt sich dieses jedoch nur in Ausnahmefällen, weil es dann schwieriger ist, die Forderung der Gleichheit der Breiten der durch die Drehung der kleinen Prismen unter einander gebrachten Spaltbilder unbedingt zu erfüllen, und weil in diesem Fall kaum ein wissentliches Versuchsverfahren eingehalten werden kann. Letzteres ist aber für die Anwendung der Methode der Minimaländerungen erforderlich, da sonst bei diesem die Einflüsse von Reproduction, Erwartung, Illusion mitspielen. Anders verhält sich dies bei der Methode der mittleren Abstufungen. Bei dieser ist es vielen Versuchspersonen zu Anfang unmöglich, sichere Urtheile bei ungleicher Entfernung der drei Reizobjecte abzugeben, wenn dieselben sich außerdem noch in verschiedener Höhe befinden. Bei Anwendung der Methode der Minimaländerungen war das Verfahren insofern wissentlich, als der Beobachter die Richtung der Aenderung des zweiten Spaltbildes aus den Verhältnissen ersehen konnte. Andererseits näherte es sich insofern dem unwissentlichen, als die Aufmerksamkeit durch die Vergleichung, insbesondere bei Abgabe des Urtheils in gleichen Zwischenräumen so absorbiert wurde, dass er auf jene Verhältnisse nur wenig achtete. Durch die Gleichheit der Einwirkungszeiten wird auch der Einfluss der Entfernung noch mehr beseitigt, ebenso derjenige der Erwartung durch den bereits

besprochenen Wechsel der Versuche über die ganze Ausdehnung des Spectrums hin.

Der Einfluss der Nachbilderscheinungen und der Ermüdung wurde durch regelmäßiges Verdecken der kleinen Spalte mit der Hand (was der Anwendung eines Schirms gleichkam) und die dadurch erreichte vollständige Verdunkelung des Projectionsschirms zu tiefem, homogenem Schwarz in gleichen Zwischenpausen möglichst verringert, zumal da unmittelbar darauf das Urtheil wieder in gleichen Pausen abgegeben wurde und der Wechsel der farbigen Bilder so weit möglich durch das ganze Spectrum hin vor sich ging.

Da die Versuchsaufgabe in Folge der Verschiedenheit der Versuchsanforderungen auch gleiche individuelle Bedingungen erfordert, um die beabsichtigte Reducirung auf die einfachsten Sachverhalte mit genügender Sicherheit vornehmen zu können, und da unter farbentüchtigen Beobachtern nicht unbeträchtliche individuelle Verschiedenheiten vorhanden sind, so wurden die Untersuchungen zunächst der Hauptsache nach an einem und demselben individuellen Farbensystem unter Anwendung aller dieser Maßnahmen der Vorsicht vollständig durchgeführt. Dieses war schon wegen der Länge der zu solcher Durchführung beanspruchten Zeit wünschenswerth. Weitere Farbensysteme wurden theils zu verschiedenen Zeiten zur Durchprüfung und Feststellung der vorhandenen Verschiedenheiten, theils für selbständige Feststellungen, soweit es irgend möglich war, hinzugezogen, und hierdurch konnte auch einigermaßen der Einfluss der individuellen Verschiedenheiten für *F*, *G*, *H* festgestellt werden.

Das so in der Hauptsache benutzte individuelle Farbensystem, dasjenige des Verfassers, ist zu den farbentüchtigen zu rechnen. Es besitzt die erforderliche vollkommene Gleichheit der Farbenwahrnehmung für beide Augen. Die Refractionsverhältnisse sind Hypometropie in der Höhe von $2,5 D (= \frac{1}{16}''$ der Correction), die Sehschärfe beträgt etwas über $\frac{1}{4}$. Da die Entfernung des Auges für diese Versuche schon der Genauigkeit wegen nur 18 cm war, so wurde zweckmäßiger Weise kein corrigirendes Glas benutzt, da die etwas bläuliche oder grünliche Farbe der Gläser die Untersuchung einseitig beeinflussen konnte.

Schließlich ist hervorzuheben, dass, da *F*, *G* und *H* im allgemeinen nicht unmittelbar hintereinander untersucht, oder ihre Verhältnisse

in dieser Weise auch nur ungefähr zu Protokoll genommen werden können, von besonderen Durchprüfungen abgesehen wurde. Jede dieser drei Variablen erforderte schon für sich allein hinreichende Aufmerksamkeit und genügende Einschulung in ihrer Richtung, so dass gerade der unmittelbare Wechsel in dieser Beziehung überaus leicht zu Irrthümern Anlass geben kann. Aus dem gleichen Grunde ist es auch nicht möglich, bei den quantitativen Untersuchungen die Farbenbezeichnung aus dem Gedächtnisse so anzugeben, dass kein Widerspruch bei unmittelbarer oder späterer Wiederholung derselben Stelle in dieser Beziehung stattfindet. Die Aufmerksamkeit wird bei den quantitativen Versuchen in anderer Richtung angewandt, als bei den Reproduktionen der Benennung, und sie wird durch den quantitativen Versuch selbst schon fast absorbirt. Dazu kommt die Relativität so mancher sprachlicher Bezeichnungen. Aus diesem Grunde ist es nicht zweckmäßig, der Benennung zu viel Aufmerksamkeit zuzuwenden. Aus jenen gelegentlichen Schwankungen der Benennung folgt aber natürlich nicht, dass auch der quantitative Sachverhalt selbst schwankend gewesen wäre. Hierüber bringen gerade die Versuche die beste Entscheidung.

IV. Berechnung der Schwingungszahlen.

1. Vorüberlegungen für die Berechnung.

Die Schwingungszahlen oder die Wellenlängen sind aus den Ablesungen an den Skalen des spectrometrischen Apparates leicht durch die zweiconstantigen Formeln von Cauchy oder Lommel für den Gang der Brechungsexponenten zu berechnen. Alle übrigen Formeln, selbst die Christoffel'sche, liefern zu lang sich ausdehnende, kaum zu bewältigende Berechnungen. Die Rechnungen sind für jede mikrometrische Einstellung zu vollziehen und nicht etwa nur für je 0,1 mm der Skala oder (wie bei König und Dieterici und Uhthoff) für je 10 $\mu\mu$ Wellenlänge, da dieses Ungenauigkeiten ergibt, die hier zunächst vermieden werden müssen. Es ist ja im allgemeinen nothwendig, dass die physikalische Genauigkeit so bedeutend sei, dass die psychologische Genauigkeit in ihren mittleren

Fehlern und mittleren Variationen als ungünstiger sich abhebend hervortritt, soweit dies natürlich feststellbar ist. Wenn nun auch jene Formeln nur von empirischer Gültigkeit sind und die physikalische Genauigkeit nur bis zu gewissen Grenzen vorhanden ist, wozu noch Abweichungen in Folge der Querstellung hinzukommen, so ist doch auf jeden Fall die möglichst genaue Berechnung vom höchsten relativen Werthe für die eingehende Vergleichung der psychologischen Resultate unter sich. Für diese kommt es erst bei ihrer letzten theoretischen Verarbeitung darauf an, dass die berechneten Schwingungszahlen auch in absoluter Beziehung richtig sind und nicht bloß die relative Constanz der Versuchsanordnung darstellen.

Die für die Berechnung brauchbaren Formeln empirischer Gültigkeit sind:

$$\text{Cauchy: } n_{GV} = A + \frac{B}{\lambda_V^2} \quad \text{oder Lommel: } n_{GV}^2 - 1 = \frac{B\lambda_V^2}{\lambda_V^2 - A}.$$

Der Index n_{GV} bedeutet die Beziehung auf Glas und Vacuum, V die Beziehung auf das Vacuum, n_{GV} ist aber $= n_{GL} \cdot n_{LV}$, wenn L die Beziehung auf Luft darstellt. λ_L ist bekanntlich $= n_{LV} \cdot \lambda_V$, wie sogleich hier angeführt sei. Die Cauchy'sche Formel wurde der zweitgenannten vorgezogen, weil sie weit zahlreichere Bestätigungen, allerdings fast ebenso viele Feststellungen der Grenzen ihrer Gültigkeit, erfahren hat. Die Lommel'sche Formel bezieht sich zwar auf die allerverschiedensten Substanzen und auch auf anomale Dispersionen. Auf beides kommt es indessen hier nicht an.

Die Bestimmung der Fraunhofer'schen Linien konnte nun nicht, wie dies wünschenswerth gewesen wäre, in ihrer gesammten Anzahl (129) erfolgen, da die Rowland'schen und Ångström'schen Abbildungen des Gitterspectrums der Sonne für diese Absicht zu viel, die Abbildungen kürzerer Spectren dagegen wiederum viel zu wenig Linien darbieten, als dass eine genügend sichere Bestimmung, auf die es hier ankommt, möglich gewesen wäre. Die Linien der Elemente zeichnen sich jedoch, abgesehen von der ohnehin bekannten Linie D , nur bei Anwendung von Bogenlicht auf einem Projectionsschirm größerer Distanz ab, und dieses bietet wiederum wesentlich andere Versuchsbedingungen oder doch kaum überwindliche Schwierigkeiten für die exacte Vergleichung. Es konnte sich hier also lediglich um die Interpolation zwischen je zwei benachbarten Haupt-

linien handeln, wie: $A, a, B, C, D, E, b, F, G, H, H'$. Ihre Distanzen waren:

A, a 3,7, a, B 4,8, B, C 5,2, C, D 9,2, D, E 20,7, E, F 13,0, F, G 31,2, G, H 25,6, H, H' 2,2 mm, zusammen 11,56 cm;

ohne Querstellung, bei mittlerer Stellung, nur:

3,4, 4,6, 4,7, 6,5, 16,5, 12,2, 26,4, 18,6, 3,4 mm, zusammen 9,63 cm.

Die Bestimmung der Brechungsindices für eine größere Anzahl Linien hätte erfolgen können, bietet aber, da sie eine Drehung des Prismas voraussetzt, nicht die genügende Sicherheit, um etwa hiernach Correcturen für die Berechnung vornehmen zu können.

Bei Senkrechtstellung des Projectionsschirmes auf der Achse der Dispersionspyramide entspricht jeder auf ihm oder dem zu ihm genau parallel gestellten Spaltapparate abgelesene Skalenthail s dem der entsprechenden Schwingungszahl zugehörigen Brechungsexponenten, abgesehen von der Umlagerung und Superposition, welche sich daraus ergibt, dass zunächst nur die mittleren Strahlenbündel ein Minimum der Ablenkung in ihrer Einstellung besitzen, entsprechend der Regel schärfster Einstellung. Dies zeigt die Verfolgung der Strahlen von der Austrittsfläche des Prismas her durch die Brennebene hindurch zu dem entsprechenden Skalenthail, wenn man sich zugleich erinnert, wie der Brechungscoefficient für die betreffende Schwingungszahl bestimmt wird. Wegen dieser Proportionalität zwischen Aenderung des Brechungsexponenten und Skalenthailänderung kann man daher auch in der Interpolationsformel einfach überall statt des aus zwei bekannten n zu interpolirenden n die betreffenden s setzen. Dabei sind aber folgende Schwierigkeiten unberücksichtigt geblieben: 1) Die Formel bezieht sich, wie zunächst alle Dispersionsformeln, auf das Vacuum und muss also anscheinend erst eine Umgestaltung für Luft erfahren, weil in dieser die Beobachtungen vor sich gehen. 2) Sind die Abweichungen, die sich aus der Einstellung zunächst nur für die mittleren Strahlen auf das Minimum des Ablenkungswinkels ergeben, möglicher Weise so wesentlich, dass sie die erörterte Berechnungsweise verbieten. 3) Die Skalen für die Ablesung stellen weder einen Kreisbogen dar noch stehen sie senkrecht auf

der Achse der Dispersionspyramide, sondern in einem Winkel von 33° bezw. $90^\circ - 33^\circ$.

Die erstgenannte Schwierigkeit ist zunächst zu erledigen. Während alle Dispersionsformeln die Relation zwischen den quadratischen Functionen n_V^2 und λ_V^2 als Endergebniss darstellen, thut dies die Cauchy'sche Formel nur auf einem gewissen Punkte ihrer Ableitung. Auf diesem ist, unter Voraussetzung gewisser Annahmen,

$$n_{GV}^2 = A + \frac{B}{\lambda_V^2} \text{ 1).}$$

In dieser Gestalt der Formel kann man noch ohne weiteres n_{GL}^2 statt n_{GV}^2 oder l_L^2 statt λ_V^2 setzen, falls es sich um Interpolation lediglich zwischen bekannten Größen handelt, oder auch allgemein beides zugleich. In ihrer Endgestalt stellt die Formel jedoch eine Relation zwischen der linearen Function n_{GV} einerseits und der quadratischen λ_V^2 andererseits dar, und hier muss eine Umgestaltung vor sich gehen, da Proportionalität nicht ohne weiteres stattfinden kann. Zu diesem Zwecke kann man 1) von einer noch früheren Stufe ihrer Ableitung ausgehen, nämlich derjenigen, auf der

sie noch die Gestalt: $V^2 = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \dots$ besitzt 2), wenn V die

Fortpflanzungsgeschwindigkeit für beliebige Medien, ausgenommen natürlich das Vacuum selbst, und λ die Wellenlänge in dem betreffenden Medium darstellt. Man gewinnt hieraus den Werth für n_{GL} entweder A) durch Auflösung dieser Gleichung für V selbst und Ausdrücken des Werthes λ durch seine Relation zu λ und V eines zweiten Mediums (und V des ersten Mediums selbst) und Multiplication des

erhaltenen Werthes $\frac{1}{V}$ des zweiten Mediums mit dem Werthe V

für das erste Medium, oder B) durch unmittelbare Division jener Gleichung durch V^2 eines zweiten Mediums und Ersatz des λ durch seine Relationen, bei entsprechender Wahl dieser zwei Medien (als V_G und V_V) und Auflösung von n_{GV} in $n_{GL} \cdot n_{LV}$. Durch derartige Umgestaltungen, die gegenüber den Ableitungen Verdet's oder Wüllner's lediglich Aenderungen für die vorliegende Absicht und kürzer als die Ableitung Cauchy's 3) selbst sind, ergibt sich:

1) Cauchy, Mémoire sur la Disp. de la Lumière. Paris 1836. S. 205 ff.

2) a. a. O. S. 61.

3) a. a. O. S. 56, 60 ff., 193 ff., 205 ff.

$$n_{GL} = \alpha'' + \frac{\beta''}{l_L^2},$$

eine Formel, die gegenüber der auf das Vacuum bezogenen ursprünglichen lediglich eine Veränderung der Constanten aufweist.

2) Dasselbe Ergebniss erhält man durch Multiplication der letzten Gestalt der Cauchy'schen Formel (als Gleichung für n_{GV}) mit $\frac{n_{VL}}{n_{VL}^2}$ in allen Gliedern der Gleichung. Man erhält nämlich:

$$n_{GL} = a'' \cdot n_{VL} + \frac{b'' \cdot n_{VL}^3}{l_L^2}.$$

Da aber n_{VL} bzw. n_{VL}^3 für zwei benachbarte Hauptlinien bekanntlich nahezu gleich ist, und demnach für ihre Distanz als Constante angesehen werden kann, so kann man setzen:

$$n_{GL} = a''' + \frac{b'''}{l_L^2}.$$

3) Als Probe auf diese Ableitungen findet man ebenso, wenn man einmal aus dieser Formel die Constanten a , b und aus ihren Werthen ein mittleres n_{GL} allgemein berechnet, und das gleiche bei der ursprünglichen unangefochtenen Formel thut, nachdem man n_{GV} durch: $n_{GL} \cdot n_{LV}$ und λ_V^2 durch: $n_{LV} \cdot \lambda_L^2$ ersetzt hat, dass sich in letzterem Falle nur die Werthe für die Constante, aber nicht der Endwerth für das mittlere n_{GL} verändert hat. Bei der zweiten der beiden Berechnungen fallen nämlich sämmtliche n_{LV} (die als n_{LV}^3 vorkommen) hinweg. Dasselbe gilt für die allgemeine oder specielle Berechnung eines mittleren l_L aus den nächstgelegenen bekannten l_L bei bekannten Skalentheilen, wiederum für beide Arten der Durchführung. Aus allem diesem geht hervor, dass die Relation n_{GL} oder $s_L = A + B l_L^{-2}$ richtig ist, und so für die Interpolation in der angegebenen Weise benutzt werden kann.

Die zweite Schwierigkeit bestand darin, dass das Prisma streng genommen nur für die mittleren Strahlenbündel auf das Minimum der Ablenkung eingestellt wurde. Erstens ist jedoch physikalisch ein gewisser Spielraum für dieses Minimum vorhanden, wie das Verweilen bei der Drehung des Prismas innerhalb eines nicht unbeträchtlichen Spielraums erkennen lässt. Zweitens ist auch subjectiv ein gewisser, noch wesentlicherer Spielraum für ein vollständig »scharfes« Spectrum

vorhanden, wie sowohl die große Anzahl der überhaupt auftretenden Linien zeigt, die sich als 129 oder noch etwas mehr bei verschiedenen Stellungen beobachten lassen, als auch die Constanz von *F*, *G*, *H* innerhalb des Spielraums dieser Stellungen in paralleler Aufstellung. Würden dieser streng physikalische Factor und dieser mehr psychologische nicht zusammenwirken, so müsste man ja überhaupt darauf verzichten, je ein scharfes Spectrum vor sich zu haben. In Wirklichkeit ist aber eine fast gleichmäßige Vertheilung der überhaupt auftretenden Linien durch alle verticalen Streifen des Spectrums hin vorhanden. Drittens findet durch die Berechnung eine Beziehung auf die benachbarten Hauptlinien statt. Die Werthe aber für deren Schwingungszahlen sind bekannt, ebenso wie sie selbst ihre feste Stelle haben. Aus allen diesen Gründen kann der in Frage stehende Umstand keine besonders starke Fehlerquelle bilden. Drehungen des Prismas, entsprechend dem Wechsel der Auswahl der Schwingungszahlen, bei der Untersuchung dürfen jedenfalls wegen der leicht dabei eintretenden Verschiedenheiten der Einstellung nicht als Versuchsgrundlage genommen werden, sondern sind lediglich zur Durchprüfung der Verhältnisse zu gebrauchen. In Betracht kommen können demnach vor allem nur die Superpositionen, die daraus entstehen, dass in Folge der benutzten Breite des ersten äußeren Spaltes nicht das hier erörterte Spectrum von 129 Linien verwendet wurde. Doch ergibt dieses wegen der Beziehung auf die benachbarten Hauptlinien gerade für die Berechnung keine Schwierigkeiten.

Was schließlich die Querstellung des Spaltapparates betrifft, so wurde sie angewandt, um 1) den vorhandenen Spielraum für das scharfe Spectrum seiner Größe nach voll auszunutzen, da dieses wiederum die größte Schmalheit der kleinen Spalte und dadurch die größte psychologische Breite der Strahlen ermöglicht, wenn auch streng genommen dadurch andererseits eine gewisse physikalische, jedoch, wie erörtert, psychologisch nicht wesentliche Superposition eintritt; und 2) um das objective Dispersionsspectrum den normalen Verhältnissen der Diffractionsspectren in Bezug auf die Vertheilung der Schwingungszahlen möglichst anzunähern. Die hierdurch erhaltenen unmittelbaren psychologischen Vortheile gehen freilich durch die hieraus entstehenden Schwierigkeiten für die absolute, zum Theil sogar für die relative Berechnung der Verhältnisse verloren, so dass

sich hier noch kein abschließendes Urtheil darüber gewinnen lässt. Die Cauchy'sche Formel gilt nämlich für alle möglichen in der Praxis vorkommenden Dispersionsbreiten, für die Brechungscoefficienten, also auch angenähert für etwa in Gruppen ein Minimum der Ablenkung bildende Strahlen, und demnach ebenfalls angenähert für die Strahlen $A, a, B, C, D, E, F, G, H, H'$ der senkrechten Stellungen AH' bis $A'O$ der Fig. 3, wenn diese den objectiv und subjectiv zulässigen Spielraum für das scharfe Spectrum darstellen. Vor

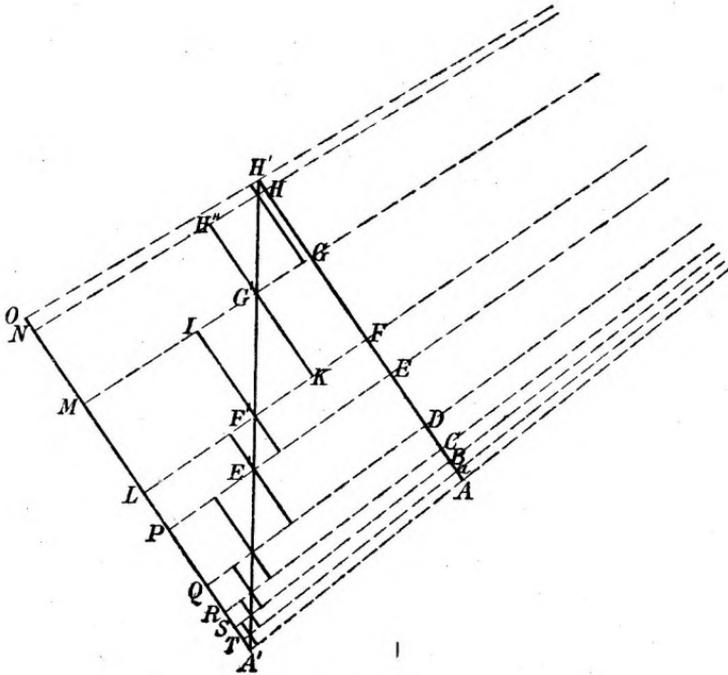


Fig. 3.

allem kann hier nur ein Unterschied der Intensität in diesem Spielraum vorhanden sein. Die Cauchy'sche Formel ist in Folge ihrer Gültigkeit für verschiedene Dispersionsbreiten, und sodann auch wegen ihrer mathematischen Regelmäßigkeit also ebenso für die Distanz GF der Figur gültig, wie für die etwas breitere $G'K$, oder IF' , oder ML , und ebenso in den übrigen Fällen, sofern eben nur genügende Schärfe vorhanden ist. Die Querstellung $G'F'$ stellt aber dann die Diagonale in dem Parallelogramm $G'KIF'$ dar. Dasselbe

thun die übrigen Distanzen als Querstellungen $G'H'$, $F'E'$, $E'D'$, $D'C'$ u. s. w. in den entsprechenden übrigen Paralleltrapezen. Denkt man sich nun die Distanz GF oder IF' , für welche in dieser Weise die Interpolationsformel gilt, in ihre Skaleneinheiten der Ablesung zerlegt, als welche z. B. lediglich drei, der Einfachheit halber, angenommen werden sollen, AA' , $A'A''$, $A''A'''$ und CC' , $C'C''$, $C''C'''$ der Fig. 4, welche ein solches, aber symmetrisches Paralleltrapez darstellt, so wird diese Diagonale, AC''' , durch den divergenten Gang der Strahlen ebenfalls in entsprechende Skaleneinheiten zerlegt, AD , DD' , $D'C'''$, welche dann aber in ihren Breiten nicht mehr gleich sind. Vielmehr sind die nach den brechbareren Strahlen zu gelegenen, z. B. AD , etwas breiter, die nach den weniger brechbaren Strahlen zu gelegenen, z. B. $D'C'''$, bedeutend breiter als die Skaleneinheiten der Stellung CC''' , wenn man diese als maßgebend ansehen will.

Denkt man sich die ersten Theilungen vervielfacht, wie dies ja auch in der Wirklichkeit nicht unbeträchtlich der Fall ist, so wird die Differenz natürlich geringer sein als hier in der Figur. Nimmt man umgekehrt die Skaleneinheiten der Querstellung, als

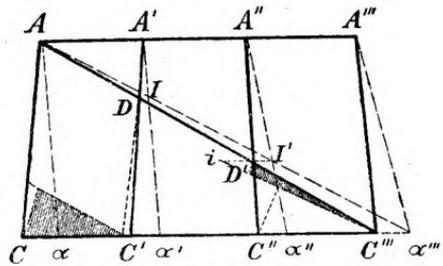


Fig. 4.

der in gleiche Theile eingetheilten Diagonale, z. B. in Zehntelmillimeter oder gar Tausendstelmmillimeter, wie dieses durch die Anwendung der Mikrometerschraube geschieht, zum Ausgangspunkte, so werden die nach der Interpolationsformel berechneten weniger brechbaren Wellenlängen wiederum eine bedeutendere Vergrößerung als die nach den brechbareren Strahlen zu gelegenen Wellenlängenwerthe besitzen, wo auch immer die strengste Stellung des scharfen Spectrums liegen mag. Dies zeigt die Construction der entsprechenden Parallelogramme und Dreiecke, wie z. B. das nach links liegende schraffierte gleichschenklige Dreieck in Fig. 4, oder auch die einfache Ausmessung in bedeutend vergrößertem Maßstabe. Die nothwendigen Correctionen erhält man durch Aufstellung der entsprechenden Proportionalitäten, z. B. wenn AD und CC' Längen darstellen, welche in Skaleneinheiten der Querstellung in vergrößertem Maßstabe, etwa

in mm, gemessen sind, und wenn a die CC' entsprechenden $\mu\mu$ darstellt, durch: $\frac{AD}{CC'} = \frac{x}{a}$. Liegt das kritische Paralleltrapez nicht genau symmetrisch, sondern z. B. nach den weniger brechbaren Strahlen hin schräge, wie z. B. das Paralleltrapez $AA'' \alpha\alpha''$, so wird sich, gleiche Breite und Höhe vorausgesetzt, bis zu einer bestimmten Grenze hin die Ueberschätzung der nach den weniger brechbaren Strahlen gelegenen berechneten Werthe der Querstellung vermindern, und überhaupt mit der Schrägheit der Lage, mit der Höhe und mit der Breite allgemein variiren. Sie wird sich bei den in Wirklichkeit vorliegenden Verhältnissen vermehren: 1) mit zunehmender Schrägheit jedesmal insbesondere des ersten Strahles der in Betracht kommenden Distanzen, von A aus gerechnet, in Folge der schrägeren Lage der betreffenden Theilschnitte der Diagonale. 2) Mit abnehmender Höhe der kritischen Paralleltrapeze, wiederum als Folge der schrägeren Lage des Theilschnittes. 3) Mit wachsender Breite der kritischen Paralleltrapeze, a) an sich, b) weil dadurch der Einfluss der Divergenz vermehrt wird. 4) In den Bezirken A bis D oder E mit der Annäherung an A , Gleichheit der übrigen Umstände vorausgesetzt, in Folge des schnelleren Abstiegs der Dispersionscurve bei diesen Distanzen, da sich hier bei Auflösung der obigen Gleichung für x der Nenner rascher als der Zähler vermehrt, also auch die Zahl der in Betracht kommenden (x) $\mu\mu$ mehr wächst, als innerhalb anderer Distanzen entsprechender Theilung. Dagegen wird sich die rechnerische Ueberschätzung, Gleichheit der übrigen Umstände vorausgesetzt, bei den brechbareren Distanzen mit der Annäherung derselben nach H' hin vermindern, wie ebenfalls die Betrachtung der für x aufgelösten Gleichung lehrt. Dazu kommt hier, dass bei $F'G'$ und $G'H'$, ebenso wie bei $D'E'$, die größten Höhen und außerdem noch eine geringe Divergenz, oder gar wie bei $G'H''$ und $H''H'$ die für die ersten Theilschnitte günstigsten Richtungen derselben vorhanden sind. Nach allem diesem kann man erwarten, dass die rechnerische Ueberschätzung der Anfangswerthe nach jedes Mal der ersten der Fraunhofer'schen Hauptlinien sich besonders in der weniger brechbaren Hälfte des Spectrums, bis F' hin, geltend machen wird, abgesehen von dem durch seine Höhe hervorragenden DE . Der rechnerischen Ueberschätzung in der ersten Hälfte jeder Distanz wird

weiter eine rechnerische Unterschätzung in der zweiten entsprechen, da schließlich doch die ganze Summe der $\mu\mu$ herauskommen muss.

Dies zeigen auch die durch Benutzung der Cauchy'schen Formel in der früher erörterten Weise vollzogenen Berechnungen, denn gerade hier muss sich die Ungleichheit des Fortschrittes der Wellenlängenwerthe gegenüber dem Fortschritt der Skalentheile bemerklich machen. Ordnet man nun die Wellenlängenwerthe durch das ganze Spectrum hin für gleiche Distanzen der Skalenwerthe der Ablesung, z. B. je 0,1 mm, von je 2 zu 2 mm der Skala, so zeigen die Differenzen je zweier, als 0,1 mm unmittelbar aufeinander folgender Werthe, welche also den Fortschritt der $\mu\mu$, auf Grund der Berechnung, zeigen, eine zunehmende Abnahme der $\mu\mu$ von A bis H' hin, von etwa 1,200 bis 0,100 $\mu\mu$ reichend, entsprechend dem Abfall der Diffractionscurve oder Dispersionscurve. Dieselbe wird unterbrochen gleich nach den Linien B, C, E , ganz wie die obigen Erörterungen erwarten ließen. So entspricht, wenn man dies weiterhin verfolgt, $C + 0,0$ bis $C + 0,1$ gerechnet: 0,854 $\mu\mu$; das vorhergehende $B + 5,1$ bis 5,2 (also C) dagegen nur 0,547 $\mu\mu$. Ferner entspricht $E + 0,0$ bis 0,1 : 0,356 $\mu\mu$; dagegen $D + 20,6$ bis 20,7 (E) nur 0,256 $\mu\mu$. Schließlich $B + 0,0$ bis 0,1 : 0,625 $\mu\mu$; dagegen $a + 4,7$ bis 4,8 (B) nur 0,610 $\mu\mu$. Im Uebrigen ist, soweit die zahlreich berechneten Werthe reichen, durchgängige Continuität vorhanden, wie auch die Differenzen wiederum zwischen den Differenzen der Werthe von je 0,1 mm Distanz zeigen. Ungünstigsten Falls beträgt hiernach der Fehler 0,307 $\mu\mu$ ¹⁾, der außerdem noch in zwei Theile a) die Ueberschätzung nach C, E, B und b) die Unterschätzung vor denselben, also innerhalb B, D, C , zerfällt. Daher kann selbst bei dieser Querstellung nach einfacher Anwendung der Interpolationsformel eine Vergleichung mit den Zahlenwerthen anderweitiger Beobachtungen und anderer Beobachter ohne weiteres stattfinden, zumal da diese meist die etwas abweichenden Werthe älterer physikalischer Beobachtungen für die Hauptlinien zur Grundlage ihrer Berechnung genommen haben, wodurch theilweise eine Gegenwirkung stattfindet.

Durch die entsprechende, vorher angedeutete Umrechnung der abgelesenen Skalentheile der Querstellung unmittelbar in diejenigen

1) Dies wird sich auch für Linie a zeigen, was nicht zu übersehen ist.

der Senkrechtstellung, also unter Vorausberechnung derselben als Distanzen der Senkrechtstellung, können von vornherein auch absolute Werthe erhalten werden. Hierbei sind jedoch überhaupt Ungenauigkeiten bis zu einer gewissen Decimalstelle gerade für Δr weniger vermeidlich, und daher könnten die so erhaltenen Resultate, z. B. für $\frac{\Delta r}{r}$, welches für $\mu\mu$ als Einheit einen sehr empfindlichen Werth darstellt, zu Bedenken Anlass geben. Diese Ungenauigkeiten fallen jedoch fast hinweg, sobald es sich, wie in dem angeführten Falle überall, um sehr benachbarte, z. B. um 0,03 mm von einander entfernte einfach berechnete Werthe handelt, und aus ihnen, wie bei der Methode der Minimaländerungen, dann in dreifacher Weise das Mittel genommen wird. Ferner kommen bei der Division $\frac{\Delta r}{r}$ die ersten Decimalstellen von r selbst kaum mehr in Betracht. Daher wurde jene Vorausberechnung nicht als Grundlage genommen. Die genauere Tabelle für die später anzuwendenden Correctionen, um auch für r selbst absolut richtige Werthe zu erhalten, wird später gegeben, und dabei die Größe der etwaigen Fehler unter zahlenmäßiger Durchführung durch die verschiedenartigen Berechnungen erörtert werden, um die Schwierigkeiten für die weiteren Fortschritte aus dem Wege zu räumen.

2. Genauere Berechnung.

Als Wellenlängenwerthe für die Hauptlinien kann man diejenigen von Rowland¹⁾, oder Müller und Kempf, oder Kurlbaum nehmen, welche sämmtlich an Gitterspectren der Sonne erhalten wurden. Die Wellenlängenwerthe Rowland's sind jedoch deswegen vorzuziehen, weil die übrigen sich nur auf die mittleren Regionen des Spectrums beziehen, obgleich andererseits und mit Recht von Lummer ein, allerdings nur relativer, Einwand gegen die Beziehung der Rowland'schen Werthe auf D gemacht worden ist. Alle älteren Werthe stehen jedenfalls schon an günstigen Umständen für die Genauigkeit

1) Philos. Magazine. Reihe 5. Bd. 23. 1887. S. 259, 262 ff. Americ. Journal of Science. Bd. 33. 1887. S. 182 ff. Astronomy and Astrophysics. Bd. 12. 1893. S. 321 ff.

zurück. Von Wichtigkeit ist nun die Frage, bis zu welcher Höhe der Genauigkeit die Berechnung durchgeführt werden soll. Die Werthe von Rowland sind nach seiner Angabe, welche keinen Einwänden unterliegt, zum mindesten bis auf $0,002 \mu\mu$ ($0,02$ Ångström'sche Einheiten)¹⁾, absolut correct, und haben einen wahrscheinlichen Fehler von $0,001 \mu\mu$ (wie übrigens auch die späteren Bestimmungen von Müller und Kempf und Kurlbaum)²⁾, also wenn z. B. $A = 759,4059 \mu\mu$ ist, bis zur dritten Decimalstelle, abgesehen etwa von 2 Einheiten derselben. Da nun Verschiebungen des beweglichen kleinen Spaltes um $0,000$ (34, 39 der Tab. IV), $0,014$ (79), $0,020$ (74), $0,026$ (40), $0,034$ (65), $0,042$ (73), $0,051$ (37), $0,059$ (46), $0,063$ (73), $0,075$ (76), $0,090$ (43), $0,094$ (76) und $0,045$, $0,086$, $0,087$, $0,095 \mu\mu$ der späteren Tabellen, von Werthen über $0,1$ abgesehen, noch theils als eben merkliche Gleichheit, theils als eben merkliche Verschiedenheit von F gegenüber dem F des feststehenden Spaltes bei einseitiger Anwendung geschätzt werden, und da gerade die Werthe für Δr bei Berechnung von $\frac{\Delta r}{r}$ maßgebend sind, so hat der Sicherheit wegen die Berechnung bis auf die zweite, oder besser noch bis auf die dritte Decimalstelle rechnerisch zuverlässig zu gehen. Denn wenn hier auch Correctionen nothwendig werden, so darf doch der Betrag der etwaigen Fehlergröße nicht fahrlässig vermehrt werden. Außerdem gelten die Zahlen auf alle Fälle, unter Anwendung siebenstelliger Logarithmen und entsprechender Proportionaltheile berechnet, dann als relative Feststellungen innerhalb der vorhandenen Versuchsanordnung und gestatten die Vergleichung für die entsprechenden Verhältnisse dieser Stellen mit den Werthen, welche bei Erledigung der übrigen Versuchsaufgaben gewonnen werden. Auch steht es frei, die Correctionen in eingehendster Weise herzustellen. Daher wurden die Rowland'schen Werthe nur auf drei Decimalstellen abgekürzt, und wo von ihm selbst die Hauptlinien als Auflösung in mehrere Linien bestimmt wurden, da

1) Philos. Magazine. Reihe 5. Bd. 27. 1889. S. 480.

2) Publicat. des Astrophysikal. Observat. zu Potsdam: 20. Bd. 5. Potsdam 1886. S. 69 f., 88. Annalen d. Phys. u. Chem. Bd. 33. 1888. S. 159 f., 404, 407 (auch Dissert. Berlin 1887). Auszüge in: Vierteljahrsschr. d. Astron. Gesellsch. Bd. 23. Leipzig 1888.

wurden die arithmetischen Mittelwerthe der $\mu\mu$ genommen und dafür die Mittelwerthe der Skalentheile eingesetzt. So wurden denn als Werthe genommen:

$$A \ 759,406, \ a \ 717,994, \ B \ 686,746, \ C \ 656,305, \ D \ 589,317, \\ E \ 527,357, \ F \ 486,150, \ G \ 430,799, \ H \ 396,862 \ \mu\mu.$$

Hierunter ist, wie hervorzuheben, der Werth a , weil ursprünglich nicht zugänglich, durch Interpolation aus der Formel berechnet, und differirt, entsprechend den früheren Ausführungen, von dem Rowland'schen Werthe um $0,3 \ \mu\mu$. Auch dieser Fall gehört also zu den erforderlichen Correctionen.

Stellen nun s_α und s_β die abgelesenen Skalentheile für je zwei unmittelbar benachbarte Hauptlinien dar, und s_x einen beliebigen zwischen beiden gelegenen Skalenteil, sei es der festen Querstellung oder als Umrechnungen auf die maßgebende Senkrechstellung auf der Achse, so sind die bekannten Relationen vorhanden:

$$s_\alpha = A + \frac{B}{L_\alpha^2}, \quad s_\beta = A + \frac{B}{L_\beta^2}, \quad s_x = A + \frac{B}{L_x^2}.$$

Hieraus ergeben sich die folgenden rechnerisch bequemsten Endwerthe der Auflösung:

$$B = (s_\beta - s_\alpha) \cdot \frac{L_\alpha^2 \cdot L_\beta^2}{L_\alpha^2 - L_\beta^2}, \quad A = s_\alpha - \frac{B}{L_\alpha^2}, \quad L_x = \sqrt{\frac{B}{s_x - A}}.$$

Bei dem ersten ist der Factor $\frac{L_\alpha^2 \cdot L_\beta^2}{L_\alpha^2 - L_\beta^2}$ rechnerisch isolirt und kann daher auch später bei der Wahl anderer Distanzen verwerthet werden. Die Werthe seines Log. sind für die Intervalle:

$$A \text{ bis } a: 6,686566934, \quad a \text{ bis } B: 6,743414272, \quad B \text{ bis } C: \\ 6,696240694, \quad C \text{ bis } D: 6,253530108, \quad D \text{ bis } E: 6,144869770, \\ E \text{ bis } F: 6,196952265, \quad F \text{ bis } G: 5,936619019, \quad G \text{ bis } H: \\ 6,017302157,$$

wozu noch zum Zwecke der etwaigen Verwerthung A bis B genannt sei: 6,413030989. Sind, wie dieses bei D , E , G der Fall war, die Hauptlinien nicht in eine erkennbare Mehrheit aufgelöst, so hat man, wie bemerkt, bei der Ablesung für s_α und s_β die Mitte der starken, unaufgelösten Linien zu nehmen. Da L_α immer größer als L_β ist, sind in der angeführten Form unbequeme Complicationen der Rechnung vermieden. Der angeführte Werth für A ist durch s_α und L_α^2

bequemer als durch s_β und L_β^2 ausgedrückt, da man s_α als Nullpunkt der Ablesung nehmen und so $= 0$ setzen, s_β aber dann als Distanzwert der folgenden Hauptlinie betrachten kann. Dieses gilt denn auch für die Gleichung für die Constante B . Die Gleichung für L_x schließlich vermeidet in der angegebenen Gestalt im wesentlichen ein leicht Versehen mit sich führendes umständlicheres Rechnen mit Minuszeichen. Sie ist dieselbe Gleichung, welche durch alle Decimalstellen hindurch dasselbe Endergebniss liefert, ob man nun Werthe nimmt, die für das Vacuum gelten würden, oder sie unmittelbar für Luft anwendet, wie dieses früher bemerkt wurde. Die Umrechnung in Schwingungszahlen (N) kann leicht, da L hier die Wellenlänge im Vacuum darstellt, aus der Relation $N = \frac{V}{L}$ geschehen, wenn V die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im leeren Raum bedeutet und man L zuvor mit den Brechungscoefficienten für das System des Auges multiplicirt hat. Für die Relation $\frac{\Delta r}{r}$ oder, wie sich später zeigen wird, $\frac{\Delta R}{R}$ ist beides jedoch nicht erforderlich.

Nach Berechnung der Werthe der Constanten A und B für die gegebenen Distanzen wurde die bisherige Zahlenrechnung durch Einsetzen des Skalenwerthes Null für s_x in die Gleichung für L_x durchgeprüft, denn es muss sich dann nach dem Obigen der Werth für die betreffenden L_x ohne Differenz in den Decimalstellen ergeben. Bei Untersuchung unmittelbar an den Hauptlinien sind Extrapolationen aus leicht durchsichtigen Gründen durch Reducirung der Skalenablesung auf die benachbarte Distanz zu umgehen, ausgenommen selbstverständlich für Stellen diesseits von A und jenseits von H , wo dieses nicht möglich ist. Bei Umrechnung der mikrometrischen Werthe in longitudinale Werthe sind je nach ihrem nun einmal vorhandenen Ausgangspunkte und dem Sinne der angewandten Drehung die entsprechenden Subtractionen oder Additionen für die Ablesungswerthe vorzunehmen und dann erst auf die anderen Skalenablesungen zu beziehen. Die kleinen Verschiebungen der Hauptlinien, die wie bei allen spectrometrischen Apparaten so auch hier zuweilen für eine oder zwei, jedoch kaum drei Linien in Folge von Temperaturänderungen sich bei der Einstellung bemerklich machten, sind, da man hier bei

der Einstellung alle Linien zugleich vor sich hat, in ihrem schädlichen Einflusse auf die Berechnung leicht dadurch zu umgehen, dass man für die betreffenden Tage die Untersuchung in den diesen Linien anliegenden Distanzen vermeidet. Würden sie sich auf die äußersten Linien beziehen, so hätte man nicht genau auf das Minimum der Ablenkung eingestellt, und dementsprechend neu einzustellen.

Die Schwierigkeit, dass trotz gleicher Spaltbreite der kleinen Spalte, z. B. 0,4 mm, dem allmählichen Abfall der Dispersionscurve entsprechend streng genommen eine verschiedene Breite der Auswahl der Schwingungszahlen auf den Projectionsschirm tritt, zumal da ihre Größe die Zahlenordnung 10^{-8} gegenüber 10^{-1} als die der Spaltbreite darstellen, lässt sich nicht in exacter Weise vermeiden. Diese Breite der Auswahl wird bei den am wenigsten brechbaren Strahlenbündeln in Folge des steileren Abfalls der Dispersionscurve zugleich mit der hieraus und der Abweichung von der Minimumstellung sich ergebenden Superposition am größten sein. Gerade hier wirkt aber die Querstellung mit ihren Folgen compensirend entgegen. Bei den am meisten brechbaren Strahlenbündeln wirkt dann wiederum der aus der Abweichung von der Minimumstellung sich etwa ergebenden Superposition der geringere Abfall der Dispersionscurve entgegen. In den mittleren Regionen des Spectrums kommt außer der hier nicht bedeutenden Verbreiterung durch die angewandte Querstellung der Einfluss des im allgemeinen geringeren G , vor allem aber derjenige des größeren H in Betracht. Entgegen wirkt hier aber, wenn auch weniger stark, der Einfluss der Irradiation, durch welchen trotz gleicher Breite der kleinen Spalte bei den mittleren Regionen eine größere subjective Breite des Spaltbildes in Folge des größeren H und deswegen jedenfalls auch eine größere subjective Auflösung der Superposition an sich eintritt. Schwerwiegend sind jedenfalls die Verschiedenheiten von G und, wenn auch in mehr continuirlicher Weise, diejenigen von H durch das Spectrum hindurch in ihrem Einfluss auf die sich ergebenden Versuchszahlen. Auch diese Erwägung zeigt wiederum, wie nothwendig die Reduction auf einfache psychologische Verhältnisse durch experimentelle und rechnerische Isolirung für die Beurtheilung der vorhandenen Verhältnisse des Spectrums überhaupt ist.

V. Untersuchung der Farbentonverhältnisse am objectiven Spectrum.

1. Die Farbentongruppen des Spectrums, festgestellt auf Grund unmittelbarer Wahrnehmung.

Schon um einen vorläufigen Ueberblick über die Farbentonverhältnisse des objectiven Spectrums von der benutzten Breite in Beziehung zu dem etwaigen Wechsel der Lichtstärke der Sonne mit seinen Einflüssen zu gewinnen, erschien es angebracht, die Ausdehnung der in Bezug auf ihren Farbenton ähnlichen Farbentonestrecken des Spectrums durch wiederholte Markirung zu bestimmen. Dass hierbei mehr Aussicht auf Erfolg ist, als sonst übermerkliche Bestimmungen insbesondere noch als Gruppierungen für F mit sich führen, wurde früher gegenüber den Verhältnissen gerade des Spectrums ausführlicher auseinandergesetzt (s. S. 494 f.). Ob aber in Wirklichkeit die Verhältnisse so günstig sind und nicht die Fäule an Farbentönen schadet, vermag nur der Versuch selbst als Reihe von wiederholten und unter sich unabhängigen Bestimmungen zu lehren. Auf jeden Fall hat man eine Reihe vorläufiger Winke für die weitere Untersuchung zu erwarten. Wenn man öfters Zweifel gegen die Genauigkeit derartiger Feststellungen ausgesprochen hat, so ist dieses zu einem guten Theil darauf zurückzuführen, dass man hierbei gar zu leicht von den Farbentonbezeichnungen der Sprache auszugehen geneigt ist. Diese sind jedoch zum Theil schon hinsichtlich der Vorstellung dessen, was sie in sich enthalten sollen, schwankend, so z. B. Orange, welches mehr röthlich oder mehr gelblich gefasst werden kann, schon deswegen, weil Spectralfarben und Pigmentfarben, wie diejenigen der Natur, etwas Verschiedenes an sich haben, und weil auch die Farbe der Orange in der Natur ziemlich bedeutend variirt, jedenfalls bedeutend genug, um den genauen Inhalt dieser Bezeichnung etwas im Unsichern zu lassen. Das aureus der lateinischen Uebersetzung Clarke's¹⁾ kann höchstens »Roth wie Gold«, aber in dem vorliegenden Falle keinesfalls, wie man vielleicht annehmen könnte, »Goldgelb« bedeuten, denn dieses ist jedenfalls wieder etwas anderes

1) Newton, Optice. Latine reddidit Clarke. Lausannae et Genevae 1740.
Wundt, Philos. Studien. XIII.

als Orange, wie denn auch Helmholtz beide scheidet¹⁾. Orange und Aureus sind übrigens auch schwer innerhalb des Spectrums abzugrenzen, wenn man gerade von der Bezeichnung ausgeht, und dies gilt nicht bloß von dieser Strecke allein. Derartige Schwankungen weist z. B. auch die Strecke auf, welche meist als Dunkelblau, etwas seltener als Indigo oder Türkischblau, wie es in der älteren Litteratur heißt, bezeichnet wird, und für die je nach der Concentration oft eher die Bezeichnung Violettblau mehr angebracht wäre, dem gegenüber dann Cyanblau oder Dunkelblau oder Indigo, welches zunächst von Pigmenten gilt, etwas Verschiedenes sind. Ebenso unterliegt die Bezeichnung Violett Schwankungen, theils entsprechend Aenderungen der Concentration, theils indem dieseble einmal auf eine Farbe mit etwas röthlichem Schimmer, sodann auf eine solche angewandt wird, die man besser als Blauviolett oder bläulich Violett bezeichnen könnte. Auch das lateinische *Violaceus* der Uebersetzung Clarke's läßt dieses, und gegenüber gerade Aenderungen der Concentration mit Recht, im Unklaren, da *Viola odorata* mehr dunkelblau ist und nur ausnahmsweise als chemisch bedingte Spielart zugleich jenen röthlichen Schimmer hat, während gar *Viola canina* überwiegend ein relativ sehr blasses Violett mit jenem röthlichen Schimmer zeigt²⁾. Auch Purpurn ist in Anbetracht der verschiedenen Verhältnisse der Synthese der betreffenden Spectralfarben keine eindeutige Bezeichnung und wird in der Sprache auf sehr verschiedene Farbentöne, von violetter bis zu röthlichem Schimmer hin angewandt, letzteres insbesondere, wenn auch nicht ausschließlich, bei dem englischen Gebrauch von Purple. Aus diesen Schwankungen der spectralen Bezeichnungen gegenüber ihrem in Wirklichkeit immerhin abgegrenzten Umfange geht aber gerade hervor, dass man, implicite genommen, über das Vorhandensein von Farbentongruppen im Spectrum einig ist und nur gegenüber dem Wechsel

1) *Physiol. Optik.* 2. Aufl. S. 278. Auch von Anderen werden beide ausdrücklich geschieden, z. B. von Castel in seiner *Optique des Couleurs*. Paris 1740 (nach Lambert).

2) So nimmt denn auch Castel (a. a. O.) folgende Gruppen im Spectrum gleichzeitig an: Blau, Violant, Agath, Violett (nach Lambert). Auf das Schwanken der Bezeichnungen im Blau weist auch Helmholtz hin, a. a. O. S. 278 f., 285. Die Benennung Blauviolett findet sich bei ihm a. a. O. S. 288.

der Intensitäten und zum Theil auch in der Abgrenzung selbst auf Grund der sprachlichen Bezeichnungen etwas im Stiche gelassen wird. Daher wird es auf alle Fälle darauf ankommen, sich hier jedesmal an die sinnenfällige Wahrnehmung selbst zu halten, und lediglich dasjenige, was man eben innerhalb des Spectrums vor sich sieht, nach etwaigen Gruppen sachlicher übermerklicher partieller Identität und Verschiedenheit zusammenzufassen, soweit es eben der unmittelbaren Wahrnehmung entspricht, unbekümmert darum, ob sich eine eindeutige sprachliche Benennung finden lässt oder nicht. Thut man dieses, so wird sich aus den Ergebnissen zeigen, wie weit hier eine individuelle Sicherheit erreichbar ist oder nicht. Es kann sich hier natürlich nur um partielle Identitäten größeren Umfanges handeln, da die Bestimmung der eben merklichen Identitäten und Verschiedenheiten Aufgabe insbesondere der Anwendung der Methode der Minimaländerungen, als Feststellung gerade der Identitäten geringsten Umfanges in irgend einer Richtung, ist.

Schon deswegen ist aber eine solche grundlegende Untersuchung werthvoll, weil es bei der zahlenmäßigen Anwendung der Methode der Minimaländerungen oder der mittleren Abstufungen nicht immer möglich ist, außer den Zahlenergebnissen auch jedes Mal die richtigen Farbenbezeichnungen zu Protokoll zu nehmen. Denn dies wird verhindert: 1) durch die Absorption der Aufmerksamkeit durch das Wahrgenommene und die dieser Methode eigenen quantitativen Beurtheilungen, wobei der jedesmalige Wechsel der Aufmerksamkeit durch ihre Richtung auf die Reproduction der sprachlichen Bezeichnungen nur stören könnte; 2) durch den auftretenden Contrast, welcher, von Farbenschnitt zu Farbenschnitt wirkend, zu wenig übersehen lässt, wie weit ursprünglich eine Gleichheit der Farbe, abgesehen von den speciellen Contrastverhältnissen vorhanden war; 3) durch die Relativität der Bezeichnungen und Reproduktionen überhaupt, da diese leicht eine Uebertreibung nach einer oder zwei oder selbst drei Richtungen mit sich führt, wenn nur zwei oder drei schmale Farbstreifen differenten Farbentons, ohne beiderseitige Fortsetzung oder ohne alle ihre Uebergänge, gegeben sind. Aber gerade aus dem ersten und dritten Grunde ist es sachlich gar nicht angebracht, sondern eher die sachliche Beurtheilung störend, wenn ein solcher Wechsel der Aufmerksamkeit eintritt, oder wenn Reproduktionen überhaupt

geschehen sollen. Daher ist es zweckmäßig, gerade diese an sich nicht unwichtige Richtung der Beurtheilung der Hauptsache nach ein für alle Mal abzutrennen.

Wenn nun auch die Abgrenzung in Gruppen schon am vollen Spectrum geschehen kann, so lässt sich doch schon hier sagen, dass derartige Feststellungen nur für die Vergleichung wichtig sind, denn es wirken hier, ohne Anwendung besonderer Vorkehrungen, wie bereits die oberflächliche Betrachtung gegenüber der Isolirung zeigt, folgende Umstände: Es heben sich Strecken von gleichem F oder G oder H , welche eine größere Ausdehnung oder ein höheres G oder selbst ein höheres H besitzen, von den Strecken der Umgebung in so starker Weise hervor, dass sie diese fast nicht zur Geltung kommen lassen. Dieses beruht theils auf Contrast, theils wohl auch auf Assimilation. Diese Factoren wirken aber nicht nur von Nachbarfarbe zu Nachbarfarbe, natürlich je nach den Umständen bald der eine, bald der andere mehr, sondern wahrscheinlich auch von den dadurch bereits veränderten Farben wieder zurück, nur dass hier durch die Gesetzmäßigkeiten selbst und durch die vorhandenen räumlichen Verhältnisse eine Grenze gesetzt ist. Auf alle Fälle wird aber hierdurch, selbst wenn man den Blick möglichst wenig wandern lässt, ein ziemlich undurchsichtiger Thatbestand geboten, da zum mindesten seitliche Einwirkungen sich geltend machen. Die Assimilation ist dabei ein bloßer associativer Vorstellungsfactor, der freilich durch das Wandern des Auges unterstützt wird, deshalb aber auch wahrscheinlich bei guter Beobachtung am ehesten zu vermeiden ist.

Die Abgrenzung hat daher zweckmäßiger zweitens durch Verschiebung exacter Abblendungsvorrichtungen zu erfolgen, welche eine von den kleinen Spalten nicht zu sehr verschiedene, aber etwas größere Höhe (24 mm) haben und, von dem Endpunkte des Spectrum ausgehend, so lange hin und her verschoben werden, bis innerhalb der Strecke, welche sie frei lassen, eine durchgängige Gleichheit für F erreicht wird. Gerade in dieser Hinsicht unterscheidet sich diese Methode von den später angewandten psychophysischen Methoden und hat ihre Vortheile wie Nachtheile. Sie ist exact zu gestalten dadurch, dass man die Methode der Minimaländerungen zur Abgrenzung der ebenmerklichen Gleichheit verwendet. Hierdurch wird der bei jener so störende Contrast der Hauptsache nach vermieden, andererseits

macht sich hier vielleicht die Assimilation als Störung des vorhandenen Thatbestandes geltend. Auf diese Weise bildet sie eine wünschenswerthe Ergänzung zur Anwendung der Methode der Minimaländerungen selbst. Der Vortheil, den sie gegenüber der Abgrenzung der Gruppen am vollen Spectrum bietet, ist ohne weiteres ersichtlich, denn sie ermöglicht a) eine größere Genauigkeit in der Abgrenzung als solcher und schließt außerdem b) den simultanen Contrast ziemlich aus. Der noch übrig bleibende successive Contrast ist jedenfalls nicht sehr bedeutend. Die Methode der Minimaländerungen wurde hier aber noch nicht streng angewandt, um nicht zu viele Gruppen bereits hier zu erhalten.

Die Abgrenzung kann drittens schließlich durch successive und gleichmäßige Verschiebung eines der isolirenden kleinen Spalte derselben Höhe und Breite wie bei den späteren Versuchen geschehen (18 mm und 0,4 mm). Die Methode der Minimaländerungen kann hier bei schwierigeren Stellen zu Hülfe genommen werden. Wird hier durchgehends gleichmäßige Geschwindigkeit der Verschiebung vorausgesetzt, wie dies zu Anfang auch nicht besser geschehen kann, so wird der Contrast mit seinen Gesetzmäßigkeiten für F , G , H in Betracht kommen, ist jedoch, weil der Hauptsache nach nur für die Grenzpunkte wirkend, von geringem Gewicht. Doch wird hier möglicherweise die verschiedene Breite der als gleich erkannten Region eben durch den Contrast auf die Bestimmung der Grenzpunkte selbst wirken. Der wesentliche Mangel ist hier, dass das Gedächtniss, und zwar verschieden je nach der Breite der Gleichheitsregion, diese als objectiv genommen, in verschiedener Weise in Mitwirkung kommt. Diesen Mängeln ist jedoch dadurch abzuhelpfen, dass sofort nach der geschehenen Feststellung eine Wiederholung oder, wenn erforderlich, mehrere Wiederholungen eintreten, in welchen das Tempo der gleichmäßigen Geschwindigkeit derart regulirt wird, dass nunmehr nur gleiche Zeiten für jede Gruppe gebraucht werden. Dann fällt der Einfluss der Ungleichheiten der Breiten hinweg. So wäre denn Methode 3 der Methode 2 vorzuziehen, wenn hier eben doch nicht die Schwierigkeit wegen Inanspruchnahme des Gedächtnisses, und daher auch die Unsicherheit der Beurtheilung etwas größer wäre.

Da hiernach jede der drei Methoden ihre eigenen Vorzüge und Mängel besitzt, sind sie am zweckmäßigsten sämmtlich für diese

Bestimmungen anzuwenden, um auch ihre Zweckmäßigkeit beurtheilen zu können. In dieser Weise wurden die folgenden 9 Reihen vom Verfasser für sein eigenes Farbensystem (und zwar zum Theil unter unmittelbarer Nachprüfung durch andere Versuchspersonen) gewonnen, wobei auf die sprachlichen Benennungen, wie bemerkt, absichtlich wenig Gewicht zu legen ist. Als Hauptsache muss eben die Abgrenzung nach dem unmittelbaren Eindrücke gelten. Die eingeklammerten Sprachbezeichnungen beziehen sich überall auf die Schwingungszahlen, zwischen denen sie stehen.

Tabelle I.

Die Gruppen gleichen Farbentons innerhalb des objectiven Spectrums der Querstellung. Farbensystem des Verfassers.

I. Höchste Intensität des Spectrums.

Reihe 1 nach Methode 2: 751,02 (schwärzlichroth) 709,78 (tiefroth) 659,51 (roth) 620,12 (orange) 593,08 (gelblichröthlich) 584,77 (röthlichgelb) 571,08 (goldgelb) 562,57 (gelb) 553,26 (grüngelb) 547,20 (gelbgrün) 533,56 (unentschiedene Mischregion) 530,69 (grün) 514,58 (Mischregion grün-grasgrün) 498,10 (grasgrün) 484,46 (blaugrün) 475,84 (grünblau) 465,03 (blau) 458,28 (violettblau) 446,27 (blauviolett) 435,32 (tiefviolett) 409,01 (schwärzlichviolett) 394,10.

Reihe 2 nach Methode 2: n (Schwingungszahl) nicht bestimmt (schwärzlichroth) 723,20 (tiefroth) 665,24 (roth) 629,73 (gelbroth) 588,61 (goldgelb) 571,08 (gelb) 553,26 (gelbgrün) 530,17 (grün) 511,28 (grasgrün) 482,36 (blaugrün) 472,47 (blau) 457,56 (tiefblau) 448,77 (violett) 435,32 (tiefviolett) 403,11 (schwärzlichviolett) n nicht best.

Reihe 3 nach Methode 2: n nicht best. (schwärzlichroth) 721,10 (tiefroth) 682,40 (Mischregion rothgelb) 630,49 (goldgelb) 579,65 (gelb) 547,49 (grün) 533,29 (grasgrün, giftgrün, tiefgrün) 513,25 (bläulichgrün) 506,45 (entschiedenes grünblau) 486,15 (blau noch grün) 473,65 (hellblau) 467,47 bezw. 468,61 bei ausnahmsweiser Nachprüfung am folgenden Tage (dunkelblau, indigo) 457,39 bezw. 455,62 bei der Nachprüfung am folgenden Tage (Mischregion blauviolett) 446,27 (tiefviolett) 409,01 (schwärzlichviolett) n nicht best.

II. Zweite Stufe der Intensität des Spectrums.

Reihe 4 nach Methode 1: n nicht best. (schwärzlichroth) 717,30 (tiefroth) 687,36 (roth) 658,50 (gelbroth, orange) 615,82 (goldgelb) 599,50 (gelb) 581,34 (grünlichgelb) 568,20 (gelblichgrün) 556,21 (hellgrün) 544,95 (grün) 525,22 (grün, etwas bläulich) 512,92 (blaugrün) 488,41 (blau) 478,66 (tiefblau) 469,95 (violett) 449,94 (tiefviolett) 430,80 (schwärzlichviolett) n nicht best.

Reihe 5 nach Methode 2 (unmittelbar nach Reihe 4): n nicht best. (schwärzlichroth) 703,81 (tiefroth) 679,95 (roth) 659,61 (gelbroth, orange, röthlichgelb) 618,67 (goldgelb) 585,11 (gelb) 579,98 (gelbgrün) 566,30 (hellgrün) 542,45 (grasgrün) 525,22 (grün, etwas bläulich) 508,36 (blaugrün bezw. tiefgrün) 493,03 (grünblau) 478,66 (dunkleres blau) 474,24 (tiefblau) 464,10 (blauviolett) 454,05 (violett) 442,37 bezw.

bei zufälliger vorübergehender höherer Erleuchtungsstärke 424,92 (tiefviolett) 433,04 bzw. bei der bemerkten höheren Erleuchtungsstärke 404,59 (schwärzlichviolett) n nicht best.

Reihe 6 nach Methode 3: n nicht best. (grauroth) 825,24 (Extrapolation) (unentschiedene Mischregion schwärzlichroth) 779,30 (schwärzlichroth) 760,62 (dunkleres tiefroth) 709,78 (unentschiedene Mischregion) 660,73 (gelblichroth) 646,26 (rothgelb, orange) 626,72 (unentschiedene Mischregion) 617,96 (goldgelb) 602,13 (gelb) 595,62 (grüngelb) 582,02 (gelbgrün und grün) 579,65 (grün, etwas bläulich) 548,34 (unentschiedene Mischregion) 514,58 (blaugrün) 491,00 (blau, etwas grünlich) 479,68 (blau) 470,72 (tiefblau) 463,17 (violett) 450,79 (tiefviolett) 436,24 (schwärzlichviolett) 423,63 (grauviolett) 408,76 (grau) n nicht best.

III. Dritte Stufe der Intensität des Spectrums.

Reihe 7 nach Methode 2 (unmittelbar nach Reihe 2): n nicht best. (schwärzlichroth) 694,18 (tiefroth) 671,01 (roth) 634,02 (orange) 615,11 (goldgelb) 593,08 (gelb) 583,73 (gelbgrün) 565,36 (grün) 543,00 (grasgrün) 511,61 (blaugrün) 493,03 (blau) 478,45 (tiefblau) 463,91 (violett) 442,85 (tiefviolett) 421,50 (schwärzlichviolett) n nicht best.

IV. Vierte Stufe (kleinste Intensität) des Spectrums.

Reihe 8 nach Methode 1 (unmittelbar nach Reihe 1): n nicht best. (schwarz) 719,03 (schwärzlichroth) 588,61 (röthlich) 544,11 (gelblich oder grünlich) 509,33 (unentschiedene Mischregion) 499,33 (bläulich) 441,57 (schwarz) n nicht best.

Reihe 9 nach Methode 2 (unmittelbar nach Reihe 7): n nicht best. (ultrarothe) 685,50 (tiefroth) 634,32 (roth) 613,01 (gelb) 589,94 (grün) 536,74 (blaugrün, wassergrün) 512,92 (blau) 483,82 (violett) 460,07 (schwärzlichviolett) 416,81 (ultraviolett) n nicht best.

Diese Zahlenwerthe, weil ohne Mikrometerschraube erhalten, sind auf die zweite Decimalstelle abgekürzt. Die Intensitätsverhältnisse und besonderen Umstände, unter denen diese Reihen gewonnen wurden, sind: Reihe 1, 2, 3 wurden bei höchster Intensität der Sonne bestimmt und zwar jedes Mal mit der erörterten Abblendungsvorrichtung (Methode 2). Reihe 4, 5, 6 wurden bei etwas geringerer Intensität der Sonne festgestellt, und zwar 4 ohne Abblendungsvorrichtung (Methode 1), 5 unmittelbar darauf mit der Abblendungsvorrichtung (Methode 2), jedoch bei derselben Intensität, die constant blieb, und so die unmittelbare Vergleichung ermöglichte. Reihe 4 zeigt daher auch gegenüber Reihe 5, entsprechend den früheren Ausführungen, dass sich Gelb und Blau gegenüber den benachbarten Strecken unentschiedeneren Farbentons hervorge drängt hatten. Reihe 6 wurde zu anderer Zeit mittelst successiver Verschiebung eines der kleinen Spalte unter Schließung der übrigen (Methode 3) festgestellt,

und zwar bei der auch in den Versuchen der folgenden Abschnitte angewandten Breite von 0,4 mm. Sie weist den früheren Ausführungen gemäß eine größere Fülle von Einzelheiten auf. Reihe 7 wurde unmittelbar nach Reihe 2 bei noch etwas geringerer Intensität der Sonne wiederum mittelst Abblendungsvorrichtung (Methode 2) gewonnen, doch zeigt sich hier die Wirkung der geringeren Intensität gegenüber den Reihen 4—6 fast nur für die Grenzpunkte von Schwärzlichroth und Schwärzlichviolett gegen den Schluss des Spectrums hin. Reihe 8 und 9 stellen Abgrenzungen bei geringster Intensität dar, durch Einstellung des Heliostatenspiegels auf das durch die Atmosphäre selbst reflectirte Sonnenlicht gewonnen (und zwar erstere nach Methode 1), die zweite unmittelbar nach Reihe 7 (nach Methode 2). Reihe 9 zeigt wiederum in Folge Abblendung eine größere Fülle von Einzelheiten als Reihe 8, trotzdem, wie die Endpunkte Tiefroth und Schwärzlichviolett erkennen lassen (gegenüber unmittelbar benachbartem Schwarz), hier noch eine etwas geringere Intensität als bei Reihe 8 vorhanden gewesen sein muss, was unmittelbar in Folge der früher erörterten Schattenwirkung (Weber-Fechner'sches Gesetz) hier natürlich nicht festzustellen möglich war. Selbstverständlich wurde für die Notirung jeder einzelnen Reihe, um die Unabhängigkeit der Reihen von einander genügend zu wahren, ein neuer Streifen Papier am Apparate aufgezogen, eine unumgängliche Vorsichtsmaßregel, die bereits Newton zum Theil angewandt hat, und auch im übrigen wurde jede Unabhängigkeit sowohl der Reihen von einander als von anderweitigen Bestimmungen gewahrt. Nur Reihe 3 wurde, mit Absicht, für dieselbe Notirung am folgenden Tage durchgeprüft und hierbei außer den zwei in Klammern beigefügten Werthen nichts zu erinnern gefunden. Die nothwendige Constanz der Sonne war bei allen Reihen durchgängig vorhanden, nur zu Ende der Reihe 5 trat, wie am Spaltbild der Prismflächen und Prismasubstanz zu erkennen war, eine vorübergehende Erhellung der sonst geringeren Erleuchtungsstärke ein und ergab, sofort benutzt, demgemäß auch die zwei in Klammern beigefügten Aenderungen. Die andauernde geringere Intensität bei Reihe 4 bis 6 ist den atmosphärischen Verhältnissen dieser Versuchstage zuzuschreiben. Reihe 7 dagegen entstand durch Benutzung einer nach Abschluss von Reihe 2 zufällig auftretenden Verdunkelung der Sonne durch verharrende leichte Cumulusbewölkung.

Nach Abschluss wiederum von Reihe 7 wurde zum Zwecke der größeren Vollständigkeit, um die Reihe der Intensitäten in ihren Extremen zu erhalten, noch Reihe 9 durch Verstellung des Heliostaten-Spiegels auf die erörterte Weise gewonnen.

Die Vergleichung dieser 9 Reihen kann am besten durch Zusammenstellung der Zahlen in ihrer arithmetischen Reihenfolge geschehen. Eine solche Uebersicht der einzelnen Gruppen gibt die Tabelle II. Sie zeigt, dass trotz der verschiedenen äußeren Verhältnisse eine kaum zu erwartende Uebereinstimmung der Zahlenwerthe stattfindet, so dass nur ein verhältnissmäßig geringer Spielraum für jede Gruppe sich geltend macht, zumal wenn man die Schwierigkeit der Feststellung mancher in Bezug auf die Zugehörigkeit schwerer festzustellender Regionen mit erwägt. Hierbei ist nochmals hervorzuheben, dass, wo es nicht anders bemerkt wurde, die Reihen zu sehr verschiedenen Zeiten, zum Theil sogar im Zwischenraum von Jahren gewonnen wurden und unter ihnen keinerlei Beziehung stattfand, abgesehen von der doppelten Feststellung von Reihe 3.

Diese Uebereinstimmung ist bei den Reihen 1, 2, 3 sachlich nicht so überraschend, da dieselben immerhin nach derselben Methode und bei gleicher äußerer Intensität gewonnen wurden. Auffallend ist vielmehr, dass auch Reihe 1, 2, 3 gegenüber Reihe 4, 5, 6, Reihe 7 gegenüber Reihe 8 und 9 fast dieselbe Uebereinstimmung der Zahlenwerthe der Gruppen, wenn auch unter großer und dieses Mal berechtigter Verschiedenheit der sprachlichen Benennungen aufweisen, die vor allem der Verringerung der Intensität und nur selten der Eigenheit der Methoden zuzuschreiben ist. So entsprechen z. B. die Bezeichnungen für Reihe 1—6: orange, gelbroth, goldgelb, röthlichgelb gleichen Zahlengruppen, oder ebenso in Reihe 1—6: blauviolett, violett, tiefviolett, und können in Anbetracht der Relativität der Bezeichnungen noch sehr wohl immerhin vorhandener Gleichheit auch der Farbtongruppen zugeschrieben werden, zumal da in dem ersteren Falle das Goldgelb der Reihe 3 bis zu demjenigen brechbareren Punkte reicht, der auch in Reihe 2 für Goldgelb festgestellt wurde, und in Reihe 5 »Goldgelb« ganz fehlt. Ebenso reicht auch in Reihe 3 das »Tiefviolett« bis zu demjenigen brechbaren Grenzpunkte, der auch in 1 und 2 für dieses F festgestellt wurde, und die Schwierigkeit, gerade diese zwei Strecken sachgemäß sprachlich

Tabelle II. Uebersicht der Werthe von Tabelle I. Farbensystem des Verfassers.
(Die eingeklammerten Zahlen bezeichnen die angewandten Methoden.)

Reihe 1 (2)	Reihe 2 (2)	Reihe 3 (2)	Reihe 4 (1)	Reihe 5 (2)	Reihe 6 (3)	Reihe 7 (2)	Reihe 8 (1)	Reihe 9 (2)
schwärzlich- roth 709,78 tiefroth —	schwärzlich- roth 723,20 tiefroth —	schwärzlich- roth 721,10 tiefroth 682,40 rothgelb: Mischung	schwärzlich- roth 717,30 tiefroth 687,36 roth (1)	schwärzlich- roth 703,81 tiefroth 679,95 roth	schwärzlich- roth 709,78 unentschieden 687,97 tiefroth und roth (3)	schwärzlich- roth 694,18 tiefroth 671,01 roth°	schwarz 719,03 schwärzlich-roth° —	ultrarothe — 685,50 tiefroth°
659,61 roth	665,24 roth	—	658,50 gelbroth, orange°	659,61 gelbroth, orange°	660,73 gelblichroth°	634,32 orange°	—	634,32 roth
620,12 orange	629,73 gelbroth	630,49 goldgelb	615,82 goldgelb	618,67 röthlichgelb	617,96 goldgelb und gelb	615,11 goldgelb	—	613,01 gelb°
593,08 gelblich- röthlich	—	—	599,50 gelb°	—	595,62 grünelb(3)	593,08 gelb°	—	—
584,77 röthlichgelb	588,61 goldgelb	—	581,34 grünelblichgelb°	585,11 gelb°	582,02 gelbgrün und grün (3)	583,73 gelbgrün°	588,61 röthlich° (1)	589,94 grün°
571,08 goldgelb	571,08 gelb	579,65 gelb	—	579,98 gelbgrün°	579,65 grün etwas bläulich (3)	—	—	—
562,57 gelb	—	—	568,20 gelblichgrün°	566,30 hellgrün°	—	565,36 grün°	—	—
553,26 grünelb	553,26 gelbgrün°	—	556,21 gelbgrün°	—	—	—	—	—

547,20 gelbgrün	—	547,49 grün	544,95 grün	542,45 grasgrün	548,34 unentschieden	543,00 grasgrün	544,11 gelblich oder grünlich (1)	536,74 blaugrün, wassergrün°
530,69 grün	530,17 grün	533,29 grasgrün	525,22 grün, etwas bläulich	525,22 grün etwas bläulich	—	—	—	—
514,58 grün + gras- grün Mischung	511,28 grasgrün	513,25 grasgrün, giftgrün	512,92 blaugrün°	508,36 blaugrün° bezw. tiefgrün	514,58 blaugrün°	511,61 blaugrün°	509,33 bläulich°	512,92 blau°
484,46 blaugrün	482,36 blaugrün	486,15 blau noch grün°	488,41 blau°	489,03 blau°	491,00 blau etwas grünlich (3)	493,03 blau°	—	483,82 violett°
475,84 grünblau	472,47 blau	473,65 hellblau	478,66 tiefblau	478,66 dunkleres blau	479,68 dunkleres blau	478,45 tiefblau	—	—
465,03 blau	—	467,47 dunkelblau, indigo	469,95 violett°	464,10 blauviolett°	463,17 violett°	463,91 violett°	—	460,07 schwärzlich- violett°
458,28 violettblau	457,56 tiefblau	457,39 blauviolett	—	454,05 violett	450,79 tiefviolett	—	—	—
446,27 blauviolett	448,77 violett	446,27 tiefviolett	449,94 tiefviolett	442,37 tiefviolett	—	442,85 tiefviolett	441,57 schwarz°	—
435,32 tiefviolett	435,32 tiefviolett	—	430,80 schwärzlich- violett°	433,04 schwärzlich- violett°	436,24 schwärzlich- violett°	—	—	—
—	—	—	—	bezw. 424,92 tiefviolett	423,63 grauviolett°	421,50 schwärzlich- violett	—	416,81 ultraviolett°
409,01 schwärzlich- violett	403,11 schwärzlich- violett	409,01 schwärzlich- violett	—	bezw. 404,59 schwärzlich- violett	408,76 grau°	—	—	—

zu benennen, machte sich bei wiederholter Anschauung der beurtheilten Strecke subjectiv bemerklich. Eine solche Unsicherheit ist dagegen in folgenden Fällen ausgeschlossen: 1) In Reihe 1 und 2, wo die Benennungen bei 584,77 und 588,61 »Röthlichgelb« bzw. »Goldgelb« sind, und es dem gegenüber in Reihe 4—7 grünlichgelb, gelbgrün und grün, gelbgrün heißt, und hierbei trotzdem die Zahlenwerthe, trotz der Unabhängigkeit der Notirungen untereinander, relativ gut übereinstimmen: 581,34, 585,11, 582,02, 583,73. 2) In Reihe 1: 562,57 »Gelb« und Reihe 4—7 dagegen: 568,20 gelblichgrün, 566,30 hellgrün, 565,36 grün. 3) Reihe 1—2: 659,61 »Roth«, 665,24 »Roth« und Reihe 4—6 dagegen: 658,50 gelbroth, orange, 659,61 gelbroth, orange, 660,73 gelblichroth. 4) Reihe 1—3: 458,28 »Violettblau«, 457,56 »Tiefblau«, 457,39 »Blauviolett (Mischung)« und Reihe 5—6 dagegen: 454,05 violett, 450,79 tiefviolett. 5) Reihe 1—2: 435,32 »Tiefviolett« und zwar beide Male, Reihe 4—6 dagegen: 430,80 schwärzlichviolett, 433,04 schwärzlichviolett, 436,24 schwärzlichviolett. 6) Reihe 1—7: 581 bis 589 »Röthlichgelb« bzw. »Gelb«, Reihe 8—9 dagegen: 588,61 röthlich, 589,94 grün, wobei die Unentschiedenheit der Farben des eben merklichen Spectrums mit in Betracht zu ziehen ist. 7) Reihe 1—7: 542 bis 548 »Gelbgrün«, »Grün« oder »Grasgrün«, Reihe 8—9 dagegen: 544,11 gelblich oder grünlich, 536,74 blaugrün oder wassergrün. 8) Reihe 1—7: 508 bis 515 »Grasgrün« bzw. »Blaugrün«, Reihe 8—9 dagegen: 509,33 bläulich, 512,92 blau, und so noch, wenn auch nicht so sicher in anderen Fällen, die in Tab. II sämmtlich durch den Index $^{\circ}$ hervorgehoben sind.

Da die so weit reichenden Uebereinstimmungen der Zahlenwerthe bei einer so großen Anzahl von Reihen und bei einem verhältnissmäßig geringen Spielraum der Werthe stattfinden, so muss hieraus entnommen werden, dass dieses wahrscheinlich nicht lediglich auf Zufall beruht, sondern dass hier bestimmte Gesetzmäßigkeiten in Bezug auf die Farbenänderung, und zwar in Beziehung zu den Schwingungszahlen, wie man übrigens auch von vornherein vermuthen kann, vorhanden sind. Die eingehendere Untersuchung, ebenfalls für die ganze Reihe der Intensitäten, geschieht freilich am zweckmäßigsten unter stufenmäßiger Aenderung der Intensität durch den Episkotister,

als $\frac{1000}{1000} J$, $\frac{950}{1000} J$, $\frac{900}{1000} J$, $\frac{850}{1000} J$ u. s. f., bei zweckmäßiger Wahl

der Einheit und theilweise bei geringeren Stufen, und, um Fehlerquellen möglichst zu vermeiden, der Hauptsache nach unter Verwendung des andauernd constant zu erhaltenden Bogenlichtes als Lichtquelle. Diese Untersuchung ist daher in ihrer weiteren Verfolgung einem späteren Abschnitte zu überweisen. Auch erhält sie erst ihren Werth, wenn auch G und H bestimmt worden sind, um dann die entsprechenden Reductionen vollziehen zu können. Auch die Vergleichung von Prismen verschiedener Dispersionsbreiten wird hier nützlich sein.

Man kann nun in zweierlei Weise verfahren, um die obigen Zahlen und die entsprechenden Benennungen nutzbar zu machen:

1) Man verbindet die Stellen gleich hoher Zahlenwerthe, sei es dass sie sich auf F oder G oder H beziehen, in den verschiedenen Reihen verschiedener Intensitäten miteinander, am bequemsten graphisch, indem man die Zahlen als Abscissentheilungen, und an den entsprechenden Stellen auch die Werthe für G und H als Zahlen auf in gleichen Abständen parallele Abscissen aufträgt und nun die Stellen gleicher Zahlenwerthe durch Gerade verbindet. 2) Man kann zugleich innerhalb der gleichartigen graphischen Darstellung die Grenzpunkte zusammengehöriger sprachlicher Benennungen für F und ebenso die dazwischen liegenden gleichen sachlichen Inhalte für G und H durch Gerade verbinden. Die in beiden Fällen entstandenen Winkelwerthe stellen das Maß der Abweichungen für die verschiedenen Reihen und außerdem insbesondere für das Verfahren 2 das Maß für die Geschwindigkeit der einzelnen Aenderungen dar.

Für die folgende Untersuchung ergibt sich aus den Versuchen, wie besonders Tabelle II zeigt, Folgendes:

1) Nur höchste äußere Intensität ist zu benutzen und ist an den früher geschilderten Merkmalen (unmittelbare Beurtheilung und Schattenprobe) in ziemlich zureichender Weise zu erkennen, zumal wenn man die Verschiedenheiten und Schwierigkeiten der hier angewandten Methoden mit in Betracht zieht. 2) Wenn im Verlauf der Versuche Aenderungen der äußeren Intensität eintreten, z. B. auch durch ungenügende Einstellung des Heliostatenspiegels, und dies an den Veränderungen des Spaltbildes als Aenderungen von F , G und H zufällig nicht erkannt worden ist, so wird sich der Einfluss dieser Aenderung insbesondere bei der Untersuchung des äußersten Roth,

des äußersten Violett und bei dem eigentlichen Gelb als Fehlerquelle geltend machen. Hier aber zeigten gerade die späteren Versuche für *F*, dass die nicht sehr breite Strecke des tiefen Roth (als Skalenablesung ohne Umrechnung in $\mu\mu$), ferner des eigentlichen Gelb und selbst des constanteren Violett, und schließlich die schon etwas nach Grau hinüberweisende Unentschiedenheit des Schwärzlichroth und Schwärzlichviolett bereits unmittelbar zureichende Reagentien für momentane Aenderungen der Intensität sind. Um aber hier Fehler noch mehr zu vermeiden, ist die Nachprüfung der Farbengruppen unmittelbar nach der Prüfung der Einstellung auf die notirten Fraunhofer'schen Linien an dem Theile *F* des Apparates (Figur 2) wünschenswerth, der danach diese Bezeichnung in doppelter Hinsicht verdient.

Weggelassen sind der bequemerem Uebersicht halber in Tabelle II gegenüber Tabelle I einige wenige Zahlen, nämlich unter 137 nur 14, unter denen 5 Feststellungen für »unentschiedene Mischregion« und 2 doppelte Feststellungen kaum abweichender Werthe sind. Dass durch diese Weglassung der Sachverhalt nicht verändert wurde, zeigt leicht eine nachprüfende Eintragung dieser Werthe in die Tabelle. Die entsprechenden Benennungen sind natürlich nicht weggelassen worden. Jedenfalls kann man gegenüber diesen relativ guten Uebereinstimmungen nicht mehr der Ansicht sein, dass die Abgrenzung von Farbengruppen innerhalb des Spectrums nicht zu sicheren Ergebnissen führe. Hierzu kommen aber noch anderweitige Uebereinstimmungen, welche man nicht hätte erwarten sollen.

Als anderweitige eigentliche Bestimmungen der Farbengrenzen, freilich nicht mit allen vorhandenen Einzelheiten, sind nämlich 1) diejenigen von Newton¹⁾, weiter berechnet zunächst von Biot und dann von Fresnel, und 2) diejenigen von Listing²⁾ anzuführen. Die Bestimmungen von Newton fanden sowohl am objectiven Spectrum als an dem Diffractionsspectrum der sog. Newton'schen (eigentlich Hooke'schen) Ringe statt, und zwar die ersteren als Bestimmungen eines Assistenten (*amicus qui interfuit der Uebersetzung Clarke's*),

1) A. a. O. Lib. I Pars 2 Prop. 3 Exp. 7; Lib. II Pars 1 Observ. 14; Pars 2. S. 90 ff., 154 ff., 169 ff.

2) Amtl. Ber. über die vierzigste Versamml. deutscher Naturf. und Aerzte. Hannover 1866. S. 92 ff. Annal. d. Phys. u. Chem. Bd. 131. 1867. S. 571 ff.

unter wiederholter Bestimmung und unter zeitweiligem Wechsel des benutzten Papiers, und auch die zweiten als wiederholte Bestimmung. Mitgetheilt wurde von ihm nur je ein Werth für jede Stelle, und zwar in bekannter Weise als Verhältniss der Zahlen auf Grund der Annahme einer Uebereinstimmung mit Tonverhältnissen, was in Ermangelung anderweitiger objectiver Messung, wie übrigens auch Rosenberger mit Recht hervorhebt, eben Newton zur Festlegung der beobachteten Verhältnisse am zweckmäßigsten erschien. Diese Zahlenverhältnisse stimmen für das benutzte objective Spectrum und für das Interferenzspectrum der Ringe nach ihm überein, und es lässt sich nicht sagen, ob diese Uebereinstimmung Newton zu der bekannten Ansicht veranlasste, die Stellung der Farben sei unter allen Verhältnissen gleich, oder ob umgekehrt jene Meinung von Einfluss auf die Beobachtung gewesen ist. Aus diesen Werthen hat Biot¹⁾ absolute (freilich für uns immerhin relative) Zahlen im Sinne der Newton'schen Lehre von den »Wechseln des leichteren Durchgehens und Zurückgehens« (fits, vices, accès, Anwandlungen) berechnet, und Fresnel²⁾ hat dieselben dann unter Nachprüfung eines der Werthe im Sinne der Undulationstheorie und für das Metersystem umgerechnet, indem er zugleich die arithmetische Mitte zwischen zwei in dieser Weise berechneten Grenzpunkten als Hauptpunkte der betreffenden Farbe ansah, ohne hierfür eine sichere Gewähr anzugeben, ob dies etwa die Ueberlegung gewesen sei, dass nach rechts und links hin die Grenzen wegen der Continuität des Ueberganges schon etwas schwierig zu bestimmen sein möchten, oder aber auch Beobachtungen. Die Abgrenzung der Farben durch Listing fand möglicher Weise, da er selbst hierüber nichts angibt, ebenfalls am objectiven Spectrum statt. Auch bei ihm sind die Werthe für die Hauptpunkte jeder Farbe lediglich Halbirungswerthe, gewonnen auf Grund der Skalentheilung, wie aus seinen Zahlen selbst hervorgeht, und die Mittheilung seiner Werthe, mit nur je einer Zahl für jede Stelle, wiederum bereits in der Mittheilung als Verhältnisse der Zahlen dargestellt, wenn auch in anderer Art als bei Newton und

1) Biot, *Physique expérimentale*. 2. Aufl. Paris 1821. Bd. 2. S. 410 ff., 446 ff. Uebers. v. Fechner, 2. Aufl. Leipzig 1829. Bd. 5. S. 29 ff., 60 ff.

2) Fresnel, *Oeuvres complètes*. Paris 1846 ff. Bd. 1. S. 245, 326, insbesondere aber Bd. 2. S. 21, 23 ff.

seinen Nachfolgern, dürfte wiederum ihre Quelle in der Speculation haben. Doch haben auch bei Listing, wie er selbst gerade gegenüber bloßen Speculationen hervorhebt, zahlreiche Bestimmungen, auch bei anderen Reagenten, stattgefunden. Diese Zahlen sind nun, gegen die Zahlen der Reihe 1 und 2 der Tabelle I und II und, wo erforderlich, auch der späteren Reihen¹⁾ gehalten, nach der Uebereinstimmung wiederum der Werthe, aber nicht nach derjenigen der sprachlichen Benennung geordnet, die folgenden, wobei die Berechnung Fresnel's auf die erste Decimalstelle vervollständigt worden ist.

Tabelle III.

Farbentongruppen zufolge anderweitiger Bestimmungen mit den zugehörigen sprachlichen Benennungen und unter Vergleichung mit Tabelle I und II, Reihe 1 und 2.

	Tiefroth	Roth	Orange	Gelblich-roth	Roth-gelblich	Goldgelb	
Reihe 1 } 709,8	659,6	620,1	593,1	584,8	571,1		
Reihe 2 } 723,2	682,4 ²⁾	629,7	—	588,6	571,1		
Listing } 723,4	683,2	614,9	—	585,6	—		
	Aeußerstes Roth	Orange ^o		Grenze			
Newton } —	644,7 ³⁾	620,4	596,0	583,4	570,9		
	Aeußerstes Roth Ende ^o	Roth	Grenze	Orange ^o	Grenze		
	und Gelb	Grüngelb	Grün	Grasgrün	Grünblau	Blau	Violett-
Reihe 1 } 553,3 ⁴⁾	530,7	514,6	484,5	475,8	458,3		
Reihe 2 } 553,3	530,2	511,3	482,4 ⁵⁾	472,5	457,6		
Listing } 559,0	534,7	512,4	491,9	473,0	455,5		
	Gelb	Grenze	Grün	Grenze	Blau	Grenze	
Newton } 551,6	532,3	512,2	492,0	475,4	458,7		
	Gelb	Grenze	Grün	Grenze	Blau	Grenze	

1) Vergleiche in dieser Beziehung die folgenden Anmerkungen.

2) Der Reihe 3; 687,4 der Reihe 4; 680,0 der Reihe 5; 688,0 der Reihe 6 u. s. w.

3) Uebereinstimmend mit 646,3 der Reihe 6 und 647,2 Listing's (s. Text).

4) Bezw. auch 562,6 als dazwischen liegend.

5) 493,0 bezw. 491,0 in Reihe 5—7.

	blau	Blauviolett°	Tiefviolett	
Reihe 1	446,3	435,3	—	409,0
Reihe 2	448,8	435,3	424,9 1)	403,1
Listing	—	439,2	424,0	409,9
		Indigo°	Grenze°	Violett°
Newton	449,0	439,3	422,8	406,2
	Indigo	Grenze	Violett	Aeußerstes Violett Ende

Die angeführten Zahlen der Reihe 1 und 2 bedürfen natürlich noch der Correction. Weggelassen sind nur zwei Werthe Listing's, nämlich: 1) 647,2 Grenze zwischen Roth und Orange, übereinstimmend mit Newton's Bestimmung 644,7, deren Werth er jedoch für das Ende des äußersten Roth setzt, und mit 646,3 der Reihe 6 Methode 3), in welcher es, mit Listing übereinstimmend, die Grenze zwischen Gelblichroth und Rothgelb (= Orange) darstellt. 2) 396,7 Listing's, Ende des äußersten Violett, übereinstimmend mit 394,1 der Reihe 1, in welcher es die Grenze zwischen Schwärzlichviolett und Grauviolett bzw. Ultraviolett (der Methode 2) darstellt. Auch diese Werthe sind also als übereinstimmend verständlich. Weggelassen wurden ferner das »Braun« und »Lavendel« Listing's als der Methode 1 angehörig. Von Newton's weniger zahlreichen Bestimmungen brauchte auch nicht einmal der besseren Uebersicht wegen eine fortgelassen werden, und dieses bestätigt zugleich mittelbar die Umrechnung Fresnel's. Die Werthe Listing's beruhen übrigens auf den Werthen Ångström's. Hervorgehoben zu werden braucht nach dem Früheren kaum, dass die Bestimmungen der Tabellen I und II unter keinerlei Beziehung zu den hier behandelten der älteren Literatur gemacht wurden, zumal da diese Bestimmungen Newton's und Listing's als Beobachtungen in einem, wie sich übrigens hieraus ergibt, unverdient schlechten Rufe stehen. Auch ließ sich nicht erwarten, dass die Zahlen, wenn auch nicht die Farben selbst, auch bei Prismen anderer Dispersion und bei dem in dem einen Falle angewandten Diffractionsspectrum die früher festgestellte Uebereinstimmung fortsetzen. Auffallend ist, wird jedoch später seine theilweise Erklärung finden, dass selbst die sonderbaren Halbierungs-

1) Der Reihe 5; 423,6 der Reihe 6.

werthe Fresnel's an diesen Uebereinstimmungen theilnehmen, was zunächst zu Bedenken Anlass geben möchte. Den früheren Ausführungen entsprechend zeigt sich bei dieser Vergleichung aber wiederum, dass die sprachlichen Benennungen verschieden ausfallen können, und dass dasselbe zum Theil für die Farbenwahrnehmung selbst gilt, je nach den Bedingungen des Spectrums. Man kann daher wohl gemäß den früheren Feststellungen dieses Abschnitts annehmen (Tabelle I oder II), dass dieselben bei Newton gegenüber Listing etwas verschieden waren, in Folge verschiedener Spaltbreite oder Dispersion, so dass dann z. B. bei 439,3 bei Newton eine Grenze war, während sich dort bei Listing auffallender Weise die Hauptstelle des Indigo befand, und umgekehrt bei 424 bzw. 423, ebenso bei 410 und 406. Auf derartige Thatsachen ist es sicherlich zurückzuführen, dass die Spectrumabbildungen der Physiker die spectralen Hauptlinien mit ihren im wesentlichen festliegenden Stellen öfters, wie bereits Listing bemerkt¹⁾, in verschiedene Farbentöne verlegen. Ueber die Bezeichnung »Braun« indessen für das am wenigsten brechbare Extrem des Spectrums, welche Listing im Anschluss an Brücke annimmt und deren Grenzen er mit abbildet²⁾, wird später der Wichtigkeit der Frage wegen eingehender gehandelt werden. An dieser Stelle sei nur bemerkt, dass es sich nur am vollen Spectrum (Methode 1) als »Braun« und höchstens noch am Spectrum von fast geringster Intensität findet, sei es als Folge von Helligkeitscontrast, wie bei den bekannten Versuchen von Helmholtz, oder als Folge von Synthese. Die Bestimmungen Listing's geschahen aber, da von ihm nichts Anderes bemerkt ist, wahrscheinlich ohne Abblendungsvorrichtung.

Den Zahlenwerthen von Tabelle III, und den zugehörigen Auseinandersetzungen entsprechend, ist diese Uebereinstimmung mit derartigen anderweitigen Bestimmungen als Bestätigung der vorhergehenden Versuche und Erörterungen anzusehen.

1) A. a. O. S. 566.

2) Nur: Amtl. Ber. u. s. w.

2. Die Unterschiedsempfindlichkeit für die Farbentöne des unmittelbar gegebenen objectiven Spectrums bei höchster äußerer Intensität.

Gründlichere Einsichten in die Farbentonverhältnisse des Spectrums werden durch die Anwendung psychophysischer Methoden geliefert, vorausgesetzt dass es gelingt, die Einflüsse des Contrastes bei ihnen zureichend zu eliminiren. Unter diesen Methoden liegt diejenige der Minimaländerungen am nächsten, denn obgleich sie sachlich unmittelbar einen weit complicirteren Thatbestand liefert als die Methode der mittleren Abstufungen, so hat sie doch, wie früher erörtert wurde, vor dieser hier eine größere Sicherheit voraus (s. S. 494). Die Methode der Minimaländerungen erfordert bei simultaner Anwendung zwei Spalte, nicht aber bei successiver Anwendung. Im ersteren Falle bietet sie allerdings der Wirkung des Contrastes für F , G , H einen breiteren Spielraum, im zweiten setzt sie, namentlich wenn man den Contrast vermeiden will, die Ermittlung des günstigsten Intervalls für die Zwischenzeit voraus, was indessen für die verschiedenen Fälle sehr schwer zu ermitteln ist und die Bekanntheit der Verhältnisse bereits fordert. Außerdem kommen hier auf jeden Fall die Gesetzmäßigkeiten der Reproduction für die einzelnen Verhältnisse mit ins Spiel. Danach ist die simultane Methode vorerst unbedingt vorzuziehen.

Die Anwendung dieser Methode geschieht nun in bekannter Weise: Einer der beiden oberen Spalte, z. B. S_2 , wird bei einer Breite von 0,4 mm auf irgend eine Schwingungszahl eingestellt, einer der unteren, z. B. S_3 , wird bei gleicher Breite so lange mikrometrisch unter Anwendung der erörterten Vorsichtsmaßregeln für den Beobachter verschoben, z. B. nach den weniger brechbaren Strahlen zu, bis der Punkt der noch eben merklichen Gleichheit für F festgestellt ist, sodann weitergehend, bis die eben merkliche Verschiedenheit ($r + \Delta r_0'$) festgestellt ist. Durch Ablesung an den betreffenden Skalen, hier auch derjenigen der Mikrometerschraube, und Notirung dieses Punktes wird der Vorsicht halber noch ein wenig über diesen Punkt hinausgegangen, und sodann nach der entgegengesetzten Richtung, bis der Punkt der eben merklichen Gleichheit ($r + \Delta r_0''$) von jenem festen Ausgangspunkte aus erreicht ist, und dann dieser Punkt wiederum notirt. Bei diesen Versuchen kommt indessen als zuweilen im

Verlaufe der Versuche störend die sehr verschiedene Schnelligkeit der Aenderung der Farbentoncurve in Betracht, und macht sich zuweilen als Unsicherheit in der Bestimmung gerade des Punktes der eben merklichen Verschiedenheit geltend, zumal da dieser, anders als der Punkt der eben merklichen Gleichheit, bei der gewöhnlichen Handhabung der Methode nur ein einziges Mal in jedem einzelnen Versuch bestimmt wird. Hierzu kommt, dass sich ein Wechsel der Ausgangsstelle, so wünschenswerth auch unbedingte Gleichheit der Intensitätsverhältnisse für benachbarte Strecken ist, doch meist nach zwei bis drei Versuchen angebracht zeigt, um der Abstumpfung, den Nachbildern und der Ermüdung vorzubeugen. Durch diesen Wechsel wird aber jener Einfluss verschiedener Schnelligkeit der Curvenänderung, wenn auch nur in geringem Maße, erhöht. Um diesen Einflüssen entgegenzuwirken, wurde in den Fällen geringster subjectiver Unsicherheit auch der Punkt der eben merklichen Verschiedenheit auf jeder Seite zwei Mal bestimmt und dadurch eine größere Sicherheit subjectiv und objectiv erreicht. Dieses geschah in solchen Fällen, indem von der Stelle absoluter Gleichheit ausgegangen, dann der Punkt der noch eben merklichen Gleichheit, dann derjenige der eben merklichen Verschiedenheit bestimmt, hierauf über diesen etwas hinausgegangen und nun in umgekehrter Richtung der Punkt der eben merklichen Gleichheit ($r + \Delta r_o''$ bzw. $r - \Delta r_u''$) festgestellt, und, endlich wiederum in umgekehrter Richtung fortschreitend der Punkt der eben merklichen Verschiedenheit ($r + \Delta r_o'$ bzw. $r - \Delta r_u'$) festgestellt wurde. Jedenfalls kann diese zuweilen eingeschlagene größere Complicirtheit der Methode, sobald sich nämlich eine Unsicherheit fühlbar machte, was bei etwa 8–9% der Versuche der Fall war, nichts geschadet, sondern nur wesentlich genützt haben, da sich wesentliche Einwände nicht machen lassen. Eine zu große Zahl von Versuchen hintereinander zu machen, verbot sich überdies von selbst wegen der Abstumpfung und Ermüdung und in Anbetracht der nothwendigen Präcision der Versuche, wenn anders dieselben von Nutzen sein sollen.

Mit besonderer Vorsicht wurde bei der Feststellung der Maxima und Minima der Unterschiedsempfindlichkeit verfahren, zumal da aus der etwa erheblichen Kürze oder Länge der Strecke bis zum Punkte der eben merklichen Gleichheit oder Verschiedenheit die Nähe solcher Stellen vielfach unmittelbar ersichtlich war, ohne dass je die

bereits notirten Beurtheilungen auch nur in ihren relativen Werthen zu Hülfe genommen wurden. In den Fällen, wo die unmittelbar erhaltenen Ablesungswerthe besonders klein waren, wurde also, wie auch sonst in möglichst zusammengehörigen Gruppen, untersucht; außerdem wurden aber für die späteren Versuche möglichst geringe Zwischenräume hinsichtlich der Wahl der zu untersuchenden Stellen genommen, um so sicher als möglich der Punkte eben merklicher Gleichheit und Verschiedenheit habhaft zu werden, und um zugleich eine indirecte Controlle für die Sicherheit der vorangegangenen Bestimmungen zu haben, da nun doch einmal die Untersuchung einer möglichst großen Anzahl von Stellen geboten ist, übrigens auch eine geringere Anzahl solcher Stellen bereits vielfach anderweitig untersucht wurde (Mandelstamm, Dobrowolsky, Peirce, König und Dieterici, Uhthoff), wenn auch durchgängig unter andern Bedingungen in Bezug auf das Spectrum, wie später näher ausgeführt werden wird. Die Maßregel der Untersuchung in sehr geringen Zwischenräumen ist bei den Stellen besonders großer Werthe, also in der Nähe der Minima der Unterschiedsempfindlichkeit, nicht so sehr erforderlich, weil gerade in Folge der Breite dieser Werthe diese Stellen vorhandener Maxima der Zahlenwerthe nicht wohl überhaupt zu verfehlen sind, und sich außerdem, wie die spätere Zusammenstellung in Tabelle IV zeigen wird, abgesehen hiervon fast immer größere Gruppen dieser Maximalwerthe von nahezu gleich großer Höhe zusammen finden. Ein solches Uebersehen kann dagegen leicht bei den Minimis der Zahlenwerthe vorkommen, da, wie wiederum die Zusammenstellung in Tabelle IV zeigt, diese Stellen sehr zerstreut liegen, und in dem Versuche selbst, der Methode entsprechend, nur die unmittelbar benachbarten Strecken durchlaufen werden dürfen.

Die sprachlichen Bezeichnungen für die Farbentonverhältnisse der untersuchten Strecke wurden nach der Skalenablesung jedes Mal ebenfalls, so weit als möglich, zu Protokoll genommen, und zwar sowohl als F der Ausgangsstellung als auch als F' der Punkte eben merklicher Verschiedenheit auf beiden Seiten und der in diesem Falle vielfach durch den Contrast hervorgerufenen Aenderung von F wiederum der Ausgangsstellung, um Anhaltspunkte sowohl für die spätere Discussion der Versuche, auch hinsichtlich des Contrasteeinflusses, zu gewinnen, als auch für die Uebereinstimmung der Versuche unter

sich, soweit die sprachliche Feststellung allein dieses ermöglicht. Den früheren Erörterungen und der besonderen Erfahrung entsprechend wurde dabei die volle Aufmerksamkeit in erster Hinsicht unverwandt der quantitativen Untersuchung selbst zugewandt, und erst in zweiter Hinsicht den Bezeichnungen, da der vollständige Wechsel der Aufmerksamkeitsrichtung nach dieser Seite hin der Unbefangenheit der quantitativen Versuche geschadet hätte. Auf das G und H ist, wiederum entsprechend den früheren Erörterungen, hier noch nicht die Aufmerksamkeit zu richten, da auch dieses, und vielleicht in noch höherem Maße, geschadet hätte.

In dieser Weise wurden unter Anwendung der früher erörterten Vorsichtsmaßregeln und unter größtmöglicher Sorgfalt überhaupt die folgenden Ergebnisse für das individuelle Farbensystem des Verfassers gewonnen, zum Theil unter unmittelbarer Nachprüfung durch andere Versuchspersonen, welche der sehr zeitraubenden und nothwendiger Weise oft auszusetzenden Untersuchung meist nicht genügend Zeit opfern konnten. Die Bezeichnungen r , Δr_o , Δr_u u. s. w., sowie $R = r_o - \Delta r$, haben in der folgenden Tabelle die bei der Anwendung der Methode der Minimaländerungen übliche Bedeutung. Die mitgetheilte dritte Decimalstelle dient natürlich nur zur sicheren Feststellung der zweiten zum Zwecke der Correction und zur Besprechung der Grenzen der überhaupt erreichbaren Genauigkeit des Urtheils.

Tabelle IV.

Die Unterschiedsempfindlichkeit für die Farbentöne des unmittelbar gegebenen objectiven Spectrums von der angegebenen Ausdehnung. Farbensystem des Verfassers.

Nr.	r	$r + \Delta r_o$	$r - \Delta r_u$	R	$\Delta r_o + \Delta r_u$	Δr	$\frac{\Delta R}{R}$
1	773,994	776,904	—	—	—	—	—
		—	—				
2	770,134	772,457*	754,581°	763,519	17,88°	8,938	$\frac{1}{85}^\circ$
		—	—				
3	760,621	764,331	745,202	755,055	18,55	9,277	$\frac{1}{81}$
		—	746,355				
4	760,375	765,183	753,166*	759,241	11,29*	5,643	$\frac{1}{135}^*$
		764,584	754,029				

Nr.	r	$r + \Delta r_o$	$r - \Delta r_u$	R	$\Delta r_o + \Delta r_u$	Δr	$\frac{\Delta R}{R}$
5	759,406	766,530	751,416°	759,358	17,27°	8,634	$\frac{1}{88}^\circ$
		—	752,956				
6	756,769	764,516°	750,199	757,701	12,88	6,441	$\frac{1}{118}$
		763,717	752,371				
7	755,679	762,917	753,413*	758,128	8,94	4,468	$\frac{1}{70}^*$
		762,276	753,907				
8	749,286	751,515*	738,698°	746,375	9,16°	4,582	$\frac{1}{83}^\circ$
		750,398	744,888				
9	748,386	752,988	746,802*	749,508	5,14*	2,569	$\frac{1}{32}^*$
		751,165	747,077				
10	747,514	751,023	—	—	—	—	—
		—	—				
11	728,541	732,655	726,005	729,466	5,28	2,639	$\frac{1}{36}$
		731,555	727,650				
12	722,708	731,965	713,091°	723,678	13,74	6,870	$\frac{1}{68}$
		729,132	720,524				
13	719,820	732,069°	715,113	726,619	15,76°	7,882	$\frac{1}{22}^\circ$
		—	717,499				
14	717,392	718,269*	715,535	717,112	1,71*	0,885	$\frac{1}{84}^*$
		717,765	716,880				
15	715,581	716,647	714,381*	715,290	2,04	1,018	$\frac{1}{62}$
		716,647	714,842				
16	711,576	720,448°	—	713,974	12,48°	6,239	$\frac{1}{14}^\circ$
		720,026	707,710				
17	708,446	713,175	704,533°	708,684	8,30	4,148	$\frac{1}{11}$
		712,493	—				
18	703,846	705,436*	700,264*	703,184	3,53*	1,766	$\frac{1}{36}^*$
		704,463	702,573				
19	701,851	707,112°	694,175°	700,644	12,94°	6,469	$\frac{1}{38}^\circ$
		—	—				
20	695,967	700,479	690,334	695,425	6,96	3,481	$\frac{1}{30}$
		697,333	693,554				
21	684,547	686,279*	681,289	683,987	2,98*	1,489	$\frac{1}{61}^*$
		684,673	683,707				
22	682,369	684,925°	679,923*	682,336	3,79°	1,896	$\frac{1}{30}^\circ$
		683,539	680,956				
	—	—	—	—	—	—	—

Nr.	r	$r + \Delta r_o$	$r - \Delta r_u$	R	$\Delta r_o + \Delta r_u$	Δr	$\frac{\Delta R}{R}$
23	666,157	666,933 666,933	663,954* 665,678	665,875	2,12*	1,059	$\frac{1}{513}^*$
24	664,100	664,781 664,213	659,723° —	662,110	4,77°	2,387	$\frac{1}{277}^°$
25	663,771	666,452 665,641	660,726* 662,715	663,884	4,33	2,163	$\frac{1}{307}$
26	656,305	656,734* 656,477	652,229° 654,760	655,050	3,16*	1,581	$\frac{1}{414}^*$
27	647,943	651,708° 651,334	645,019 646,425	648,622	5,75°	2,875	$\frac{1}{225}^°$
28	647,899	648,146* 648,146	647,076* 647,322	647,673	0,95*	0,474	$\frac{1}{1368}^*$
29	640,194	— 640,977	— —	—	—	—	—
30	628,988	631,454° 631,211	626,788* 628,076	629,382	3,90	1,948	$\frac{1}{323}$
31	624,143	626,379* 626,379	620,832° 621,106	623,674	5,41°	2,705	$\frac{1}{231}^°$
32	620,524	623,919° 622,686	618,698 619,830	621,283	4,04	2,019	$\frac{1}{308}$
33	603,712	605,677* 603,925	602,568* 603,287	603,864	2,37*	1,187	$\frac{1}{503}^*$
34	601,416	602,421° 601,416	600,199 600,806	601,211	2,98°	1,488	$\frac{1}{404}^°$
35	600,798	601,119* 600,905	598,723° 599,625	600,093	1,84	0,919	$\frac{1}{613}$
36	598,723	600,316° 599,094	598,036 598,247	598,923	1,56	0,781	$\frac{1}{767}$
37	592,625	594,170 592,940	592,420 592,574	593,026	1,24	0,668	$\frac{1}{338}$
38	588,976	589,763* 589,592	588,609* 588,713	589,169	0,91*	0,456	$\frac{1}{1292}^*$
39	584,923	585,774° 585,670	584,718 584,923	585,271	1,27°	0,637	$\frac{1}{159}^°$
40	582,268	582,294* 582,294	581,737° 581,737	582,016	0,56*	0,279	$\frac{1}{2088}^*$

Nr.	r	$r + \Delta r_o$	$r - \Delta r_u$	R	$\Delta r_o + \Delta r_u$	Δr	$\frac{\Delta R}{R}$
41	579,331	581,913° 580,627	578,900* 579,124	580,141	2,26°	1,129	$\frac{1}{514}^\circ$
42	575,933	577,046* 576,164	575,379 575,632	576,055	1,10*	0,550	$\frac{1}{1047}^*$
43	571,768	573,793 571,904	569,832 571,678	571,802	2,06	1,032	$\frac{1}{554}$
44	569,153	570,594° —	567,881 —	569,238	2,7.°	1,357	$\frac{1}{419}^\circ$
45	566,824	568,025* 567,064	564,048° 566,455	566,398 (566,455)	2,29	1,147	$\frac{1}{414}$
46	562,567	563,806° 563,496	562,508* —	563,080	1,15*	0,574	$\frac{1}{981}^*$
47	561,248	562,563* 561,396	558,543° 560,300	560,701	2,56	1,279	$\frac{1}{438}$
48	560,730	562,262° —	559,665* —	560,964	2,60	1,299	$\frac{1}{432}$
49	554,727	555,763* —	552,963° —	554,363	2,80°	1,400	$\frac{1}{396}^\circ$
50	549,281	550,929° 549,995	546,979 548,787	549,173	2,68	1,340	$\frac{1}{410}$
51	548,286	550,292 548,785	546,301* 547,927	548,326	2,43*	1,213	$\frac{1}{452}^*$
52	543,276	544,111* —	539,162° 539,705	541,772	4,68°	2,339	$\frac{1}{232}^\circ$
53	538,972	— 540,717°	— 538,836*	539,777	1,88	0,941	$\frac{1}{514}$
54	537,811	538,216* —	537,542 537,595	537,892	0,65*	0,324	$\frac{1}{1660}^*$
55	532,333	533,599° 532,621	529,490° 531,075	531,696	2,83°	1,414	$\frac{1}{316}^\circ$
56	531,152	531,972 531,487	527,971 530,593	530,506 (530,593)	2,45	1,224	$\frac{1}{433}$
57	531,205	— 531,673*	529,656 529,913	530,754	1,89*	0,945	$\frac{1}{582}^*$
58	528,631	529,271 —	527,357* —	528,314	1,91	0,957	$\frac{1}{532}$

Nr.	r	$r + \Delta r_o$	$r - \Delta r_u$	R	$\Delta r_o + \Delta r_u$	Δr	$\frac{\Delta R}{R}$
59	527,357	528,272 528,133	524,843° 525,279	526,632	3,14°	1,571	$\frac{1}{335}^{\circ}$
60	526,437	527,547 527,050	524,227* 524,508	525,833	2,94*	1,468	$\frac{1}{358}^*$
61	524,513	529,317° —	522,933° —	526,125	6,38°	3,192	$\frac{1}{165}^{\circ}$
62	521,594	522,927 522,114	520,085* 520,848	521,494	2,06*	1,027	$\frac{1}{508}^*$
63	520,332	520,849 —	518,448° —	519,649	2,40°	1,201	$\frac{1}{433}^{\circ}$
64	516,585	517,125* —	516,081 —	516,603	1,04	0,522	$\frac{1}{990}$
65	515,913	516,585 516,417	515,578* 515,879	516,115	0,77*	0,336	$\frac{1}{1536}^*$
66	514,452	516,294 515,033	513,026° 513,362	514,429	2,47°	1,235	$\frac{1}{418}^{\circ}$
67	514,243	— 515,846	— 514,110*	514,978	1,74*	0,868	$\frac{1}{593}^*$
68	509,329	511,932° —	508,043° —	509,988	3,89°	1,945	$\frac{1}{262}^{\circ}$
69	504,640	505,810* 505,054	503,367 503,984	504,554	1,76*	0,878	$\frac{1}{575}^*$
70	501,013	502,732° 501,658	499,420* 500,866	501,169	2,05°	1,026	$\frac{1}{488}^{\circ}$
71	497,008	497,851 497,548	495,419° 496,771	496,897	1,61	0,802	$\frac{1}{620}$
72	494,225	495,076 494,311	493,950 494,098	494,359 (494,311)	0,67	0,335	$\frac{1}{1476}$
73	492,578	492,893* 492,620	492,452* 492,515	492,620	0,27*	0,137	$\frac{1}{3596}^*$
74	489,600	490,739 490,117	489,147 489,580	489,896	1,06	0,532	$\frac{1}{921}$
75	486,150	488,141° 487,221	484,346° 485,977	486,421	2,52°	1,259	$\frac{1}{386}^{\circ}$
76a	485,662	486,985 485,868	485,232 485,568	485,913 (485,868)	1,03	0,513	$\frac{1}{947}$

Nr.	r	$r + \Delta r_o$	$r - \Delta r_u$	R	$\Delta r_o + \Delta r_u$	Δr	$\frac{\Delta R}{R}$
76b	485,662	486,150	485,419*	485,728	0,98*	0,491	$\frac{1}{989}^*$
		485,756	485,587				
77	483,706	484,380	483,024°	483,720	1,15°	0,572	$\frac{1}{84}^{\circ}$
		484,205	483,272				
78	473,718	474,039*	473,368	473,689	0,51	0,255	$\frac{1}{1858}$
		473,849	473,499				
79	470,337	470,781°	470,323*	470,473	0,30*	0,150	$\frac{1}{3138}^*$
		470,466	470,323	(470,466)			
80	469,961	470,197*	468,897°	469,562	1,27	0,636	$\frac{1}{738}$
		—	468,955				
81	464,861	466,052°	463,693	465,016	1,67°	0,835	$\frac{1}{887}^{\circ}$
		465,649	464,668				
	—	—	—	—	—	—	—
82	444,872	445,100*	444,710*	444,891	0,32*	0,158	$\frac{1}{2816}^*$
		444,999	444,756				
83	441,568	445,286°	—	—	—	—	—
		—	—				
84	441,408	444,307*	432,589	438,448	11,72	5,859	$\frac{1}{76}$
		—	—				
85	436,855	445,123	422,594	434,081	20,40	10,201	$\frac{1}{43}$
		443,335	425,273				
86	429,306	—	409,398°	426,344	29,17°	14,587	$\frac{1}{29}^{\circ}$
		440,931°	414,114				
87	415,907	418,010	415,042*	416,463	2,83*	1,416	$\frac{1}{293}^*$
		417,749	415,052				
	—	—	—	—	—	—	—
88	396,862	398,395	394,518°	396,635	3,27°	1,635	$\frac{1}{243}^{\circ}$
		398,145	395,483				

Bei der Anwendung der psychophysischen Methoden zu Intensitätsbestimmungen findet nach oben und unten von dem Ausgangspunkte eine durchgehende wesentliche Identität der Qualität statt, ebenso umgekehrt bei Tonversuchen eine solche der Intensität. Bei diesen Versuchen am Spectrum findet sich jedoch eine qualitative Verschiedenheit nach rechts und links von der Ausgangsstelle, die sich zugleich in etwas weiterem Abstand stets mit Helligkeits- und

Sättigungs-, möglicher Weise auch mit Intensitätsänderungen verbindet. Während also sonst eine überwiegende partielle Identität vorhanden ist, tritt hier eine überwiegende partielle Verschiedenheit auf, als Merkmal des qualitativen Factors der in Betracht kommenden Wahrnehmung. Außerdem ist, wie aus den Zahlen der Columnne $\Delta r_o + \Delta r_u$ hervorgeht, ein verschieden schneller Anstieg und Abstieg der Farbentcurve, wenn man diese sich graphisch denkt, vorhanden, und die Ausgangsstellen sind augenscheinlich nur zufällig innerhalb jeder vorhandenen Farbentongruppe, wenn man solche als Theilstück der Curve annimmt, gewählt. So kommt es denn, dass in der Tabelle z. B. rechts von einer Ausgangsstelle ein sehr großer Werth für Erreichung des Punktes der eben merklichen Verschiedenheit, und in Vergleichung zu den entsprechenden Werthen der benachbarten untersuchten Stellen womöglich ein Maximum des Zahlenwerthes, nach links dagegen oft ein kleiner Werth oder gar für diese Strecke ein Minimum des Zahlenwerthes vorhanden ist. Ebenso ist auch vielfach das umgekehrte Verhältniss vorhanden. Beides findet ähnlich für die Stellen der eben merklichen Gleichheit statt. Dies ist leicht aus den Einzelwerthen der Columnen $r + \Delta r_o$ und $r - \Delta r_u$ zu ersehen, wo die Indices $^{\circ}$ und * die Maxima und Minima der Mittelwerthe darstellen. Um die geeigneten Werthe für die relative Unterschiedsempfindlichkeit zu erhalten, ist es erforderlich, statt des Reizes r seinen Schätzungswerth R zu benützen, für welchen $r_o - \Delta r = r_u + \Delta r$ ist, und dann Δr auf dieses R zu beziehen, welches das Mittel aus allen vier Werthen $r + \Delta r_o'$, $r + \Delta r_o''$, $r - \Delta r_u'$, $r - \Delta r_u''$ darstellt. Denn auf Grund der Untersuchung ist ja eine Gleichheit des Farbentons für die Strecke $r + \frac{\Delta r_o' + \Delta r_o''}{2}$,

durch r hindurch, bis $r - \frac{\Delta r_u' + \Delta r_u''}{2}$ anzunehmen, wogegen die

Stellen der eben merklichen Verschiedenheit bereits jenseits und diesseits dieser Mittelstrecke liegen. Freilich bedarf diese unumgängliche Reduction, da möglicher Weise der Contrast, wie bemerkt, mit ins Spiel kommt, eigentlich noch der experimentellen Controlle. Dass jedoch der Contrast sich hier nicht in merklichem Grade, also störend geltend machen kann, geht aus der folgenden Ueberlegung hervor: 1) Es handelt sich hier nur um den etwa auftretenden Contrast-

unterschied auf der Strecke, welche der Differenz zwischen r und dem berechneten R entspricht, also auf einer sehr kurzen Strecke, auf welcher der Contrast für F , G , H nicht sehr verschieden sein kann. 2) Die Gleichheit von F , für die Wahrnehmung auf dieser Strecke, ist dadurch verbürgt, dass der berechnete Werth R in die Strecke $(r + \Delta r_o'')$ bis $(r - \Delta r_u'')$ fällt. Eine Ausnahme bilden hier unter den 73 in Betracht kommenden Fällen nur folgende fünf: 45, 56, 72, 76a, 79. In zweien dieser Fälle liegen möglicher Weise auch Versuchsfehler vor, wie die Verschiedenheit der Werthe 76a gegenüber 76b und das Zusammenfallen der Werthe $(r - \Delta r_u')$ und $(r - \Delta r_u'')$ bei 79 vermuthen lässt. Versuchsfehler sind aber nicht unbedingt in allen diesen Fällen vorhanden, denn es braucht nur ein Werth der eben merklichen Verschiedenheit eine bedeutendere Disproportionalität zu zeigen, oder aber ein Werth der Gleichheit, so wird das aus allen vier Werthen berechnete R über einen der Punkte der eben merklichen Gleichheit hinausgravitiren. Eine solche Disproportionalität kann eintreten: in Folge relativ plötzlicher Aenderungen von G und H , in Folge von Contrast, vielleicht beruhend auf einer solchen Aenderung von G oder H , oder doch durch dieselbe begünstigt, endlich in Folge von Versuchsfehlern. Man ersieht allgemein hieraus, dass die Berechnungsweise derartiger Mittelwerthe, wie sie auch bei Intensitätsversuchen üblich sind, leztthin auf der Annahme beruht, dass die als eben merklich gleich und verschieden beurtheilten Werthe im allgemeinen in regelmäßiger Weise fallen und sich in Folge aller zusammenwirkenden Einflüsse, strenge Aufmerksamkeit vorausgesetzt, regelmäßig vertheilen; darauf beruht denn auch die Anwendung der Fehlermethoden. Da nun aber hier ein complicirter Thatbestand, also eine größere Summe möglicher Einflüsse als gewöhnlich vorhanden ist, nämlich außer den allgemeinen psychologischen Verhältnissen noch: 1) Verschiedenheit der Qualität nach oben und unten hin, 2) die Gesetzmäßigkeiten des Contrastes, und schließlich 3) die Gesetzmäßigkeiten von G und von H , so ist hieraus wiederum ersichtlich, dass für die Auflösung dieses Thatbestandes gerade die Differenzen von $\Delta r_o'$ und $\Delta r_o''$, und ebenso von $\Delta r_u'$ und $\Delta r_u''$, durch das ganze Spectrum hin verfolgt, werthvoll sein können, vorausgesetzt nämlich, dass die durch die genannten drei Einflüsse bedingte Regelmäßigkeit nicht von ander-

weitigen Einflüssen überwogen wird. Die oben erwähnten fünf Ausnahmefälle sind nun leicht dadurch zu beseitigen, dass man als Zahlenwerthe für R , statt des herausfallenden berechneten R das nächstgelegene $(r + \Delta r_o'')$ bzw. $(r - \Delta r_u'')$ verwendet, da hierdurch die Gleichheit von F noch genügend verbürgt, zugleich aber der geforderten Bedeutung des Werthes $\frac{\Delta R}{R}$ Genüge geleistet wird, ohne einen allzu großen Fehler zu begehen. Die Werthe, die sich in Folge dessen für $\frac{\Delta R}{R}$ vor und nach der Correction ergaben, waren $\frac{1}{434}$ und $\frac{1}{494}$ (45), $\frac{1}{433}$ und $\frac{1}{433}$ (56), $\frac{1}{1476}$ und $\frac{1}{1476}$ (72), $\frac{1}{948}$ und $\frac{1}{947}$ (76 a), $\frac{1}{3136}$ und $\frac{1}{3136}$ (79). Die erörterte Correction ist daher auch nur in dem einen Falle 76 a erforderlich, wo sie denn auch in der Tabelle in Columnne $\frac{\Delta R}{R}$ vorgenommen worden ist.

Es zeigt also: 1) die Columnne r der Tabelle IV die zufällig gewählte Ausgangsstellung und bedarf daher, weil später ganz hinwegfallend, keiner Correction. 2) Die Columnne $(r + \Delta r_o)$ zeigt die obere Schwelle in ihren zwei Werthen $(r + \Delta r_o')$ (der eben merklichen Verschiedenheit) und $(r + \Delta r_o'')$ (der eben merklichen Gleichheit). Ebenso 3) die Columnne $(r - \Delta r_u)$ die untere Schwelle als $(r - \Delta r_u')$ und $(r - \Delta r_u'')$. Die Werthe von Columnne $(r + \Delta r_o)$ bis $(r - \Delta r_u)$ gerechnet ergeben den jedesmaligen Spielraum der Gleichheit für F , so weit natürlich nicht die Contrasteinflüsse wirksam sind. Einzelnen genommen bedürfen diese Werthe allerdings der Correctionen, jedoch weniger, wenn man aus ihnen allen das Mittel Δr nimmt, da dann nur ihre Differenz in Betracht kommt und sie selbst, als wenig verschieden in Bezug auf die $\mu\mu$, fast nur der gleichen Correction bedürfen, und weil überdies auch eine Ausgleichung der Verschiedenheiten durch die Rechnung selbst stattfindet. Dasselbe gilt für die absolute Richtigkeit 4) der Werthe der Columnne R , wenn auch wegen theilweisen Wegfallens des letzteren Factors nicht in genau gleichem Maße. 5) Die Columnne $\Delta r_o + \Delta r_u$ gibt die arithmetische Summe der oberen und unteren Unterschiedsschwelle, innerhalb deren also Gleichheit von F nach doppelter Bestimmung für jede Seite stattfindet. Sie ist für die Discussion des Verhältnisses von F zu G besonders wichtig, da zwar auch das arithmetische Mittel den Gang

der Aenderung der Gleichheit darstellt, aber nur in dem Maßstabe $\frac{1}{2}$, also nicht so deutlich in den Zahlenwerthen, als es bei den Verhältnissen in Wirklichkeit vorliegt. 6) Die Columnne Δr stellt (als $\frac{\Delta r_o + \Delta r_u}{2}$) die Schwelle als arithmetisches Mittel und zugleich als absoluten Halbirungswerth dar. Diesen Werthen gegenüber ergibt hier das geometrische Mittel kaum nennenswerthe Verschiedenheiten wie die allgemeine Ableitung oder specielle Berechnung zeigt. 7) Die Columnne $\frac{\Delta R}{R}$ stellt den eigentlichen Gang der Unterschiedsempfindlichkeit gegenüber den Wellenlängen oder Schwingungszahlen dar, diese jedes Mal als Einheit genommen. Ihre Zahlenwerthe bedeuten nicht nur das Verhältniss der Wellenlängen, sondern in Folge günstiger Relationen zugleich das Verhältniss der Schwingungszahlen, wie man durch allgemeine Ableitung oder specielle Berechnung für einen beliebigen Fall erkennt, da V allgemein oder als 298 200 000 000 000 000 $\mu\mu$ in der Rechnung hinwegfällt. So ist denn hier weder eine Umrechnung in Schwingungszahlen noch nach dem, was über Δr und R bemerkt wurde, eine erhebliche Correction erforderlich.

Die Indices $^{\circ}$ heben die Maxima unter den Zahlenwerthen der Tabelle IV, also die Minima der Unterschiedsempfindlichkeit hervor. Die Indices * dagegen die Minima unter den Zahlenwerthen, also die Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit. Die durch — ausgefüllten Stellen der Tabelle geben zufällige Lücken an, aus Anlass äußerer Umstände entstanden, oder, wenn durch alle Columnen hindurchgehend, wichtigere Lücken in der Reihenfolge der untersuchten r , nach erfolgter Ordnung derselben nach zunehmender Schwingungszahl. Die Reihenfolge von R ist, wie die Vergleichung zeigt, nicht immer dieselbe wie die Reihenfolge von r , was wiederum auf Unregelmäßigkeit der Beobachtung oder Combination der anderweitig mitwirkenden Einflüsse für F , insbesondere den Einfluss des Contrastes hinweist, und ist daher später weiter zu erörtern. Für die Berechnung von R und Δr ist noch hervorzuheben, dass, wenn in Columnne 2 und 3 nur zwei Werthe in gleichem Sinne vorhanden sind, z. B. für eben merklich gleich, oder für eben merklich ungleich, für die Berechnung der weiteren Columnen ihr Mittel genommen

werden kann, da hierdurch im allgemeinen keine erheblichen Ungenauigkeiten entstehen. Sobald aber drei statt der vollzähligen vier Werthe vorhanden sind, ist natürlich der eine fehlende Werth nach demjenigen derselben Seite der Untersuchung zu ergänzen, also dieser selbst doppelt zu nehmen, um wenigstens annähernd richtige Werthe für R und Δr zu erhalten. Dieses gilt mit für die Berechnung von $\Delta r_o + \Delta r_u$.

Die Durchsicht der Tabelle in Bezug auf die erreichte Genauigkeit zeigt nun, dass die erreichbare psychologische Genauigkeit, hinsichtlich deren aber noch die Einflüsse durch Contrast, G und H abzuziehen sind, hinter der erreichbaren physikalischen Genauigkeit weit zurücksteht. Dies ist zu ersehen: 1) aus der Aenderung in den Werthen Δr für sehr benachbarte R oder r ; 2) aus den Höhen der S. 525 gegebenen Werthe höchster einseitiger Unterschiedsempfindlichkeit: 0,000; 0,014; 0,020; 0,026; 0,034; 0,042; 0,051; 0,059 u. s. w.; beide sind im wesentlichen höchstens Aenderungen der zweiten Decimalstelle; 3) aus dem späterhin mitzutheilenden mittleren Fehler und der mittleren Variation, selbst wenn unter ihnen nur diejenigen Fälle genommen werden, in denen keine Aenderung der Ausgangsstellung während der wiederholten Versuche erfolgte, also Ungenauigkeiten der Wiedereinstellung oder der absoluten Ablesung nicht ins Spiel kommen, und selbst in dem Falle, dass die Gruppen von G und H in dieser Zusammenstellung getrennt werden. Jedenfalls ist hieraus zu ersehen, dass die dritte Decimalstelle höchstens zur genaueren Bestimmung der zweiten dienen kann.

Was die Genauigkeit der mitgetheilten Werthe in absoluter Beziehung betrifft, so ist Folgendes zu bemerken: Der Unterschied zwischen physikalischen und psychologischen Bedingungen zeigt sich sachlich in den vier Werthen für $(r + \Delta r_o)$ und $(r - \Delta r_u)$, weniger in den zwei Mittelwerthen $(r + \Delta r_o)$ und $(r - \Delta r_u)$, oder gar in Δr selbst. Es sind nämlich alle Mittelwerthe, entsprechend der Zahl von Beobachtungen, die in sie eingegangen sind, in absoluter Beziehung genauer, als z. B. die Werthe von r : 1) weil bei ihnen durch Berechnung eine Compensation stattfindet; 2) weil sie überhaupt nur relative Beziehungen unter annähernder Gleichmäßigkeit der Höhe der Correction für sie, wie für r selbst darstellen; 3) weil sie mikro-

metrisch bestimmt wurden, und somit die Fehler der Hauptablesung bei ihnen nicht in Betracht kommen. Die Werthe für Δr sind also in Folge des Zusammenwirkens dieser Umstände in absoluter Beziehung im allgemeinen sehr genau. Ebenso R , aber nicht in demselben Maße, da hier der Factor 2 hinwegfällt. Demnach gilt diese relativ zureichende absolute Genauigkeit auch ähnlich für die Werthe der Columne $\frac{\Delta R}{R}$. Hier wird sich aber die Höhe der absoluten

Genauigkeit erniedrigen: 1) mit wachsender Kleinheit von Δr , in Anbetracht der Größe von R , so dass die Werthe höherer und höchster Unterschiedsempfindlichkeit nicht mehr dieselbe Genauigkeit in absoluter Beziehung, ohne Correction, besitzen, vielmehr die Stelle der absoluten Genauigkeit, sonst gleiche Umstände vorausgesetzt, mit der Höhe variiert; 2) mit zunehmender Ungenauigkeit von R , wie vorhin erörtert worden ist. In beiden Beziehungen tritt eine allerdings geringe Gegenwirkung durch die Division ein. Dazu kommt aber: 3) die Ungenauigkeit der Cauchy'schen Formel überhaupt. Die Folgen der Division kommen natürlich noch nicht für Δr oder für $\Delta r_o + \Delta r_u$ in Betracht. Letzteres besitzt in Folge der Compensation durch die erörterten Factoren dieselbe bedeutende Genauigkeit, wie Δr . Diese beiden Werthe sind günstiger Weise auch für die spätere Discussion zunächst wichtig. Bei $\frac{\Delta R}{R}$ aber wird, ein-

schließlich der Correction, die wahrscheinliche Höhe der absoluten Ungenauigkeiten theoretisch in gebührende Berücksichtigung gezogen werden. Dieselbe ist am größten in der Region A bis D , in Folge der aus dem raschen Abfall der Dispersionscurve resultirenden Fehlermöglichkeit der Hauptablesung, und demnach auch zum Theil der rechnerischen Bestimmung von R , und hängt schließlich noch von den die Höhe der erforderlichen Correctionen bedingenden früher erörterten Factoren ab (s. S. 522 f.). Die Genauigkeit ist ferner ziemlich groß von D bis F , am größten aber von F bis H' , wegen des hier langsameren Abfalls der Dispersionscurve, und wegen der übrigen hier in Betracht kommenden Umstände. Die möglichst eingehende Mittheilung der experimentellen Werthe bis zur dritten Decimalstelle ist auf alle Fälle erforderlich theils wegen der sicheren Weiterberechnung der Versuchszahlen durch alle Columnen der Tabelle,

auch für $\frac{\Delta R}{R}$, theils wegen der nothwendigen Correction für $\frac{\Delta R}{R}$, auf welche es hier besonders ankommt, theils für die Discussion des Verhältnisses der Versuchswerthe und der aus ihnen berechneten Werthe zu den Verhältnissen von G und H und zum Contrast, als den jedenfalls wirksamsten Einflüssen auf die Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit für die Farbentöne des vorliegenden Spectrums.

Die sprachlichen Benennungen des Protokolls bei diesen Versuchen sind im Auszuge nach der Zusammengehörigkeit der Benennungen geordnet, wobei sowohl die Bezeichnungen für das F des untersuchten r , als auch für die Bestimmungen von $(r + \Delta r_o')$ und $(r - \Delta r_u')$, wie endlich für r selbst doppelt gegeben werden, wenn sich das vorhandene F während der Untersuchung in Folge von eben eintretendem Contrast bei Bestimmung der eben merklichen Verschiedenheit auf größere Regionen hin änderte. Zugleich sind zum Zwecke der Vergleichung die Bestimmungen der Reihe 1 und 2 der Tabelle I mit ihren Bezeichnungen daneben gestellt.

Tabelle V.

Uebersicht über die Benennungen für die Werthe der Tabelle IV unter Gegenüberstellung der entsprechenden Bestimmungen der Tabelle I. Farbensystem des Verf. in beiden Fällen.

Nr.	Tabelle IV: $r + \Delta r_o$; r ; $r - \Delta r_u$		Tabelle I: Reihe 1 und 2, Methode 2	
1	—770	Grau; grauroth; roth		¹⁾ Grauroth (grauroth)
2	770—757	grauroth; schwärzlichroth; dunkeltiefroth	¹⁾ —751 (—)	
3	757—720	schwärzlichroth; dunkeltiefroth; tiefroth	751 (—)— (723)	schwärzlichroth (schwärzlichroth)
4	720—705	schwärzlichroth, bezw. dunkeltiefroth; tiefroth; tiefroth mit anderem F , bezw. roth	²⁾ —710 (—) ³⁾	

1) 779 der Reihe 6: Methode 3.

2) 721 der Reihe 3: Methode 2.

3) 710 der Reihe 6: Methode 3.

Nr.	Tabelle IV: $r + \Delta r_0$; r ; $r - \Delta r_a$		Tabelle I: Reihe 1 und 2, Methode 2:	
5	705—665	tiefroth; tiefroth mit anderem F ; gelbroth	710 (—) ¹⁾ —660 (665)	tiefroth (tiefroth)
6	665—660	tiefroth; roth; gelbroth	660 (665)—	roth (roth)
7	660—642	roth; gelbroth; rothgelb	2)	
8	642—619	gelbroth; rothgelb bezw. gelbroth in Folge von Contrast; rothgelb	3)—620 (630)	
9	603—590	rothgelb; goldgelb; gelb	620 (630)—593 (—)	orange (gelbroth)
10	590—583	goldgelb; goldgelb bezw. gelb in Folge von Contrast; gelb	593 (—)—585 (589)	gelblichröthlich (gelbroth)
11	583—563	goldgelb; tiefgelb; grün-gelb	585 (589)—563 (—)	röthlichgelblich, später: goldgelb (goldgelb, sp. gelb)
12	563—532	gelb; gelb bezw. später: grünelb, und noch später: gelbgrün; gelbgrün	563 (—)—531 (530)	gelb, grünelb und gelbgrün (gelb, sp. gelbgrün)
13	532—518	gelbgrün; grün; blau-grün	531 (530)—515 (511)	grün (grün)
14	518—495	grün; tiefgrün bezw. blaugrün; blaugrün	515 (511)—498 (—)	grün + grasgrün (grasgrün)
15	495—485	blaugrün; blaugrün mit anderem F ; blau bezw. tiefblau in Folge von Contrast	498 (—)—484 (482)	blaugrün (noch grasgrün)
16	485—470	grünblau; blau; blauviolett	484 (482)—465 (472)	blaugrün, später: grünblau (blaugrün)
17	445—435	blau; blauviolett; violett	446 (449)—435 (435)	blauviolett (violett)
18	420—405	blauviolett; tiefviolett; schwärzlichviolett	435 (435)—409 (403)	tiefviolett (tiefviolett)
19	405—390	violett; schwärzlichviolett; grauviolett	409 (403)—394 (—)	schwärzlichviolett (schwärzlichviolett)

Man hat hier zu berücksichtigen, dass die beiderseitigen Zahlen nach verschiedenen Methoden gewonnen wurden. Für die Benennungen hat die Vergleichung für die mittleren Benennungen der

1) 710 der Reihe 6: Methode 3.

2) 661 der Reihe 6: Methode 3.

3) 646 der Reihe 6: Methode 3. Hiermit sollen lediglich die Lücken ausgefüllt werden, da noch eine größere Anzahl Uebereinstimmungen vorhanden sind.

Columnne: $r + \Delta r_o$; r ; $r - \Delta r_u$ mit denjenigen von Columnne 4 zu geschehen, da die ersten Bezeichnungen der zweiten Columnne diejenigen für $(r + \Delta r_o')$, die zweiten diejenigen für r , also auch für R , die dritten diejenigen für $(r - \Delta r_u')$ im Protokollauszug darstellen. In denjenigen Fällen, in welchen die Bestimmungen der Reihe 1 und 2 der Tabelle I, der dort angewandten Methode entsprechend (Methode 2), Lücken hinsichtlich der hier in Betracht kommenden Werthe aufweisen, sind diejenigen von Reihe 3 und der nach Methode 3 gewonnenen Reihe 6 zu Hülfe genommen, wobei sich wiederum der Vorzug der Methode der Spaltisolirung (3) zeigt. Ihren Werth gewinnt diese Uebersicht natürlich erst bei der Erörterung der Verhältnisse des Contrastes und der Einflüsse von G und H .

Werthe der Unterschiedsempfindlichkeit unter $\frac{1}{100}$ sind, zugleich unter Beigabe der speciellen sprachlichen Bestimmungen des Protokolls, nach Columnne 7 der Tabelle IV die folgenden, wobei des bequemeren Auffindens wegen die Ziffer der Beobachtung in der Anordnung von Tabelle IV in Klammern beigegeben ist.

Tabelle VI.

Werthe von $\frac{\Delta R}{R}$ unter $\frac{1}{100}$ mit den sprachlichen Bestimmungen des Protokolls.

1. 763,5 (R): $\frac{1}{85}$ (grau; grauroth; schwärzlichroth) (2)^o. 2. 755,0 (R): $\frac{1}{81}$ (grau-roth; schwärzlichroth; tiefroth) (3). 3. 759,4 (R'): $\frac{1}{88}$ (grau-roth; schwärzlichroth; tiefroth oder roth) (13)^o. 4. 726,6 (R): $\frac{1}{82}$ (schwärzlichroth; tiefroth oder roth) (13)^o. 5. 438,4 (R): $\frac{1}{75}$ (blau; blauviolett; violett, oder aber: blauviolett; violett; tiefviolett, als seiner Zeit unentschieden gelassen) (84). 6. 434,1 (R): $\frac{1}{83}$ (blau; blauviolett; violett, oder aber: blauviolett, violett, tiefviolett, als unentschieden gelassen) (85). 7. 426,3 (R): $\frac{1}{85}$ (blauviolett; tiefviolett; schwärzlichviolett) (86)^o, während dann die Unterschiedsempfindlichkeit für: violett; schwärzlichviolett; grau-violett entschieden über $\frac{1}{100}$ wächst (87 und 88).

Bei dieser Uebersicht ist auffallend, dass sich diese Werthe sämmtlich in den äußersten Strecken des Spectrums befinden und zwischen 726,6 und 438,4 kein Werth unter $\frac{1}{100}$ vorhanden ist. Man wird hieraus schließen können, dass die hier vorhandene Helligkeit sehr geringer Grade die Unterschiedsempfindlichkeit für den Farbenton herabsetzt, vorbehaltlich der Mitwirkung der indessen ebenfalls von der Helligkeit abhängigen Farbengrade dieser zwei extremen Regionen. Bei 416,5 (87 der Tabelle IV) und 396,6 (88 derselben

Tabelle) steigt indessen $\frac{\Delta R}{R}$ wieder über $\frac{1}{100}$ hinaus, und zwar sogleich beträchtlich, soweit hier eben nicht Lücken vorhanden sind: $\frac{1}{293}$ und $\frac{1}{143}$, so dass hier wahrscheinlich, auch der sprachlichen Benennung entsprechend (s. die Bemerkung Tabelle VI Schluss), nicht mehr die Unterschiedsempfindlichkeit für die Farbenempfindung im eigentlichen Sinne, sondern für die Aenderung durch überwiegende achromatische Beimischung (»Schwärzlichviolett« der Benennung auch in Tabelle I) in Betracht zu kommen scheint. Dasselbe bieten denn auch die Werthe des »Schwärzlichroth« (759,2, 757,7, 758,1 der Tabelle IV, vielleicht jedoch nur für das erstgenannte R) gegenüber ihrer Umgebung dar. Insgesamt sind, wie ein Durchlaufen der Columnen Δr , $\Delta r_o + \Delta r_u$, $\frac{\Delta R}{R}$ lehrt, 28 Minima der Unterschiedsempfindlichkeit in dem unmittelbar gegebenen Spectrum höchster äußerer Intensität vorhanden, an welche sich auch in der Umgebung ähnlich hohe Werthe anreihen, die, wie sich zeigen wird, meist mit den Farbengradmaximis zusammenfallen, so dass also nicht nur die geringen Grade von H , sondern hiernach auch die hohen Grade von G auf die relative Unterschiedsempfindlichkeit von F vermindernd einwirken. Dass hiermit, abgesehen von den größeren und als solche bezeichneten Lücken der Tabelle IV, auch sämmtliche vorhandenen eigentlichen Minima der Unterschiedsempfindlichkeit, und annähernd in richtiger Höhe, getroffen sind, lässt sich nach dem früher Erörterten (S. 548) im allgemeinen annehmen und wird durch die spätere Durchprüfung bestätigt werden.

Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit sind in übereinstimmender Weise 27 vorhanden, wie ebenfalls ein Durchlaufen der angegebenen Columnen lehrt. Ihre Werthe über $\frac{1}{1000}$, wie überhaupt die Werthe von $\frac{\Delta R}{R}$ über $\frac{1}{1000}$, sind folgende, wiederum mit den sprachlichen Bestimmungen des Protokolls und der Ziffer der Beobachtung in der Anordnung von Tabelle IV gegeben.

Tabelle VII.

Werthe von $\frac{AR}{R}$ über $\frac{1}{1000}$, mit den sprachlichen Bestimmungen des Protokolls.

1. 647,7 (R): $\frac{1}{3388}$ (gelbroth; gelbroth, gegenüber dem ersten rothgelb werdend; rothgelb) (28)*.
2. 589,2 (R): $\frac{1}{1292}$ (goldgelb; goldgelb, gegenüber dem ersten gelb werdend; gelb) (38)*.
3. 582,0 (R): $\frac{1}{2088}$ (fehlt im Protokoll, wahrscheinlich: goldgelb; tiefgelb; grüngelb) (40)*.
4. 576,1 (R): $\frac{1}{1047}$ (fehlt, entweder: goldgelb; tiefgelb; grüngelb, oder: tiefgelb; grüngelb; gelbgrün) (42)*.
5. 537,9 (R): $\frac{1}{1860}$ (fehlt, entweder: tiefgelb; grüngelb; gelbgrün, oder: gelbgrün; grün; saftgrün oder aber blaugrün) (54)*.
6. 516,1 (R): $\frac{1}{1538}$ (grün; blaugrün, gegenüber dem zweiten tiefgrün werdend; blaugrün) (65)*.
7. 494,3 (R'): $\frac{1}{1478}$ (grünblau; blaugrün; tiefblau (72)).
8. 492,6 (R): $\frac{1}{3598}$ (grünblau; blaugrün; tiefblau) (73)*.
9. 470,5 (R'): $\frac{1}{3738}$ (blau; tiefblau; blauviolett) (79)*.
10. 444,9 (R): $\frac{1}{2818}$ (blau; blauviolett; violett) (82)*.

Diese Werthe bewegen sich innerhalb der Regionen des Spectrums mittleren Helligkeitsgrades 648 $\mu\mu$ bis 445 $\mu\mu$, mit Ausnahme der höchsten Helligkeitsgrade dieses Spectrums, denn sie zeigen von 576 $\mu\mu$ bis 538 $\mu\mu$ eine erhebliche Lücke, während sie sonst in kürzeren Zwischenräumen vorhanden sind. Dieses ist trotz der im allgemeinen stattfindenden Abnahme des Farbengrades in dieser ausfallenden Strecke höchster Helligkeit der Fall. Eigentlich beginnen diese Werthe sogar erst bei 589 $\mu\mu$, da auch von 648 $\mu\mu$ bis 589 $\mu\mu$ eine erhebliche Lücke, und zwar noch größer als die vorhin angeführte, vorhanden ist. Es kommen hier also in Betracht die Gelb, Grün, Blau aufweisenden Farbentöne des gegebenen Spectrums, abgesehen von Gelb selbst. Mittlere Helligkeit ist überhaupt, wie hieraus zu schließen, für die Unterschiedsempfindlichkeit von F am günstigsten.

Bei der Höhe dieser Zahlenwerthe darf man natürlich nicht die Richtigkeit der letzten Stellen erwarten. Die beträchtliche Höhe dieser Werthe ist immerhin gegenüber den sonstigen psychophysischen Werthen für die Unterschiedsempfindlichkeit auffallend, doch kann bei der großen Zahl dieser Fälle ein Versuchsirrthum allgemein für ausgeschlossen gelten. Es wird sich gelegentlich einer Durchprüfung zeigen, dass selbst der an sich nicht unwahrscheinliche Fall, dass eine Anzahl Minima in Folge etwa von unbemerkt gebliebenen Intensitätsänderungen doppelt zur Beobachtung gelangten, gleichfalls

ausgeschlossen ist. Auch gegenüber den Werthen anderweitiger Beobachter am Spectrum fallen, wenigstens zum Theil, diese Höhen auf, doch wird sich auch hier später zeigen, dass im ganzen eine relativ hohe Uebereinstimmung vorhanden ist. Alles in allem genommen ist diese hohe Unterschiedsempfindlichkeit auf das Zusammenwirken folgender sehr günstiger Umstände zurückzuführen: 1) Die hohe Versuchsisolirung der Schwingungszahlen, die sich aus dem Verhältniss der Spaltbreite als von 0,4 mm zu der bedeutenden Ausdehnung des Spectrums von 115,6 mm ergibt und später noch ausführlicher gegenüber anderweitigen Versuchsanordnungen zu erörtern ist. 2) Die dabei gleichzeitig stattfindende Verminderung der Intensität und der Helligkeit, a) in Folge der unbeschadet der Schärfe des Spectrums erreichten großen Ausdehnung desselben; b) in Folge der Querstellung des Projectionsschirms innerhalb des Spielraums der Schärfe, was eine noch größere Ausdehnung ergibt, als sie hier sonst das Spectrum, ohne Verlust von Schärfe, ergeben würde; c) in Folge der durch die schräg gestellten Heliostatenspiegel, die Staubtheilchen der Luft und den weißen Projectionsschirm ausgeübten Absorption, und d) in Folge des langen vom ersten Heliostatenspiegel ab zu durchlaufenden Weges. Diese Umstände zusammengenommen ergeben hier die Entwicklung einer größten Fülle von Farbentönen. Dieselbe kann nun aber entweder in der Erzeugung einer größeren Zahl von psychologisch überhaupt möglichen Farbentönen bestehen, oder aber sie kann zum Theil aus der Wahrnehmungsanalyse einer psychologischen Synthese entspringen und sonach die Unterschiedsempfindlichkeit für Verschmelzungen darstellen. Ob bloß eine von diesen beiden Möglichkeiten stattfindet, oder ob sich beide nicht absolut ausschließen, darauf genauer einzugehen ist natürlich noch nicht der Ort, und wird sich überhaupt nur durch eine Fülle eingehender Feststellungen entscheiden lassen. Deren ist vorläufig hier noch kein Ende abzusehen, was gerade gegenüber der Meinung, als wäre die Optik bereits ein ziemlich erschöpftes Gebiet, geltend gemacht werden muss. In Wirklichkeit mangelt es hier an Vollständigkeit der Untersuchungen noch in erheblicher Weise.

Bei der im allgemeinen doch nur verhältnissmäßig geringen Zahl der hier auf Unterschiedsempfindlichkeit eingehend untersuchten

Stellen und trotz der in der Nähe der Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit angewandten besonderen Vorsicht darf man aber hier nicht erwarten, dass die eigentlichen Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit am vorliegenden Spectrum in ihrer richtigen Höhe oder in ihrer gesammten Anzahl festgestellt wurden, wenn auch letzteres schon eher. Die erforderlichen Ergänzungen können deshalb für die spätere Discussion, abgesehen von der Ausfüllung der erheblicheren Lücken, von denen namentlich vier (682 bis 666, 621 bis 604, 465 bis 445, 416 bis 396) vorhanden sind, und der Untersuchung besonders wichtiger Stellen, durch eine weiterhin in allergeringsten Distanzen vorschreitende Durchführung der Untersuchung innerhalb einer, wenn auch nur wenig umfangreichen Region geschehen, in welcher sämtliche in Betracht kommende Verhältnisse besonders günstig liegen, und zugleich derart, dass eine sprungweise Durchführung vermieden wird, sich vielmehr die Werthe möglichst in regelmäßigen Abständen befinden. Hierdurch wird die weitere Discussion erheblich erleichtert, obgleich man auch von den obigen Ergebnissen ohne Fehlerbetrachtungen und die mittelst derselben ausgeführten Correctionen noch nicht allzuviel erwarten darf.

Das zeitweilig auftretende Schwanken der Farbenbezeichnung, wie z. B. Tab. VI, 4.: tiefroth oder roth; 5.: blau, blauviolett, violett, tiefviolett als unentschieden gelassen, Tab. VII, 5.: saftgrün oder blaugrün, ist vor allem der geringeren Aufmerksamkeit für die äußerlichen Bezeichnungen zuzuschreiben (s. S. 531), sodann aber in zweiter Linie der Isolirung ohne die Möglichkeit weiterer Vergleichung. Hat man nicht eine Skala mehrerer Farben von blaugrün bis grünblau vor sich, so ist es in einem gegebenen Falle, auch bei Anwendung stärkerer Aufmerksamkeit, oft schwer, wenn nicht unmöglich, zu sagen, ob man es noch mit blaugrün oder bereits mit grünblau zu thun hat, während man bei einer größeren Anzahl gleichzeitig gebotener Farbentöne viel sicherer aussagen kann, welchem die eine und welchem die andere Benennung gebührt, und welcher etwa die Mitte zwischen grünblau und blaugrün ist. Dieses fällt aber bei nur einzeln gegebenen Farben hinweg, und ist somit ein Beitrag zum Verständniss der Farbenbezeichnungen überhaupt, wenn man sich die Umstände, durch welche diese gefördert wurden, vergegenwärtigt.

Dass nun in der That in den mitgetheilten Versuchen die Zahl der Minima und relativ auch ihre Höhe richtig getroffen wurde, ohne dass eines derselben etwa in Folge von Einstellungsirrtum oder Aenderung der Intensität doppelt genommen wurde, zeigt die Durchprüfung oder selbständige Feststellung an anderen Versuchspersonen, unter denen diejenige an Herrn F. Bolton als eine besonders vollständige, und hinsichtlich der etwaigen Frage der Constanz besonders sichere hervorzuheben ist. Sie war die erste Versuchsreihe des Reagenten am Spectrum überhaupt, und entbehrt somit in dieser Beziehung wie auch sonst jeglicher anderweitigen Beeinflussung, die übrigens auch von andern Reagenten, die eine solche etwa mitbringen, von selbst fallen gelassen wird. Sie wurde ferner als Aufsuchung der Stellen der Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit unmittelbar hintereinander für das ganze Spectrum im Laufe von $1\frac{1}{2}$ Stunden bei constanter Intensität der Sonne gewonnen, ohne dass es wegen der genügenden Sicherheit des Urtheils von Seiten des Reagenten erforderlich war, irgend eine bereits durchlaufene Strecke noch einmal zu durchlaufen, nachdem vom äußersten Roth ausgegangen war. Dieses war natürlich nur möglich als einseitige Untersuchung der Unterschiedsempfindlichkeit, und ohne Anwendung der Methode der Minimaländerungen, derart, dass hier die zwei 0,4 mm breiten Spalte in constanter Distanz, nämlich 0,499 mm ihrer Mittelpunkte, wie die spätere mikrometrische Messung ergab, und in unveränderter Breite durch das ganze Spectrum hin, durch gleichmäßige Verschiebung des eigentlichen Spaltapparates bewegt wurden. Die Ablesung fand statt, sobald ein Punkt eben merklicher, also hier einseitiger Verschiedenheit der Farbtöne sich zeigte. Die Werthe sind also, nach der hier geschehenen Umrechnung, mit denjenigen der Columnen $(r + \Delta r_o)$ und $(r - \Delta r_u)$, aber auch mit Δr zu vergleichen und versuchsweise der Durchprüfung wegeu anf R zu beziehen. Diese Werthe, von denen sich 24 ergaben, waren nach späterer Berechnung folgende:

Tabelle VIII.

Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit innerhalb einer Beobachtungsreihe in einseitiger Abstufung festgestellt. Farbensystem: F. Bolton. Objectives Sonnenspectrum von constanter Intensität.

1. 727—723. 2. 698—696. 3. 681—678. 4. 660—657. 5. 650—647.
6. 633—630. 7. 624—621. 8. 617—614. 9. 600—597. 10. 589—587. 11. 585

bis 584. 12. 576—575. 13. 551—550. 14. 535—534. 15. 524—523. 16. 513—512. 17. 499—498. 18. 485—484. 19. 479—478. 20. 470—469. 21. 461—460. 22. 447—446. 23. 429—428. 24. 421—420 $\mu\mu$, zusammen also 24 Stellen minimaler Verschiedenheit.

Die constant gehaltene Differenz der Mittelpunkte der Spalte von 0,499 mm entspricht natürlich, je nach der Region des Spectrums, verschiedenen Differenzen der $\mu\mu$, was sich auch aus der Tabelle durch Subtraction ergibt, nämlich Differenzen von 4,0 bis herunter zu 0,7 $\mu\mu$ (23 bis 24). Wenn diese Werthe nun auch unmittelbar nur mit den Columnen ($r + \Delta r_o$) und ($r + \Delta r_u$) zu vergleichen sind, so sind sie es doch mittelbar auch mit Δr . Denn, wenn in der Columne Δr der Tabelle IV ein Maximum der Unterschiedsempfindlichkeit (*) vorhanden ist, so war hier, die Richtigkeit jener Resultate vorausgesetzt, die Wahrscheinlichkeit, bei der hier angewandten einseitigen Methode auch diese zu treffen, doppelt so groß, vorausgesetzt, dass die zugehörigen Werthe ($\Delta r_o + \Delta r_u$) die vorhandene Wellenlängendifferenz bei der hier angewandten Spaltendifferenz (0,499 mm) nicht übertrafen. Daher ist auch eine Bestätigung oder Nichtbestätigung gerade dieser Werthe, also der früher rechnerisch festgestellten doppelseitigen Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit (Tabelle IV, Columne Δr), zu erwarten. Die Zahlen der Tabelle VIII, unter Vergleichung mit den zunächst gelegenen Werthen der Tabelle IV, soweit dort überhaupt entsprechende Stellen wirklich untersucht wurden, und nur in einem Falle mit einer Interpolation (1: 727—723, weil hier eine Lücke in Tabelle IV vorhanden war), gibt nun die folgende Uebersicht.

Tabelle IX.

Gegenüberstellung der Zahlenwerthe von Tabelle VIII mit denjenigen von Tabelle IV. Farbensysteme wie angegeben¹⁾.

Nr.	Tabelle VIII	Werthe von R , Δr , Δr_o , Δr_u der Tabelle IV
1	727—723	729,5 (11) Verschiedenheit von F für $\Delta r = 2,6 \mu\mu$, nach beiden Seiten hin, geringer als 724 (12) und nach oben hin als 750 (10), also wahrscheinlich Maximum der Unterschiedsempfindlichkeit von etwa $2,6 \mu\mu$.

1) »Einseitiges Maximum« bedeutet in der folgenden Tabelle, dass nur einer der Werthe Δr_o oder Δr_u von r aus gerechnet ein Maximum ist.

Nr.	Tabelle VIII	Werthe von R , Δr , Δr_o , Δr_u der Tabelle IV
2	698—696	703,1 doppelseitiges Maximum von 1,8 und $1,8 \mu\mu = 3,5 \mu\mu$
3	681—678	684,0 doppelseitiges Maximum von 1,5 und $1,5 \mu\mu$ und einseitiges Maximum von $3,0 \mu\mu$, ferner 682,3 einseitiges Maximum von $2,4 \mu\mu$.
4	660—657	665,9 (23) doppelseitiges Maximum von 1,1 und $1,1 \mu\mu$, ferner 655,0 doppelseitiges Maximum von 1,6 und $1,6 \mu\mu$.
5	650—647	647,7 (28) doppelseitiges Maximum von 0,5 und $0,5 \mu\mu$; ferner einseitige Maxima der zufälligen Ausgangsstellung (r).
6	633—630	629 wahrscheinlich doppelseitiges Maximum von 1,9 und $1,9 \mu\mu$ oder doch Nähe eines solchen, ferner einseitiges Maximum von $2,2 \mu\mu$.
7	624—621	623,7 einseitiges Maximum von $2,3 \mu\mu$.
8	617—614	Lücke von 621—603. 603 jedoch nach der Tabelle doppelseitiges Maximum von 1,7 und $1,7 \mu\mu$, ferner einseitige Maxima auf beiden Seiten von 1,6 und $0,8 \mu\mu$.
9	600—597	600,1 einseitiges Maximum von $0,2 \mu\mu$.
10	589—587	589,2 doppelseitiges Maximum von 0,5 und $0,5 \mu\mu$, ferner einseitige Maxima auf beiden Seiten als 0,7 und $0,2 \mu\mu$.
11	585—584	582 doppelseitiges Maximum von 0,3 und $0,3 \mu\mu$ und einseitiges Maximum.
12	576—575	576,0 doppelseitiges Maximum von 0,6 und $0,6 \mu\mu$, ferner einseitiges Maximum von $0,1 \mu\mu$.
13	551—550	554 einseitiges Maximum von $1,0 \mu\mu$.
14	535—534	537,9 doppelseitiges Maximum von 0,3 und $0,3 \mu\mu$, ferner einseitiges Maximum von $0,1 \mu\mu$.
15	524—523	521,5 doppelseitiges Maximum von 1,0 und $1,0 \mu\mu$.
16	513—512	515,0 (67) doppelseitiges Maximum von 0,9 und $0,9 \mu\mu$, einseitiges Maximum von $0,1 \mu\mu$.
17	499—498	504,6 doppelseitiges Maximum von 0,9 und $0,9 \mu\mu$, einseitiges Maximum von $1,2 \mu\mu$. 501,2 einseitiges Maximum von $0,9 \mu\mu$.
18	485—484	492,6 doppelseitiges Maximum von 0,2 und $0,2 \mu\mu$, einseitige Maxima von 0,2 und $0,1 \mu\mu$. 486 (76b) doppelseitiges Maximum von 0,5 und $0,5 \mu\mu$, einseitiges Maximum von $0,2 \mu\mu$.
19	479—478	474 einseitiges Maximum von $0,2 \mu\mu$.
20	470—469	470 doppelseitiges Maximum von $0,3 \mu\mu$, einseitiges Maximum von $0,01 \mu\mu$.
21	461—460	Lücke von 465—445.
22	447—446	444,9 doppelseitiges Maximum von 0,2 und $0,2 \mu\mu$, ferner einseitige Maxima von 0,2 und $0,1 \mu\mu$.
23	429—428	426,3 doppelseitiges Minimum und einseitige Minima, also keine Uebereinstimmung.
24	421—420	416,5 doppelseitiges Maximum von 1,4 und $1,4 \mu\mu$, ferner einseitiges Maximum von $1,4 \mu\mu$.

Die hier gegenübergestellten beiderseitigen und vollständig unabhängig von einander gewonnenen Zahlen sind in ihrer in der Tabelle selbst sich bietenden Uebereinstimmung eine Bestätigung nicht nur der für $\mathcal{A}r_o$ und $\mathcal{A}r_u$ gewonnenen, sondern auch zugleich der für R und $\mathcal{A}r$ berechneten Zahlenwerthe, welches letztere ja implicite auch einen abstrahirten, erst durch Beziehung zu einem R gerechtfertigten Werth darstellt. Wie die Vergleichung mit Tabelle IV zeigt, wird nämlich die Uebereinstimmung der beiden Reihen in den meisten Fällen durch Verwendung des Werthes für R erhöht, und nur in wenigen Fällen vermindert. Die Farbenbezeichnungen des Reagenten stimmten ferner mit denjenigen des Protokolls und denjenigen von Tabelle I überein, hiermit ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass nicht gleichwohl individuelle Verschiedenheiten für F , G , H vorhanden waren. Hierauf deuten auch die Werthe geringerer Uebereinstimmung oder gar des einen Widerspruchs (23) hin, obgleich man entsprechend dem aus Tabelle IV ersichtlichen Verlauf der Curve für die Unterschiedsempfindlichkeit einen gewissen Spielraum für die Minimalwerthe auch gerade gegenüber der hier angewandten constanten Spaltdistanz von $0,499 \mu\mu$ und der Succession der Verschiebung dieser Methode zugeben muss. Entsprechend der mit dem äußersten Roth beginnenden, nach den brechbaren Strahlen sich fortsetzenden Bewegung des ganzen Spaltapparates werden nämlich die objectiven Verschiedenheiten von F innerhalb des für sie hier zufällig vorhandenen Spielraumes bei dieser Methode etwas zu sehr nach den brechbaren Strahlen hin bestimmt werden, und dieses zeigen auch 14 Fälle der obigen Tabellen, gegenüber 7 Fällen einer Differenz nach den weniger brechbaren Strahlen hin, und einem Falle genauer Uebereinstimmung, abgesehen von den 2 Lücken. Es zeigt sich ferner, entsprechend der in Folge des Mangels einer strengen Methode und gegenüber der vorhandenen Spaltdifferenz stattfindenden psychologischen Wahrscheinlichkeit, und entsprechend auch der allgemeinen, auf der Höhe der Verschiedenheit von F basirenden objectiven Wahrscheinlichkeit, dass dabei kein Werth der Tabelle IV übergangen ist, der unter $0,8 \mu\mu$ oder selbst etwas über $0,8 \mu\mu$ betrug, abgesehen von der einen Ausnahme 563,1 (46), wie die Vergleichung aus den Werthen der Columne $\mathcal{A}r$ in Tabelle IV zeigt. Dieses aber ist deswegen wichtig, weil die an sich (gegenüber den bisherigen Beobach-

tungen) auffallend hohen Werthe der Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit hierdurch ebenso hinsichtlich ihrer großen Anzahl wie hinsichtlich ihrer absoluten Höhe bestätigt werden, denn wenn in der unmittelbaren Nachbarschaft hier eben keine Verschiedenheit von F durch diese Methode aufgefunden wurde, so bedeutet dieses, dass die festgestellten Zahlenwerthe der Tabelle VIII in der That Maxima der Unterschiedsempfindlichkeit im Verhältniss zu ihrer Umgebung darstellen, da die Wellenlängendifferenz sich, abgesehen von $A-D$, nicht so rasch ändert, und auch bei $A-D$ gerade größere Distanzen als Reihenfolge der festgestellten Werthe vorhanden sind. Ferner ist, abgesehen von dem erwähnten 563,1 (siehe oben), kein Werth übergangen worden, der entsprechend der Wellenlängendifferenz der Spaltdistanz (vergleiche Tabelle VIII oder Columne 1 Tabelle IX) entweder als doppelseitiges Maximum oder als einseitiges Maximum (gegenüber R) und überhaupt als eine Verschiedenheit von F nach den Resultaten von Tabelle IV in Betracht kommen musste, wie die durchgehende Vergleichung der dortigen Werthe mit den jedesmaligen Werthen dieser Feststellung zeigt. Doppelt in jener Tabelle vorkommende Maxima und nur einmalige Feststellungen dieser Tabelle sind allein die ganz benachbarten Werthe 1. 717 und 715 (14 und 15 der Tabelle IV als einseitige Maxima); 2. 666 und 655 (23 und 26); 3. 492 und 486 (73 und 76 b). Sie sind auf die im zweiten Falle angewandte successive Verschiebung zurückzuführen, welche, nachdem einmal eine Verschiedenheit von F constatirt war, nun in so unmittelbarer Nachbarschaft bei weiterer Verschiebung nichts Neues, sondern denselben Thatbestand wie vorher erwarten ließ, zumal da jede Wiederholung einer Strecke vermieden werden sollte. Auch ist gerade bei 717 $\mu\mu$ und 715 $\mu\mu$ die Differenz in der Skalenablesung (0,4 $\mu\mu$) so gering, dass dieser Fall als Ausnahme überhaupt nicht in Betracht kommen darf.

Außer dieser weitgehenden Bestätigung der in Tabelle IV gewonnenen Einzelzahlen hinsichtlich ihrer Anzahl, ihrer Verwerthung und ihrer Höhe ist mit diesem Versuch weiterhin, wie Tabelle IX zeigt, die unmittelbare Bestätigung von 18 der früher rechnerisch gefundenen doppelseitigen Maxima (Columne 5—7 der Tabelle IV) gewonnen. Ferner zeigt sich in der Reihenfolge der Zahlen dieser Untersuchung (vergl. Columne 1 Tabelle IX) von 575 $\mu\mu$ — 551 $\mu\mu$

derselbe Sprung, der bereits früher, als dem für die Unterschiedsempfindlichkeit für F ungünstigen hohen Helligkeitsgrade dieser Strecke des Spectrums zuzuweisen, gefunden wurde (s. S. 566). Zwei Zahlen der obigen Tabelle (1, 21, bezw. auch 8) entsprechen weiterhin vorhandenen Lücken der bisherigen Untersuchung und lassen auch hier zum wenigsten einseitige Maxima als vorhanden annehmen, wie sich dieses auch aus der Vergleichung dieser Stellen als größerer Lücken der Tabelle IV mit den Verhältnissen ihrer Nachbarschaft, wie sie die Untersuchung ergibt, als der Wahrscheinlichkeit nach zu erwarten entnehmen lässt. Nur eine Zahl (23) bietet einen und zwar starken Widerspruch, wobei vorläufig dahingestellt bleiben muss, auf welcher Seite der Irrthum liegt, oder ob individuelle Differenz und so eine Verschiebung des Werthes nach einer in Tabelle IV ausgefallenen Stelle hin anzunehmen ist. Auf jeden Fall kann man mit dem Ausfall dieser umfassenden Gegenüberstellung der beiderseitigen Versuche zufrieden sein.

Die Einwirkung von G auf die Unterschiedsempfindlichkeitsversuche macht sich in folgender Weise, wie bereits zum Theil bemerkt, geltend: Wenn man für die graphische Darstellung der Resultate als Abscissen die Schwingungszahlen, oder aber die Wellenlängen nimmt, etwa 1 mm für 1 $\mu\mu$, und als Ordinaten die Werthe der Columne ($\Delta r_o + \Delta r_u$) der Tabelle IV, in demselben Maßstabe des Millimeterpapiers, so zeigt sich, dass sich in der Nähe der Maxima dieser Ordinaten stets eine größere Anzahl gleich hoher Werthe zusammenfindet, welche sich nicht als bloßer Spielraum erklären lässt. Dasselbe zeigen die Zahlenwerthe ($\Delta r_o + \Delta r_u$), oder Δr selbst. Bei $\frac{\Delta R}{R}$ macht sich dies äußerlich nicht so geltend: Diese Werthe bieten nämlich, in Folge der Theilung in sehr viele Theile, aus Anlass der zufälligen Thatsache, dass die physikalischen Wellenlängen bereits an sich größere Werthe darstellen, denen gegenüber die zu theilenden Werthe von Δr als diejenigen der Unterschiedsschwellen sehr gering sind, von Fall zu Fall sehr große Unterschiede in der Reihenfolge der Zahlen und stellen also einen für die Vergleichung ungünstigen Maßstab dar. Bei genauerem Zusehen ist diese Erscheinung aber auch bei diesen Werthen vorhanden. Dieselbe ist in Folge des meist stattfindenden Zusammenfallens dieser Stellen mit den später in ihren

relativen Werthen mitzutheilenden Maximis von G einem ungünstigen Einflusse hohen Farbengrades auf die Aenderung von F , entweder in der Beurtheilung oder objectiv für die Aenderung des Farbentons selbst, zuzuschreiben, welche beide Momente schwer von einander zu trennen sind. Sehr geringer Farbengrad kommt hier aber vorläufig nicht in Betracht.

Die Einwirkung von H auf die Unterschiedsempfindlichkeit zeigt sich, wie erörtert, und wie auch Tabelle IX bestätigt, 1) als bedeutende Verringerung der Unterschiedsempfindlichkeit für F in den Extremen des Spectrums, augenscheinlich weil hier der geringe Helligkeitsgrad sehr ungünstig auf die Unterschiedsempfindlichkeit einwirkt; 2) in der etwas geringeren Herabsetzung der Unterschiedsempfindlichkeit in derjenigen Region des Spectrums, welche die höheren Helligkeitsgrade bietet, so dass dieselben bereits für die Unterschiedsempfindlichkeit für F nicht mehr so günstig sind, sofern nicht die auch hier vorhandene Abnahme von G in diesem Sinne wirkt, was sich hier noch nicht abschließend entscheiden lässt. In allen diesen Fällen lässt sich erst durch weitere zweckmäßige Versuchsanordnungen, unter Vergleichung und Hinzuziehen von Stichproben in regelmäßigen Abständen, Genaueres feststellen.

Dasselbe gilt für die auch an sich so wichtige Einwirkung des Contrastes, denn auch dieser muss in einen solchen für F und für G und H getrennt werden, einschließlich der vorhandenen causalen Beziehungen dieser drei Factoren; und die Frage seines Einflusses kann so in letzter Hinsicht nur mit dem Problem des Farbentones zugleich gelöst werden. Durch Vergleichung mit den wieder genau übereinander gestellten Spaltbildern, oder durch Ablendung des einen von ihnen und sodann des anderen lässt sich der Umfang der Wirkungen des Contrastes für F auf die Feststellung der eben merklichen Verschiedenheit weiterhin verfolgen, jedoch hierdurch noch nicht beseitigen. Es verwandelt sich z. B. bei diesen Versuchen, wie auch zum Theil die obigen Auszüge erkennen lassen, »Dunkeltiefroth«, durch Gegensatz zu einem verhältnissmäßig sehr nahen Rubinroth (in Folge Hinzukommens des Contrastes für H), in entschiedeneres Schwärzlichroth. Umgekehrt wird aus »Schwärzlichroth«, das man anscheinend mit gutem Rechte so nennen kann, durch Erscheinen eines mehr nach A oder selbst über A hinaus gelegenen Schwärzlichroth

mehr oder weniger Dunkeltiefroth oder Rubinroth. Ebenso wird aus einem »Tiefroth«, das man anscheinend so nennen kann, ein, wenn auch hochgradiges Orange (Gelblichroth), aus einem »Rothgelb« ein Gelbroth, aus einem »Gelb«, unter Umständen wenigstens, ein Goldgelb u. s. f. Selbst in der Nähe der Maxima von G ist der Contrast, wie die Protokolle erkennen lassen, vorhanden, wenn dabei auch zu berücksichtigen ist, dass hier größere Verschiebungen stattfanden. Augenscheinlich wird auch der Contrast in seinen Erscheinungen durch das Zusammenwirken der Umstände bedingt, entsprechend den Verhältnissen desselben für F , von dem er schwer abzutrennen ist, und für G und für H , je nach dem vorliegenden Thatbestande, von dem man ihn sich in seinen einzelnen Factoren losgelöst denken kann. Er wird gerade auf die Punkte der eben merklichen Verschiedenheit, weniger oder gar nicht auf diejenigen der Gleichheit wirken. Man könnte nun denken, dass der Contrast überhaupt im wesentlichen die Zahlen der bisherigen Tabellen bedingte, wenn hier nicht die Durchprüfung durch Anwendung nur eines Spaltes bei successiver Methode und langen Pausen zeigte, dass dann die große Fülle der Farbentöne im ganzen gleichwohl bestehen bleibt, wenn anders man nicht annehmen wollte, dass der Contrast auch hier noch aus der Reproduction heraus fortwirke. Es könnte aber hier nur möglich sein, dass der Contrast: 1) eine Verschiebung von $(r + \Delta r_o')$ oder $(r - \Delta r_u')$ oder auch beider, und so auch eine Beeinflussung des Werthes von Δr hervorbrächte, und dass er 2) eine Heraushebung anderer F über die gegebenen Schwellen erzeugte. Dass überhaupt eine neue Qualität, die sonst nicht erlebt wird, durch Contrast über die Schwelle gehoben werde, ist in keinem Sinnesgebiete möglich. Wenn hier also der Contrast als von einem F gegenüber einem anderen F wirkend gedacht wird, so muss das neue F' , das jetzt entsteht, seiner Möglichkeit nach auch unabhängig vom Contrast vorhanden sein, also im vorliegenden Falle sich entweder in einem Spectrum anderer Intensität, oder aber bei mehr oder weniger complicirter Synthese finden. Wie jedoch die angeführte Vergleichung lehrt, ist dieses beides nicht oder in geringstem Maße der Fall. Es bleibt vielmehr die große Fülle der F , G , H des Spectrums günstigster Intensität bestehen. Es kann sich also höchstens nur um eine Verschiebung handeln, die dann aber bis zu einer

gewissen Höhe hin durch Experiment und Vergleichung reducirt werden kann.

Die Ursachen für die Fülle und die verschiedene Höhe eben merklicher Verschiedenheiten an dem hier erörterten Spectrum müssen demnach in letzter Hinsicht anderswo liegen. Als solche Ursachen sind aber anzusehen: 1) Die Aenderung der Schwingungszahl an sich, mit anderen Worten die physikalische Auslösung des Farbentons überhaupt. 2) Die Wirkung, welche in dieser Hinsicht die an dem erörterten Spectrum in einem großen Spielraum sich bewegende Verschiedenheit des Farbengrades mittelbar übt. 3) Die wiederum mittelbare Wirkung der in einem großen Spielraum sich bewegenden Verschiedenheit des Helligkeitsgrades. Dazu kommt dann erst 4) die Wirkung der Verhältnisse des Contrastes, welcher sich hier abgesehen von F insbesondere auf Veränderungen von G und H bezieht, aber auch möglicher Weise nicht nur mittelbar, sondern auch unmittelbar auf F , eine Frage, die nur mit den anderen zugleich gelöst werden kann, gesetzt dass man sich hier nicht überhaupt in einem Cirkel bewegt, dem nicht vollständig zu enttrinnen ist.

Die specielle Untersuchung der Contrastverhältnisse der Spectralfarben lässt sich ausführen: 1) durch Anwendung nur eines Spaltes in verschiedenen großen Pausen; 2) durch Anwendung zweier simultaner Spalte mit nachfolgender, die Sicherheit der Resultate erhöhender Vergleichung des durch Contrast beeinflussten F mit dem nur einzeln gegebenen F , und zwar dieses einzeln für jeden der sich zum Theil wechselseitig als Contrast beeinflussenden Farbtöne.

Diese Feststellung seiner Wirkungsweise kann ebenso für die G und H der betreffenden Schwingungszahlen geschehen und ist leicht in dieser Weise an dem vorliegenden spectrometrischen Apparate durch Verdecken zu untersuchen. Um die Verhältnisse des Contrastes für die gegebenen Umstände der Versuchsanordnung nicht nur festzustellen, sondern auch thatsächlich auf ein Mindestmaß zurückzuführen, ist ferner die Länge der Zwischenzeit so zu wählen, dass sie einerseits groß genug ist, damit der Einfluss des Contrastes auf F , G , H bedeutend zurückgeht, sodann aber wiederum nicht so groß, dass sich die Wirkungen der Reproduction dabei in erheblicher Weise

einmischen können. Zweckmäßiger Weise hat man insbesondere die Punkte eben merklicher Verschiedenheit in dieser Hinsicht zu untersuchen, um dann die entsprechenden Additionen für die in Betracht kommenden Verhältnisse, und so auch für die Zahlen der Tabelle IV vollziehen zu können. Dieselben können jedoch, den früheren Erörterungen gemäß, erst dann erfolgen, wenn die Verhältnisse von G und H für das hier vorliegende Spectrum mitgetheilt sind, und haben so mit der Nachweisung der Wirkungen derselben auf F zugleich zu geschehen.

(Fortsetzung folgt.)
