

ABHANDLUNGEN

VIERUNDSECHZIGSTER BAND.

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK
DRESDEN

ABHANDLUNGEN

DER KÖNIGLICH SÄCHSISCHEN

GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.



VIERUNDSECHZIGSTER BAND.

MIT 88 TAFELN UND 52 TEXTFIGUREN.

LEIPZIG
BEI B. G. TEUBNER

1917.

ABHANDLUNGEN
DER MATHEMATISCH-PHYSISCHEN KLASSE
DER KÖNIGLICH SÄCHSISCHEN
GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN.



VIERUNDDREISSIGSTER BAND
MIT 88 TAFELN UND 52 TEXTFIGUREN.



LEIPZIG
BEI B. G. TEUBNER

1917.



173, 24

INHALT.

	Seite
Nr. 1. W. PFEFFER, Beiträge zur Kenntnis der Entstehung der Schlafbewegungen. Mit 36 Figuren im Text	I
- 2. A. VON ÖTTINGEN, Die Grundlage der Musikwissenschaft und das duale Reininstrument. Mit 2 Separattafeln und 86 Tafeln im Text . . .	155
- 3. WILHELM OSTWALD, Beiträge zur Farbenlehre. Erstes bis fünftes Stück. Mit 16 Figuren im Text	363

INHALT

1	Einleitung
2	1. Abschnitt
3	2. Abschnitt
4	3. Abschnitt
5	4. Abschnitt
6	5. Abschnitt
7	6. Abschnitt
8	7. Abschnitt
9	8. Abschnitt
10	9. Abschnitt
11	10. Abschnitt
12	11. Abschnitt
13	12. Abschnitt
14	13. Abschnitt
15	14. Abschnitt
16	15. Abschnitt
17	16. Abschnitt
18	17. Abschnitt
19	18. Abschnitt
20	19. Abschnitt
21	20. Abschnitt
22	21. Abschnitt
23	22. Abschnitt
24	23. Abschnitt
25	24. Abschnitt
26	25. Abschnitt
27	26. Abschnitt
28	27. Abschnitt
29	28. Abschnitt
30	29. Abschnitt
31	30. Abschnitt
32	31. Abschnitt
33	32. Abschnitt
34	33. Abschnitt
35	34. Abschnitt
36	35. Abschnitt
37	36. Abschnitt
38	37. Abschnitt
39	38. Abschnitt
40	39. Abschnitt
41	40. Abschnitt
42	41. Abschnitt
43	42. Abschnitt
44	43. Abschnitt
45	44. Abschnitt
46	45. Abschnitt
47	46. Abschnitt
48	47. Abschnitt
49	48. Abschnitt
50	49. Abschnitt
51	50. Abschnitt
52	51. Abschnitt
53	52. Abschnitt
54	53. Abschnitt
55	54. Abschnitt
56	55. Abschnitt
57	56. Abschnitt
58	57. Abschnitt
59	58. Abschnitt
60	59. Abschnitt
61	60. Abschnitt
62	61. Abschnitt
63	62. Abschnitt
64	63. Abschnitt
65	64. Abschnitt
66	65. Abschnitt
67	66. Abschnitt
68	67. Abschnitt
69	68. Abschnitt
70	69. Abschnitt
71	70. Abschnitt
72	71. Abschnitt
73	72. Abschnitt
74	73. Abschnitt
75	74. Abschnitt
76	75. Abschnitt
77	76. Abschnitt
78	77. Abschnitt
79	78. Abschnitt
80	79. Abschnitt
81	80. Abschnitt
82	81. Abschnitt
83	82. Abschnitt
84	83. Abschnitt
85	84. Abschnitt
86	85. Abschnitt
87	86. Abschnitt
88	87. Abschnitt
89	88. Abschnitt
90	89. Abschnitt
91	90. Abschnitt
92	91. Abschnitt
93	92. Abschnitt
94	93. Abschnitt
95	94. Abschnitt
96	95. Abschnitt
97	96. Abschnitt
98	97. Abschnitt
99	98. Abschnitt
100	99. Abschnitt
101	100. Abschnitt



BEITRÄGE ZUR FARBENLEHRE

ERSTES BIS FÜNFTES STÜCK

VON

WILHELM OSTWALD

DES XXXIV. BANDES

DER ABHANDLUNGEN DER MATHEMATISCH-PHYSISCHEN KLASSE
DER KÖNIGL. SÄCHSISCHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN

N° III

MIT 16 FIGUREN IM TEXT

LEIPZIG

BEI B. G. TEUBNER

1917

Einzelpreis 9.— Mark



ABHANDLUNGEN DER MATHEMATISCH-PHYSISCHEN KLASSE DER KGL. SÄCHSISCHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN ZU LEIPZIG

- I. BAND. (1. Bd.)* 1852. brosch. Preis *M.* 13.60.
A. F. MÖBIUS, Über die Grundformen der Linien der dritten Ordnung. Mit 1 Tafel. 1849. *M.* 2.40.
P. A. HANSEN, Auflösung eines beliebigen Systems von linearen Gleichungen. — Über die Entwicklung der Größe $(1 - 2\alpha H + \alpha^2) - \frac{1}{2}$ nach den Potenzen von α . 1849. *M.* 1.20.
A. SEEBECK, Über die Querschwingungen elast. Stäbe. 1849. *M.* 1.—
C. F. NAUMANN, Über die cyclocentrische Conchospirale u. über das Windungsgesetz von Planorbis Corneus. 1849. *M.* 1.—
W. WEBER, Elektrodynamische Maßbestimmungen (Widerstandsmessungen). 2. Abdruck. 1863. *M.* 3.—
F. REICH, Neue Versuche mit der Drehwaage. 1852. *M.* 2.—
M. W. DROBISCH, Zusätze z. Florent. Problem. Mit 1 Taf. 1852. *M.* 1.60.
W. WEBER, Elektrodynamische Maßbestimmungen (Diamagnetismus). Mit 1 Tafel. 2. Abdruck. 1867. *M.* 2.—
- II. BAND. (4. Bd.) 1855. brosch. Preis *M.* 20.—
M. W. DROBISCH, Über musikalische Tonbestimmung und Temperatur. Mit 1 Tafel. 1852. *M.* 3.—
W. HOFMEISTER, Beiträge zur Kenntniss der Gefäßkryptogamen. I. Mit 18 Tafeln. 1852. *M.* 4.—
P. A. HANSEN, Entwicklung des Produkts einer Potenz des Radius Vectors mit dem Sinus oder Cosinus eines Vielfachen der wahren Anomalie in Reihen, die nach den Sinussen oder Cosinussen der Vielfachen der wahren, excentrischen oder mittleren Anomalie fortschreiten. 1853. *M.* 3.—
— Entwicklung der negativen und ungraden Potenzen der Quadratwurzel der Function $r^2 + r'^2 - 2rr'$ ($\cos U \cos U' + \sin U \sin U' \cos J$). 1854. *M.* 3.—
O. SCHLÖMILCH, Über die Bestimmung der Massen und der Trägheitsmomente symmetrischer Rotationskörper von ungleichförmiger Dichtigkeit. 1854. *M.* —.80.
— Über einige allgemeine Reihenentwicklungen und deren Anwendung auf die elliptischen Funktionen. 1854. *M.* 1.60.
P. A. HANSEN, Die Theorie des Äquatoreals. 1855. *M.* 2.40.
C. F. NAUMANN, Über die Rationalität der Tangenten-Verhältnisse tautozonaler Krystallflächen. 1855. *M.* 1.—
A. F. MÖBIUS, Die Theorie der Kreisverwandtschaft in rein geometrischer Darstellung. 1855. *M.* 2.—
- III. BAND. (5. Bd.) 1857. brosch. Preis *M.* 19.20.
M. W. DROBISCH, Nachträge zur Theorie der musikalischen Tonverhältnisse. 1855. *M.* 1.20.
P. A. HANSEN, Auseinandersetzung einer zweckm. Methode z. Berechn. d. absoluten Störungen d. klein. Planeten. 1. Abhdlg. 1856. *M.* 5.—
R. KOHLRAUSCH und W. WEBER, Elektrodynamische Maßbestimmungen, insbesondere Zurückführung der Stromintensitätsmessungen auf mechanisches Maß. 2. Abdruck. 1889. *M.* 1.60.
H. D'ARREST, Resultate aus Beobachtungen der Nebelflecken und Sternhaufen. Erste Reihe. 1856. *M.* 2.40.
W. G. HANKEL, Elektr. Untersuchungen. 1. Abhdlg.: Üb. d. Mess. d. atmosph. Elektrizität nach absol. Maße. Mit 2 Taf. 1856. *M.* 6.—
W. HOFMEISTER, Beiträge zur Kenntnis der Gefäßkryptogamen. II. Mit 13 Tafeln. 1857. *M.* 4.—
- IV. BAND. (6. Bd.) 1859. brosch. Preis *M.* 22.50.
P. A. HANSEN, Auseinandersetzung e. zweckmäßig. Methode z. Berechn. d. absoluten Störungen d. klein. Planeten. 2. Abhdlg. 1875. *M.* 4.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 2. Abhdlg.: Über die thermo-elektrischen Eigenschaften des Boracites. 1857. *M.* 2.40.
— Elektrische Untersuchungen. 3. Abhdl.: Über Elektrizitätserregung zwischen Metallen und erhitzten Salzen. 1858. *M.* 1.60.
P. A. HANSEN, Theorie der Sonnenfinsternisse und verwandten Erscheinungen. Mit 2 Tafeln. 1858. *M.* 6.—
G. T. FECHNER, Über ein wichtiges psychophysikalisch. Grundgesetz u. dessen Beziehung zur Schätzung der Sterngrößen. 1858. *M.* 2.—
W. HOFMEISTER, Neue Beiträge zur Kenntnis der Embryobildung der Phanerogamen. I. Dikotyledonen m. ursprüngh. einzelligem, nur durch Zellteilung wachsend. Endosperm. Mit 27 Taf. 1859. *M.* 8.—
- V. BAND. (7. Bd.) 1861. brosch. Preis *M.* 24.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 4. Abhdlg.: Über das Verhalten d. Weingeistflamme in elektr. Beziehung. 1859. *M.* 2.—
P. A. HANSEN, Auseinandersetzung einer zweckm. Methode z. Berechn. d. absoluten Störungen d. klein. Planeten. 3. Abhdlg. 1859. *M.* 7.20.
G. T. FECHNER, Üb. ein. Verh. d. binocular. Sehens. 1860. *M.* 5.60.
G. METTENIUS, 2 Abhdlgen: I. Beiträge zur Anatomie d. Cycadeen. Mit 5 Taf. II. Über Seitenknospen bei Farnen. 1860. *M.* 3.—
W. HOFMEISTER, Neue Beiträge zur Kenntnis der Embryobildung d. Phanerogamen. II. Monokotyledonen. Mit 25 Taf. 1861. *M.* 8.—
- VI. BAND. (9. Bd.) 1864. brosch. Preis *M.* 19.20.
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 5. Abhdl.: Maßbestimmungen der elektromotor. Kräfte. 1. Teil. 1861. *M.* 1.60.
— Messungen über die Absorption der chemischen Strahlen des Sonnenlichtes. 1862. *M.* 1.20.
P. A. HANSEN, Darlegung der theoretischen Berechnungen der in den Mondtafeln angewandten Störungen. 1. Abhdl. 1862. *M.* 9.—
G. METTENIUS, Üb. d. Bau v. Angiopteris. Mit 10 Taf. 1863. *M.* 4.40.
W. WEBER, Elektrodynamische Maßbestimmungen, insbesondere über elektrische Schwingungen. 1864. *M.* 3.—
- VII. BAND. (11. Bd.) 1865. brosch. Preis *M.* 17.—
P. A. HANSEN, Darlegung der theoretischen Berechnung der in den Mondtafeln angewandten Störungen. 2. Abhdl. 1864. *M.* 9.—
G. METTENIUS, Über d. Hymenophyllaceae. Mit 5 Taf. 1864. *M.* 3.60.
P. A. HANSEN, Relationen einestheils zwischen Summen u. Differenzen u. andernteils zwischen Integralen u. Differentialen. 1865. *M.* 2.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 6. Abhdl.: Maßbestimmungen der elektromotor. Kräfte. 2. Teil. 1865. *M.* 2.80
- VIII. BAND. (13. Bd.) 1869. brosch. Preis *M.* 24.—
P. A. HANSEN, Geodätische Untersuchungen. 1865. *M.* 5.60
— Bestimmung des Längenunterschiedes zwischen den Sternwarten zu Gotha und Leipzig, unter seiner Mitwirkung ausgeführt von Dr. Auwers und Prof. Bruhns im April des Jahres 1865. Mit 1 Figurentafel. 1866. *M.* 2.80.
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 7. Abhdl.: Über die thermoelektr. Eigensch. d. Bergkrystalles. M. 2 Taf. 1866. *M.* 2.40.
P. A. HANSEN, Tafeln der Egeria mit Zugrundelegung der in den Abhandlungen der K. S. Ges. d. Wissenschaften in Leipzig veröffentlichten Störungen dieses Planeten berechnet und mit einleitenden Aufsätzen versehen. 1867. *M.* 6.80.
— Von der Methode der kleinsten Quadrate im Allgemeinen und in ihrer Anwendung auf die Geodäsie. 1867. *M.* 6.—
- IX. BAND. (14. Bd.) 1871. brosch. Preis *M.* 18.—
P. A. HANSEN, Fortgesetzte geodätische Untersuchungen, bestehend in zehn Supplementen zur Abhandlung von der Methode der kleinsten Quadrate im Allgemeinen und in ihrer Anwendung auf die Geodäsie. 1868. *M.* 5.40.
— Entwicklung e. neuen veränd. Verfahrens zur Ausgleichung e. Dreiecksnetzes mit besond. Betracht. d. Falles, in welchem gewisse Winkel vorausbestimmte Werte bekommen sollen. 1869. *M.* 3.—
— Supplement zu den geodätischen Untersuch. benannten Abhdlg. die Reduktion d. Winkel ein. sphäroid. Dreiecks betr. 1869. *M.* 2.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 8. Abhdl.: Über die thermoelektr. Eigensch. des Topases. Mit 4 Tafeln. 1870. *M.* 2.40.
P. A. HANSEN, Bestimmung d. Sonnenparallaxe durch Venusvorübergänge vor d. Sonnenscheibe mit besond. Berücksichtig. d. i. J. 1874 eintreffenden Vorüberganges. Mit 2 Planigloben. 1870. *M.* 3.—
G. T. FECHNER, Zur experiment. Ästhetik. 1. Teil. 1871. *M.* 2.—
- X. BAND. (15. Bd.) 1874. brosch. Preis *M.* 21.—
W. WEBER, Elektrodynamische Maßbestimmungen, insbesondere über das Prinzip der Erhaltung der Energie. 1871. *M.* 1.60.
P. A. HANSEN, Untersuchungen des Weges eines Lichtstrahls durch eine belieb. Anzahl v. brechenden sphär. Oberflächen. 1871. *M.* 3.60.
C. BRUHNS und E. WEISS, Bestimmung der Längendifferenz zwischen Leipzig und Wien. 1872. *M.* 2.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 9. Abhdl.: Über die thermoelektr. Eigensch. d. Schwerspathes. M. 4 Taf. 1872. *M.* 2.—
— Elektrische Untersuchungen. 10. Abhdl.: Über die thermoelektr. Eigenschaften des Aragonites. Mit 3 Tafeln. 1872. *M.* 2.—
C. NEUMANN, Über die den Kräften elektrodynamischen Ursprungs zuzuschreibenden Elementargesetze. 1873. *M.* 3.80.
P. A. HANSEN, Von der Bestimmung der Teilungsfehler eines gradlinigen Maßstabes. 1874. *M.* 4.—
— Über d. Darstellung d. grad. Aufsteigens u. Abweichens d. Mondes in Funktion d. Länge in d. Bahn u. d. Knotenlänge. 1874. *M.* 1.—
— Dioptr. Untersuchungen mit Berücksicht. d. Farbenzerstreuung u. d. Abweich. wegen Kugelgestalt. 2. Abhdlg. 1874. *M.* 2.—
- XI. BAND. (18. Bd.) 1878. brosch. Preis *M.* 21.—
G. T. FECHNER, Üb. d. Ausgangswert d. kleinst. Abweichungssumme, dess. Bestimmung, Verwendung und Verallgemein. 1874. *M.* 2.—
C. NEUMANN, Über das von Weber für die elektrischen Kräfte aufgestellte Gesetz. 1874. *M.* 3.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 11. Abhdlg.: Über die thermoelektrischen Eigenschaften des Kalkspathes, des Berylls, des Idocrases und des Apophyllites. Mit 3 Tafeln. 1875. *M.* 2.—
P. A. HANSEN, Über die Störungen der großen Planeten, insbesondere des Jupiter. 1875. *M.* 6.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 12. Abhdlg.: Über die thermoelektrischen Eigenschaften des Gypses, des Diopsids, des Orthoklases, des Albits u. des Periklins. Mit 4 Taf. 1875. *M.* 2.—
W. SCHEIBNER, Dioptrische Untersuchungen, insbesondere über das Hansensche Objektiv. 1876. *M.* 3.—
C. NEUMANN, Das Webersche Gesetz bei Zugrundelegung der unitarischen Anschauungsweise. 1876. *M.* 1.—
W. WEBER, Elektrodynam. Maßbestimmungen, insbesondere über die Energie der Wechselwirkung. Mit 1 Tafel. 1878. *M.* 2.—
- XII. BAND. (20. Bd.) 1883. brosch. Preis *M.* 22.—
W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 13. Abhdlg.: Über die thermoelektrischen Eigenschaften des Apatits, Brucits, Coelestins, Prehnits, Natroliths, Skolezits, Datoliths und Axinit. Mit 3 Tafeln. 1878. *M.* 2.—
W. SCHEIBNER, Zur Reduktion elliptischer Integrale in reeller Form. 1879. *M.* 5.—
— Supplement zur Abhandlung über die Reduktion elliptischer Integrale in reeller Form. 1880. *M.* 1.50.
W. G. HANKEL, Elektr. Untersuchungen. 14. Abhdlg.: Über d. photo- u. thermoelektr. Eigensch. d. Flußspathes. Mit 3 Taf. 1879. *M.* 2.—

*) Die eingeklammerten Ziffern geben die Zahl des Bandes in der Reihenfolge der Abhandlungen beider Klassen an.

BEITRÄGE ZUR FARBENLEHRE

ERSTES BIS FÜNFTES STÜCK

VON

WILHELM OSTWALD

DES XXXIV. BANDES

DER ABHANDLUNGEN DER MATHEMATISCH-PHYSISCHEN KLASSE
DER KÖNIGL. SÄCHSISCHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN

N° III

LEIPZIG

BEI B. G. TEUBNER

1917



ZUR FARBENTHEORE BEITRÄGE

ERSTES BIS FÜNFTES STÜCK

VON

WILHELM OSTWALD

Vorgetragen für die Abhandlungen am 1. Mai 1916.

Das Manuskript eingelefert am 1. Mai 1916.

Der letzte Bogen druckfertig erklärt am 9. Juli 1917.

N. III

LEIPZIG
BEIRIGER VERLAG

1917



Inhaltsverzeichnis.

	Seite		Seite
I. Stück. Vorbemerkungen .	365	26. Biologische Ausschaltung der Lichtstärke	384
1. Subjektive Voraussetzungen .	365	27. Erklärung der bezugsfreien Farben	385
2. Zustand der Farbenlehre . .	365	28. Biologische Faktoren	386
3. Der Farbenatlas	366	29. Bezogene Farben	388
4. Organisatorisches	367	30. Unbewußte Schlüsse	389
5. Ergebnisse	368		
6. Stil der Arbeit	368	III. Stück. Photometrie der unbunten Körperfarben .	391
		31. Die ideal weiße Fläche	391
II. Stück.		32. Physikalische Bedingungen . .	392
Mathetik der Farbenlehre .	370	33. Herstellung	393
7. Definition	370	34. Korngröße	393
8. Die Pyramide der Wissenschaften	371	35. Untere Grenze	394
9. Beziehung der Einzelwissenschaften zueinander	372	36. Einfluß der Lichtbrechung . .	394
10. Unterteilung	372	37. Ergebnis	394
11. Die Stellung der Farbenlehre .	373	38. Bindemittel	395
12. Ordnung der Farbenlehre . .	374	39. Das Normalweiß	397
13. Spezielle Mathetik der Farbenlehre	375	40. Das Halbschatten-Photometer .	398
14. Die Hauptbegriffe der Farbenlehre und das Wort Farbe	375	41. Technische Einzelheiten . . .	399
15. Der Sprachgebrauch	376	42. Der Stellspalt	401
16. Licht	377	43. Die Beleuchtung	402
17. Farbstoffe	377	44. Subjektive Vorsichtsmaßregeln .	404
18. Der physiologische Teil . . .	378	45. Das Substitutionsverfahren . .	407
19. Der psychologische Begriff Farbe	378	46. Normalweiß	408
20. Farbe und Form	380	47. Schnee als Normalweiß	411
21. Der Mannigfaltigkeitscharakter der Farben	380	48. Andere weiße Pigmente	412
22. Das zweifaltige Farbensystem .	381	49. Das ideale Schwarz	415
23. Nichtexistenz des bezugsfreien Grau	382	50. Das Fechnersche Gesetz	417
24. Die bezugsfreien Farben . . .	382	51. Das mittlere Grau	419
25. Ältere Irrtümer und Unzulänglichkeiten	383	52. Das logarithmische Photometer .	420
		53. Die Grauleiter	420
		54. Das neutrale Grau	422
		55. Ausgangsmaterial	424
		56. Das Bindemittel	425
		57. Träger und Auftrag	428
		58. Einfluß des Reibens	430

a*

	Seite		Seite
59. Einfluß der Feuchtigkeit	433	94. Das Urgelb	483
60. Neutralschwarz	434	95. Das Urrot	484
61. Bestimmung der Mischungsverhältnisse	435	96. Die spektrale Lücke im Farbenkreise	486
62. Die Grauskala mit Lithopon	436	97. Farbenkreis und Wellenlängen	488
63. Die Grauleiter als Photometer	442	98. Zusammenfassung	490
64. Die endgültige Anordnung der Schwarz-Weiß-Skala	446	99. Die drei Verdickungen	491
65. Unterteilung der Grundreihe	448	100. Der Farbenweiser	492
IV. Stück. Gesättigte Farben	453	V. Stück. Reinheit und Grau	495
66. Farbe und Wellenlänge	453	101. Allgemeine Begriffsbestimmung	495
67. Farben und Töne	454	102. Die drei Veränderlichen	495
68. Weißes Licht	454	103. Die Farbenmischung	497
69. Veränderlichkeit des Sonnenlichtes	456	104. Der Farbenkreisel	499
70. Homogenes Licht	456	105. Die Drehscheibe	500
71. Der Farbenkreis	458	106. Der Polarisationsfarbemischer	502
72. Die Stetigkeit der Farbtonreihe	460	107. Die isochrome Gruppe	506
73. Anzahl der Farbtöne	461	108. Das Schwarz in der „reinen“ Farbe	508
74. Grad der erreichten Ordnung	461	109. Mischungen mit Schwarz	508
75. Der Anfangspunkt	462	110. Namen gemischter Farben	509
76. Der Drehungssinn	463	111. Reinste Farben	509
77. Willkürliche Bestimmungen	463	112. Konzentration und Farbreinheit	510
78. Farbenmischung	464	113. Quantitative Neutralisation	511
79. Gegenfarben	465	114. Charakter der reinsten Farben	512
80. Das Stetigkeitsgesetz der Mischung	466	115. Herstellung reinster Farben	514
81. Additive Mischung	467	116. Basische und saure Farbstoffe	515
82. Hauptpunkte der additiven Mischung	468	117. Farblacke	515
83. Subtraktive Mischung	468	118. Theorie der Füllfarben	517
84. Die Symmetrie im Farbenkreise	470	119. Lithopon als Träger	519
85. Die spektrale Zusammensetzung gesättigter Farben	471	120. Die Fällung	520
86. Gelbe Farben	472	121. Die Konzentration reinster Farbe	521
87. Störungen der Reinheit	474	122. Mischen mit Weiß	522
88. Gesättigtes Rot	475	123. Rezepte	523
89. Vorläufige Definition der gesättigten Farben	476	124. Bindemittel	524
90. Die Ergänzungsfarbe im Spektrum	478	125. Relative Sättigung der Ergänzungsfarben	526
91. Graphische Darstellung	479	126. Vermutung über die Reinheit der Einzelfarben	530
92. Der resultierende Farbton	482	127. Anwendungen	531
93. Vorläufige Ordnung des Farbenkreises	482	128. Der Weg zum absoluten Maße	533
		129. Absolute Reinheitsmessung	534

	Seite		Seite
130. Das Grau	535	144. Fehlermöglichkeiten	552
131. Das Additions-gesetz	537	145. Filterpigmente	553
132. Der absolute Charakter der Reinheit und des Grau	538	146. Bestimmung der Konzentra- tion und Kombination	557
133. Ideale Grenzfälle	540	147. Vorschriften	558
134. Praktische Fälle	541	148. Reinheitsbestimmungen im Farbenkreise	559
135. Die Anwendung von Licht- filtern	542	149. Reinheitsverhältnisse der Er- gänzungsfarben	565
136. Vorarbeiten zu den Lichtfil- tern	543	150. Vergleich mit den Neutrali- sationsverhältnissen	566
137. Flüssige Filter	544	151. Quantitativer Vergleich	567
138. Feste Lichtfilter	545	152. Ausschaltung individueller Einflüsse	569
139. Die Farbstoffe	548	153. Der unbunte Anteil	570
140. Methodik der Einstellung	549	154. Das allgemeine Verfahren der Chromometrie	571
141. Verkitten	549		
142. Beleuchtung	550		
143. Meßverfahren	551		

WILHELM OSTWALD

130	Das Ganze	235
131	Das Additionsgesetz	237
132	Der absolute Charakter der	238
133	Heiligkeit von der	240
134	Idiale Gleichheit	241
135	Praktische Fälle	242
136	Die Anwendung von Licht	243
137	Flügel	244
138	Vorarbeiten zu den	245
139	tern	246
140	Praktische Fälle	247
141	Praktische Fälle	248
142	Die praktische	249
143	Methodik der	250
144	Verfahren	251
145	Beobachtung	252
146	Methodik	253
147	Methodik	254
148	Methodik	255
149	Methodik	256
150	Methodik	257
151	Methodik	258
152	Methodik	259
153	Methodik	260
154	Methodik	261
155	Methodik	262
156	Methodik	263
157	Methodik	264
158	Methodik	265
159	Methodik	266
160	Methodik	267
161	Methodik	268
162	Methodik	269
163	Methodik	270
164	Methodik	271
165	Methodik	272
166	Methodik	273
167	Methodik	274
168	Methodik	275
169	Methodik	276
170	Methodik	277
171	Methodik	278
172	Methodik	279
173	Methodik	280
174	Methodik	281
175	Methodik	282
176	Methodik	283
177	Methodik	284
178	Methodik	285
179	Methodik	286
180	Methodik	287
181	Methodik	288
182	Methodik	289
183	Methodik	290
184	Methodik	291
185	Methodik	292
186	Methodik	293
187	Methodik	294
188	Methodik	295
189	Methodik	296
190	Methodik	297
191	Methodik	298
192	Methodik	299
193	Methodik	300
194	Methodik	301
195	Methodik	302
196	Methodik	303
197	Methodik	304
198	Methodik	305
199	Methodik	306
200	Methodik	307

Erstes Stück.
Vorbemerkungen.
Subjektive Voraussetzungen. Die Probleme der Psychologie.
Erstes bis Fünftes Stück.

BEITRÄGE ZUR FARBENLEHRE

ERSTES BIS FÜNFTES STÜCK

VON

WILHELM OSTWALD

NUR FARBENLEHRE
BEITRÄGE

ERSTES BIS FÜNFTES STÜCK

VON

WILHELM OSTWALD

Erstes Stück.

Vorbemerkungen.

1. Subjektive Voraussetzungen. Die Probleme der Farbenlehre beschäftigen mich bereits seit vielen Jahren. Zunächst befindet sich in meinem psychischen Komplex ein stark betontes visuelles Element, verbunden mit einem entsprechenden Gedächtnis, demzufolge die farbigen Naturerscheinungen von jeher meine lebhafteste Aufmerksamkeit erregten und zu einer ausgedehnten Sammlung chromatischer Anschauungen und Erinnerungen Veranlassung gaben. Die aktive Form dieses Interesses betätigte sich zunächst in der Gestalt künstlerischer Versuche auf dem Gebiete der Malerei, die, wenn sie auch keinen andern Erfolg mit sich brachten, doch weiterhin eine umfangreiche experimentelle Erfahrung über die Technik der Pigmente, die Herstellung abgetönter und zwischenliegender Farben durch Mischung sowie über die gegenseitige Beeinflussung farbiger Flächen bei gemeinsamer Betrachtung ergaben.

Ein anderes stark betontes Element des gleichen Komplexes, die Neigung zu allgemeiner und zusammenfassender Begriffsbildung, mußte über kurz oder lang dahin wirken, daß die Betätigung im Farbengebiete von der primitiven künstlerischen Stufe auf die höhere der wissenschaftlichen Bearbeitung überging.

2. Zustand der Farbenlehre. Das Studium der entsprechenden Literatur ergab sehr bald, daß die Farbenlehre als Wissenschaft sich in einem noch recht unbefriedigenden Zustande befindet. Der bahnbrechende Forscher auf diesem Gebiete, HELMHOLTZ, hat entsprechend der allgemeinen Beschaffenheit seiner Begabung das ganze Problem unverhältnismäßig viel mehr als Physiker, denn als Physiolog empfunden, aufgefaßt und durchgeführt. Daher konnte trotz erheblicher Fortschritte im einzelnen doch von einer befriedigenden Gesamtdarstellung der Grundzüge einer allgemeinen Farbenlehre nicht die Rede sein. Auch der sehr erhebliche Fort-

schritt über den von HELMHOLTZ erreichten Standpunkt hinaus, den E. HERING durch seine im Anschluß an GOETHE das *psychophysische* Element viel stärker betonende Bearbeitung der Farbenlehre bewerkstelligte, hatte dennoch eine große Anzahl Fragen, namentlich solche methodischer und quantitativer Natur, der Zukunft zur Bearbeitung übergeben. Beide Forscher scheinen im übrigen einigermaßen durch den Umstand bezüglich ihrer Fortschritte eingeschränkt worden zu sein, daß keinem von ihnen die technische Handhabung der Pigmente von rein empirischer Seite her geläufig war. So war eine experimentelle Bearbeitung jener Seite des Gebietes, welche zu einer praktisch durchführbaren *Systematik aller möglichen Farben* hätte führen sollen (die doch unzweifelhaft die Grundlage jeder rationellen Farbenlehre bilden muß), von vornherein ausgeschlossen.

3. Der Farbenatlas. Diese Aufgabe, die Herstellung eines „Farbenatlas“ in Gestalt konkreter Aufstriche, um die Mannigfaltigkeit aller möglichen Farben, wenn auch nicht zu erschöpfen, so doch zu kennzeichnen, blieb vielmehr eine Arbeit, die von ganz anderer Seite verfolgt wurde. Maler und Techniker sind es vorwiegend gewesen, welche hierfür die entscheidenden Anregungen gegeben und die tatsächlich durchgeführten Versuche angestellt hatten. Die Geschichte dieser Bemühungen, die mit LAMBERT beginnen und über RUNGE, CHEVREUL, RADDE und andere bis zu den Arbeiten von MUNSELL und der Farbtonkarte von BAUMANN-PRASE geführt haben, läßt aber deutlich erkennen, wie unmöglich die praktische Ausführung einer solchen Aufgabe ist, solange die wissenschaftlichen Grundlagen für eine rationelle Systematik der Farben noch nicht methodisch geschaffen und experimentell erprobt sind. So hat es sich bei diesen Bemühungen immer nur um gefühlsmäßige Schätzungen ohne aufweisbare und kontrollierbare Grundlagen gehandelt. So verdienstlich und wertvoll manche von diesen Leistungen sind, so wenig lebensfähig haben sie sich sämtlich auf die Dauer erwiesen, weil eben das eigentliche Lebens-
element jeder derartigen Unternehmung, die eindeutige wissenschaftliche Bestimmtheit der Grundlagen, überall gefehlt hat.

Dazu kommt, daß diese Praktiker leider keineswegs völlig unabhängig von theoretischen Vorstellungen gearbeitet haben. Die von ihnen fast allgemein benutzte Theorie von den drei Hauptfarben Rot, Gelb und Blau und den drei sekundären Mischfarben

Grün, Violett und Orange ist zweifellos falsch, wie das zuerst von HELMHOLTZ nachgewiesen worden ist, da die angenommenen Ergänzungsfarben gar nicht diesen Charakter haben. Weder aus Rot und Grün, noch aus Violett und Gelb, noch endlich aus Orange und Blau läßt sich ein neutrales Grau ermischen, während doch immer wieder die Annahme gemacht wurde, daß die genannten Paare wahre Ergänzungsfarben seien.

4. Organisatorisches. So stellte sich allseitig auf das deutlichste heraus, daß die Farbenlehre trotz ihrer praktischen Wichtigkeit und ihres sehr erheblichen theoretischen Interesses überall noch einer eindringenden wissenschaftlichen Bearbeitung harret, für welche sowohl die experimentellen, wie die begrifflichen Möglichkeiten nach meiner Überzeugung vorhanden waren. Hierzu kamen dann noch die Probleme der wissenschaftlichen Methodik, die mich von ganz anderer Seite her beschäftigt hatten, aber eine unmittelbare Anwendung auf die Aufgaben der Farbenlehre ermöglichen und somit fordern. Ausschlaggebend wirkte endlich die auf der Cölner Werkbund-Ausstellung von 1914 so überaus umfassend zusammengestellte *Farbenschau*, in welcher die ungeheure Mannigfaltigkeit und die mächtige Wirkung farbiger Erscheinungen auf das eindruckvollste zur Geltung kamen. Die führenden Persönlichkeiten des Deutschen Werkbundes ließen sich alsbald überzeugen, daß eine methodische Bearbeitung der Farbenlehre für die Bestrebungen ihrer Vereinigung von maßgebender Bedeutung werden konnte und gewährten mir das Vertrauen, mir die Leitung einer entsprechenden Unternehmung zu übergeben.

Der alsbald eintretende Krieg verhinderte die ursprünglich geplante Organisation einer internationalen Gruppe von Interessenten und Fachleuten und ließ mir nur den Weg persönlicher Arbeit offen, die ich ohnedies bereits seit einigen Jahren beschritten hatte. Hierbei wurde ich von einzelnen Personen und Anstalten durch Mitteilung von Erfahrungen und von Materialien unterstützt, wofür ich bereits an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte. So verdanke ich Herrn Dr. KRAIS in Tübingen die Mitteilung sehr wertvoller technischer Erfahrungen über die Pigmente, sowie einer Anzahl chemischer Fabriken, insbesondere der Aktiengesellschaft für Anilinfabrikation in Berlin, den Farbwerken vorm. Bayer in Leverkusen und der Badischen Anilin- und Sodafabrik in Ludwigshafen wertvolle Unterstützung durch Mitteilung von Farbstoffen

und anderen damit im Zusammenhang stehenden Materialien, wozu auch noch Rezepte und technische Winke für deren Anwendung kommen.

5. Ergebnisse. Auf solche Weise wurde ich dazu geführt, die verschiedenen Seiten des ausgedehnten Problems experimentell zu behandeln. Die gleichzeitig einsetzende begriffliche Arbeit ergab die Möglichkeit, eine nicht unerhebliche Anzahl von Fragen zu beantworten, welche die gleichzeitige Anwendung technischer, künstlerischer, chemischer, physikalischer und psychophysischer Denk- und Experimentiermittel erfordern. Es ist auf diesem Wege gelungen, einerseits die bereits vorhandenen Grundlagen der Farbenlehre zu erweitern und zu befestigen, andererseits dort, wo solche noch nicht vorhanden oder irrtümlich angenommen waren, neue und wie ich annehme zweckentsprechende zu finden und auszubauen.

Die Gesamtheit der beobachteten Tatsachen und gebildeten Begriffe ist inzwischen so umfangreich geworden, daß ihre Mitteilung an die interessierten Kreise gerechtfertigt erscheint. Insbesondere glaube ich gegenwärtig sagen zu dürfen, daß die Hauptprobleme, auf welche die Aufgabe einer rationellen Farbensystematik führt, nunmehr experimentell wie begrifflich soweit als gelöst betrachtet werden können, daß sich auf diesen Grundlagen die Farbenlehre mit einiger Abrundung darstellen läßt.

Es ist demgemäß beabsichtigt, in einer Reihe von Mitteilungen unter dem gemeinsamen Titel „Beiträge zur Farbenlehre“ denjenigen Teil der gedachten Arbeiten darzustellen, welcher zu dieser Grundlegung und zu der Entwicklung ihrer unmittelbarsten Anwendungen geführt hat. Hierbei wird ein mehrfacher Zweck verfolgt. Erstens die Mitteilung der gefundenen Gesetze und Beziehungen an die Fachgenossen zum Zweck, eine Nachprüfung und gegebenenfalls Erweiterung oder Verbesserung des Gefundenen anzuregen. Sodann aber sollen die sehr zahlreichen Punkte bezeichnet werden, an denen eine genauere und ausgedehntere quantitative Untersuchung schon gegenwärtig mit erheblichem Nutzen für die Förderung des Problems einsetzen kann.

6. Stil der Arbeit. Die zunächst zu leistende Arbeit war auf diesem Gebiete natürlich in erster Linie die Ermittlung der *Grundzüge*, wobei die Ökonomie der wissenschaftlichen Forschung eine auf möglichste Steigerung der Genauigkeit gerichtete

Bemühung zunächst verbot. Denn abgesehen von dem über menschliches Maß hinausgehenden Zeitaufwande, den eine derartige Technik beansprucht haben würde, hat die Erfahrung bezüglich der Entwicklung neuer wissenschaftlicher Gebiete immer wieder gezeigt, daß es tatsächlich nicht möglich ist, bei einer derartigen ersten Erforschung alsbald auch solche Faktoren zureichend zu erkennen und zu kontrollieren, von denen die quantitativen Verhältnisse zwar nicht in der Hauptsache bestimmt, wohl aber in der zweiten Genauigkeitsschicht beeinflußt werden. So hätten beispielsweise BOYLE und GAY-LUSSAC ihre Gasgesetze nicht aufstellen können, wenn sie ihre Messungen mit einer Genauigkeit von 1:1000 durchgeführt hätten, da in diesem Gebiet bereits die Abweichungen von den einfachen Gesetzen merklich werden. Ebenso wäre hier zwecklos gewesen, alsbald den Versuch zu machen, die Fehlergrenzen der ersten Pionierarbeit um ein erhebliches einzuschränken, bevor alle maßgebenden Beziehungen festgestellt waren. Weiterhin war mir persönlich eine gewisse Ökonomie in dieser Richtung durch den Umstand auferlegt, daß meine Augen, die fast durch ein halbes Jahrhundert angestregten Dienst im Interesse der Wissenschaft getan hatten, eine derart unbekümmerte Beanspruchung, wie ich sie früher gewöhnt war, nicht mehr gestatten, während doch die Erhaltung ihrer Arbeitsfähigkeit zwecks Abrundung der begonnenen Arbeit wünschenswert erschien. Immerhin wird man sich wie ich hoffe überzeugen, daß trotz dieser sachlichen und persönlichen Einschränkungen die unzweideutige Feststellung der Grundverhältnisse überall möglich gewesen ist.

Zweites Stück.

Mathetik der Farbenlehre.

7. **Definition.** Mit dem Namen Mathetik soll weiterhin das gesamte Gebiet der Ordnungswissenschaften, also nach bisheriger Benennung Logik, Mathematik und Geometrie bezeichnet werden. Die Notwendigkeit einer solchen Begriffsbildung ist durch gewisse neue Untersuchungen, welche auf dem Zwischengebiete zwischen Logik und Mathematik liegen, sowie durch die Bedürfnisse der wissenschaftlichen Forschung selbst auf allen Gebieten immer deutlicher in die Erscheinung getreten. Sie ist im wesentlichen dadurch bedingt, daß die Mathematik es nur mit *Größen* zu tun hat, welche gewissen Gesetzen unterliegen, die zwar sehr allgemein sind, aber doch nicht für *alle* quantitativ unterscheidbaren Dinge Geltung haben, wie insbesondere das assoziative und kommutative Gesetz für die Bildung zusammengesetzter Werte. Insbesondere auf den Gebieten der Physiologie und Psychologie, wohin die Farbenlehre gehört, ist die Notwendigkeit eines allgemeineren Begriffes als der Größe auf das deutlichste zutage getreten und der Fortschritt hat sich an vielen Stellen als unmittelbar bedingt durch eine vorangegangene Untersuchung über den Mannigfaltigkeitscharakter der maßgebenden Werte gezeigt. Da andererseits die Schlüsse auf dem Gebiete der Mathematik ausnahmelos unter Anwendung gewisser logischer Prinzipien vollzogen werden, so ist dadurch grundsätzlich das Vorhandensein von Naturgesetzen erwiesen, welche von allgemeinerer Beschaffenheit sind, als die der Mathematik zugehörigen.

Demgemäß haben die mathetischen Untersuchungen zur Farbenlehre zunächst festzustellen, an welchen Punkt der Pyramide der Wissenschaft die Farbenlehre gehört. Sodann sind die daraus sich ergebenden Konsequenzen in bezug auf die Unterteilung der gesamten Disziplin zu ziehen. Andererseits stellt die spezielle

Mathetik der Farbenlehre die Aufgabe, die für diese Wissenschaft grundlegenden Begriffe und ihren Mannigfaltigkeitscharakter festzustellen und ferner zu untersuchen, nach welchen Gesetzen sich diese Begriffe zu komplexeren Gedankenbildungen vereinigen.

8. Die Pyramide der Wissenschaften. Da die grundlegende Einteilung sämtlicher vorhandenen und möglichen Wissenschaften, wie sie von COMTE der Hauptsache nach entworfen, von mir in einigen wichtigen Punkten vervollständigt worden ist, noch nicht allgemein angenommen, ja kaum denjenigen, die es angeht, bekannt ist, so besteht die Notwendigkeit, diese fundamentale Angelegenheit wiederholt von neuem auseinanderzusetzen, bis jener Zustand erreicht ist, in welchen man sie als wissenschaftlich feststehend und demgemäß allgemein rezipiert ansehen darf.

Gemäß der ganz allgemeinen Beziehung zwischen Inhalt und Umfang der *Begriffe* (die das Material aller Wissenschaften bilden) läßt sich ein System aufbauen, welches mit der Wissenschaft beginnt, deren Begriffe den größten Umfang und infolgedessen den kleinsten Inhalt haben, worauf stufenweise diejenigen „höheren“ Wissenschaften folgen, bei denen die Begriffe zunehmend geringeren Umfang und reicheren Inhalt annehmen. Hierbei besteht ein einseitiges oder *transitives* Verhältnis (man erkennt, wie notwendig die Begriffe der Mathetik, zu deren wichtigsten der Begriff der transitiven Beziehung gehört, für jede allgemeinwissenschaftliche Untersuchung sind) dergestalt, daß die Gesetze der allgemeineren Wissenschaften zwar als Voraussetzung für die Ausgestaltung der spezielleren Wissenschaften engeren Umfanges dienen, daß aber das umgekehrte Verhältnis niemals eintritt. Demzufolge gehören jeder spezielleren Wissenschaft besondere Begriffe an, die nur in ihr und den höheren Disziplinen vorkommen, dagegen durchaus keine rückwirkende Anwendung auf die allgemeineren Wissenschaften gestatten.

Die Anwendung dieser Grundsätze auf die Gesamtheit der vorhandenen Wissenschaften ergibt nun, daß diese sich in drei große Gruppen ordnen lassen. Zunächst kommen die mathetischen oder Ordnungswissenschaften, wie sie vorstehend definiert worden sind. Es folgen die physischen Wissenschaften, insbesondere Physik und Chemie, die man entsprechend ihrem Grundbegriff auch die *energetischen* Wissenschaften nennen kann und den Beschluß bilden die biologischen Wissenschaften, in welchen der neue Begriff des *Lebens* auftritt, und welche die Gesetze sämtlicher Lebenserscheinungen

bis zu den höchsten hinauf umfassen. Die höchsten Lebenserscheinungen sind diejenigen psychischen Vorgänge, welche durch die Vergesellschaftung der Menschen zustandekommen. Sie umfassen u. a. das gesamte Gebiet der sogenannten Geisteswissenschaften und lassen sich ihrer Definition gemäß einem allerdings recht weit genommenen Begriff der *Soziologie* einordnen. Sachlich zweckmäßiger werden sie als *Kulturwissenschaften* bezeichnet.

9. Beziehung der Einzelwissenschaften zueinander. Gemäß dem oben ausgesprochenen allgemeinen Ordnungsprinzip wird man daher die Ordnungswissenschaften überall beim Betrieb der energetischen Wissenschaften voraussetzen müssen. Daß dieses zutrifft, lehrt ein Blick in irgend ein beliebige wissenschaftliche Abhandlung aus den fraglichen Gebieten. Dagegen kommen die Lebenserscheinungen, also die gesamten biologischen Wissenschaften für die energetischen Wissenschaften ebenso wenig in Frage, wie für die Ordnungswissenschaften. Für sämtliche biologischen Wissenschaften endlich dienen als Voraussetzungen sowohl die Gesetze der Ordnungswissenschaften, wie die der energetischen. Auch von dem Zutreffen dieser Beziehung überzeugt jede Betrachtung irgendeiner wissenschaftlichen Arbeit auf einem der biologischen Gebiete.

10. Unterteilung. Jede dieser drei großen Gruppen ist nun wieder zweckmäßig in engere Stufen zu zerteilen, entsprechend den wichtigsten Begriffen, die folgeweise bei dem Aufbau der Gesamtwissenschaft zur Wirkung gelangen. So kann man die Ordnungswissenschaften zerlegen in *Logik*, *Mathematik* und *Geometrie*, wobei unter Logik in starker Erweiterung des gegenwärtigen Sprachgebrauches die gesamte Lehre von der Ordnung verstanden werden soll, welche bis zu dem speziellen Begriff der Größe führt, also allgemeiner ist, als der Größenbegriff. Hier ist insbesondere die Lehre von den Mannigfaltigkeitscharakteren oder Ordnungstypen abzuhandeln, deren Voraussetzungen überall bei der wissenschaftlichen Bearbeitung von Problemen höherer Wissenschaften in Betracht kommen, deren geordnete Darstellung aber noch ein Desideratum für die wissenschaftliche Praxis und den wissenschaftlichen Unterricht ist.

Die energetischen Wissenschaften zerfallen der Hauptsache nach in *Physik* und *Chemie*, wobei man die erstere, wenn man des leichteren Behaltens wegen überall eine Dreiteilung durchführen will, noch in *Mechanik* und Physik in etwas engerem Sinne spalten

kann. Gekennzeichnet werden die verschiedenen Kapitel der energetischen Wissenschaft durch die in ihnen zu behandelnden verschiedenen Arten der Energie, wie ihrer binären, ternären und höheren Kombinationen. Dabei erweisen sich die einzelnen Kapitel der gesamten energetischen Wissenschaft als koordinierte Teile eines und desselben Ganzen, der Energetik.

Die biologischen Wissenschaften zerfallen in *Physiologie*, *Psychologie* und die schon vorher gekennzeichnete *Kulturologie* oder *Soziologie*. Die erste Disziplin befaßt sich mit den Lebenserscheinungen im allgemeinen, wie sie bei sämtlichen Lebewesen gemeinsam auftreten. Die Psychologie hat zum Gegenstande jene besondere Gruppe von Lebenserscheinungen, welche man mit dem Namen der geistigen Vorgänge bezeichnet, wobei dieses Wort wiederum im allgemeinsten Sinne zu nehmen ist. Die Kulturologie endlich umfaßt denjenigen Teil der geistigen Vorgänge, welche durch die gemeinsame Betätigung des geistig höchststehenden Lebewesens, des Menschen, zustandekommen. Hier hat man es im Gegensatze zu den energetischen Wissenschaften aber nicht mit nebengeordneten, sondern mit übergeordneten Begriffen zu tun, demzufolge die Physiologie als wissenschaftliche Voraussetzung für die Bearbeitung sowohl der Psychologie wie der Kulturologie anzusehen ist, während die Psychologie die Rolle einer Hilfswissenschaft nur für die Kulturologie zu spielen hat.

II. Die Stellung der Farbenlehre. Um zu ermitteln, welcher von den eben beschriebenen großen Gruppen die Farbenlehre angehört, haben wir stufenweise uns zu fragen, wieweit Begriffe der aufeinanderfolgenden Wissenschaften in der Farbenlehre zur Anwendung kommen. So konstatieren wir, daß jedenfalls zunächst die Mathetik als Hilfswissenschaft der Farbenlehre anzusehen ist. Ferner die Energetik, sowohl die Physik wie die Chemie. Auch muß die Physiologie als eine Vorwissenschaft der Farbenlehre in Anspruch genommen werden, da die Tatsache des Farbenerlebnisses von der physiologischen Beschaffenheit der entsprechenden Sinnesorgane entscheidend bestimmt wird. Weiter ergibt sich, daß die Farbenlehre auch die Begriffe der *Psychologie* anwendet, da der maßgebende Begriff der *Farbe* sich als eine *Empfindung*, also ein psychisches Erlebnis kennzeichnet. Dagegen läßt auch die allgemeinste Untersuchung dieses Begriffes uns keinerlei soziologische oder kulturologische Grundelemente entdecken. Wir haben bei der

Einordnung der Farbenlehre somit an der Stelle Halt zu machen, die durch die Individualpsychologie bezeichnet wird, und konstatieren, daß die Farbenlehre eine psychologische Wissenschaft ist.

12. Ordnung der Farbenlehre. So einfach und selbstverständlich dieses Resultat aussieht, so wichtig erweist es sich alsbald in den Konsequenzen, die es mit sich bringt. Die bisherige Farbenlehre litt nämlich in ganz ausgeprägter Weise durch den Mißgriff, daß sie im wesentlichen vom physikalischen Standpunkte aus bearbeitet wurde. So hat man sich seit NEWTON bemüht, eine Systematik der Farben auf Grundlage einer physikalischen Eigenschaft, der Refrangibilität, bzw. der Wellenlänge auszuarbeiten. Der beständige Widerspruch, den die hieraus sich ergebenden Resultate mit den Gesetzmäßigkeiten der Farbempfindung zeigen (ist doch beispielsweise die Mannigfaltigkeit der Wellenlängen eine transitive, während die Mannigfaltigkeit der Farben eine intransitive und dazu geschlossene oder in sich selbst zurücklaufende ist), muß als eine der wesentlichsten Ursachen dafür angesehen werden, daß bis heute die Farbenlehre nur mäßige Fortschritte gemacht hat und daß insbesondere alle Versuche, auf die Zahlenwerte der Lichtwellenlängen irgendeine Systematik der Farben zu begründen, vollständig gescheitert sind. Der historische Streit GOETHE'S gegen NEWTON beruht in letzter Instanz auf der Erkenntnis des ersteren, daß die Farbenlehre eben keine physikalische, sondern eine psychologische Wissenschaft ist. Andererseits hat gerade der Umstand, daß GOETHE über die Methodik der physischen Wissenschaften nicht verfügte, ihn zu dem Mißgriff veranlaßt, die physikalische Erscheinung der Zerstreuung des Lichtes durch Brechung durch eine ungeeignete, weil wissenschaftlich nicht genügend analysierte Begriffsbildung, die der trüben Mittel, deuten zu wollen.

Demgegenüber kann die heutige Wissenschaft das Verhältnis klar übersehen. Der Farbenlehre liegt u. a. die Aufgabe ob, die Zuordnungsweise festzustellen, durch welche die transitive Mannigfaltigkeit der Wellenlängen mit der in sich zurücklaufenden Mannigfaltigkeit der Farbempfindungen in Beziehung gesetzt ist. Gegen eine Vergewaltigung der psychischen Tatsachen durch ihre physikalischen Bedingungen, die bis auf den heutigen Tag noch nicht völlig verschwunden ist, schützt sie sich durch die aus der methodischen Stellung der Farbenlehre unmittelbar ersichtliche Erkenntnis, daß die Physik als allgemeinere Wissenschaft die Rolle einer Hilfs-

wissenschaft für die Farbenlehre zu übernehmen hat, während die maßgebende Begriffsbildung der Psychologie zukommt, als deren Teil die Farbenlehre sich erweist.

13. Spezielle Mathetik der Farbenlehre. Als erste ordnungsmäßige Anwendung der bisherigen Betrachtungen ist die Benutzung der Wissenschaftspyramide zur Unterteilung der Gesamtfarbenlehre in ihre Sonderkapitel anzusehen. Da alle allgemeineren Wissenschaften der höheren gegenüber die Rolle der Hilfswissenschaft übernehmen, deren Begriffe und Denkmittel vorausgesetzt werden, so zerfällt jede Sonderwissenschaft in so viele einzelne Abteilungen, als allgemeinere Wissenschaften unter ihr vorhanden sind. Dieses ergibt für die Farbenlehre die Einteilung in folgende fünf Kapitel: 1. die mathetische, 2. die physikalische, 3. die chemische, 4. die physiologische und 5. die psychologische Farbenlehre.

Diese Einteilung hat wie jede, welche auf rationellen Prinzipien beruht, eine Anzahl erhebliche Vorzüge gegenüber den rein empirischen Anordnungen, wie sie jeweils aus dem tatsächlichen Bestand vorhandener Kenntnisse gebildet zu werden pflegen, der von der Zeit abhängig und unter allen Umständen zufällig ist. Zunächst ergeben die eben geschilderten Kapitel eine Rangordnung untereinander dergestalt, daß jedes vorangehende zum Verständnis aller folgenden vorausgesetzt werden muß. Es ergibt sich mit andern Worten auf logischem Wege jene pädagogisch-methodische Anordnung, welche zum Verständnis und erfolgreichen Betrieb jeder Disziplin erforderlich ist.

Zweitens ergibt die Anordnung die notwendigen und zureichenden Teile der gesamten Disziplin. Sie schützt mit andern Worten dagegen, daß irgend ein Teil deshalb übersehen wird, weil er bisher noch keine in die Augen fallende Bearbeitung erfahren hatte. Denn da die dargelegte Einteilung sich aus der Anwendung einer ganz allgemeinen Ordnung auf den Sonderfall der bearbeiteten Wissenschaft ergibt, ist sie davon unabhängig, wie weit die wissenschaftliche Bearbeitung dieses Sonderfalls zur Zeit gediehen ist.

Endlich hat diese rationelle Einteilung den Vorzug, daß sie *erschöpfend* ist. Während sie uns also die etwa fehlenden Kapitel erkennen läßt, gewährt sie uns gleichzeitig die Sicherheit, daß keine der vorhandenen Möglichkeiten übersehen ist.

14. Die Hauptbegriffe der Farbenlehre und das Wort Farbe. Der allgemein verbreitete Mangel an Konsequenz und Ein-

deutigkeit, unter welchem alle „natürlichen“ Sprachen leiden, hat auch bewirkt, daß das Wort *Farbe* mit sehr verschiedenartigen Begriffen innerhalb der gesamten Farbenlehre in Verbindung gebracht wird. Und zwar sind es charakteristischer Weise die oberen Gebiete der Farbenlehre von dem physikalischen ab, wo das Wort ohne scharfe Grenze gebraucht wird, während die mathetischen Begriffe, welche für die Farbenlehre in Anwendung kommen, von dieser Verwirrung frei geblieben sind. Es ist dies ein Ausdruck dafür, daß bereits im allgemeinen Bewußtsein die Trennung der „logischen“, d. h. der mathetischen Elemente innerhalb der Gesamtwissenschaft sich vollständig genug vollzogen hat, um ein Übergreifen des psychologischen Begriffs *Farbe* auf dieses Gebiet vollständig zu verhindern. Dagegen besteht für die höheren Gebiete die genannte Verwirrung in sämtlichen Sprachen und ihr Vorhandensein hat nachweisbar nicht wenig dazu beigetragen, die Entwicklung einer rationellen Farbenlehre zu verzögern.

Wir werden entsprechend der getroffenen Einteilung einen physikalischen, einen chemischen, einen physiologischen und einen psychologischen allgemeinen Farbenbegriff zu bilden haben, welcher folgende Beziehungen auszudrücken hat. Der physikalische Begriff hat die energetischen Bedingungen zu bezeichnen, durch welche die Farbempfindung zustande kommt. Der chemische hat diejenigen Stoffe zu bezeichnen, in welchen jene physikalischen Bedingungen vereinigt sind, um die fragliche Wirkung hervorzubringen. Der physiologische Begriff hat die Vorgänge im Sinnesapparat und im Zentralorgan, also im Auge und Gehirn nebst den verbindenden Nerven zu kennzeichnen, welche stattfinden müssen, damit der psychologische Effekt entsteht, den wir *Farbe* nennen. Und der psychologische Begriff endlich hat diesen Effekt, *die bewußte Farbempfindung*, zu kennzeichnen.

15. Der Sprachgebrauch. Ein Blick über den Sprachgebrauch läßt erkennen, daß das Wort *Farbe* für drei unter diesen vier ganz verschiedenen Begriffen ohne methodische Unterscheidung verwendet wird. Der Physiker nennt *Farbe* die Schwingungen von bekannter Periode und Fortpflanzungsgeschwindigkeit, welche bestimmte Farbempfindungen hervorrufen, wenn sie in das Auge treten und normal transformiert werden. Der Chemiker nennt *Farbe* jene Substanzen, welche Licht von bestimmten Schwingungsarten durchlassen oder reflektieren und endlich wird für den psy-

chologischen Vorgang, die chromatische Empfindung, der gleiche Name gebraucht.

Um hier Ordnung zu schaffen, kann man entweder das Wort Farbe bei all diesen verschiedenen Begriffen belassen; man muß es nur dann mit kennzeichnenden Zusätzen versehen, um anzugeben, welches Gebiet gemeint ist. Oder man kann das Wort Farbe auf eine von diesen Gruppen beschränken und für die andern andere kennzeichnende Namen suchen. Die Entscheidung ist einigermaßen willkürlich, da annähernd gleichwertige Gründe für die eine wie die andere Möglichkeit angeführt werden können. Immerhin scheint mir ein etwas besserer Anschluß an den Sprachgebrauch erreicht zu werden, wenn das Wort Farbe, wie das in Zukunft in völliger Konsequenz geschehen soll, ausschließlich für das letzte psychologische Erlebnis, die bewußte Empfindung benutzt wird. Darnach werden also *Farbe* und *Farbempfindung* dasselbe bezeichnen und wir werden andere Namen für jene Faktoren zu suchen haben, welche zwar notwendig sind, eine Farbempfindung zu bewirken, aber nicht zureichend, falls nämlich der letzte psychische Faktor fehlt.

16. Licht. Am leichtesten wird uns die konsequente Durchführung einer rationellen Bezeichnungsweise in der Physik gemacht, wo die Wörter *Licht* und *Strahlung* bereits für die energetische Ursache der Farbempfindung benutzt werden. Allerdings nicht ganz konsequent, denn man spricht von Dispersionsfarben, Interferenzfarben, Absorptionsfarben usw., wobei man nur besondere Modifikation des Lichtes, insbesondere das Vorhandensein bestimmter Gruppen von Wellenlängen oder Schwingungszahlen meint. Es fehlt nämlich in der Physik ein Name für solche Arten Licht, die durch bestimmte Wellenlängen oder Gruppen solcher gekennzeichnet sind. Und man benutzt das Wort Farbe, um solche Gruppen zu benennen. Nur durch einen neuen Namen hierfür ließe sich eine nicht konsequente Anwendung des Wortes Farbe in der Physik, wohinein es nicht gehört, vermeiden und es muß ernstlich erwogen werden, welches neue Wort für diesen Zweck zu bestimmen wäre.

17. Farbstoffe. Für den *chemischen* Begriff eines Stoffes, der einen bestimmten Farbeindruck bewerkstelligt, ist das Wort Farbe in ausgiebigstem Maße gebräuchlich. Man spricht von Ölfarben und Wasserfarben und meint damit farbige Stoffe, die mit den

genannten Malemitteln benutzt werden. Eine Farbenfabrik ist eine Fabrik, in welcher solche Stoffe hergestellt werden und so lassen sich die Beispiele häufen.

Will man konsequent sein, so wird also ein anderes Wort für dieses Gebiet angewiesen werden müssen. Hier bietet sich der Ausdruck *Farbstoff* oder *Pigment* an.

Man kann hier weiterhin noch zwei verschiedene Arten Farbstoffe unterscheiden. Nämlich erstens die Rohmaterialien, welche durch Vermischung mit Bindemittel oder Überführung in bestimmte Formen die Eigenschaften erlangen, welche für ihre Anwendung wesentlich sind und zweitens diese für die unmittelbare Anwendung präparierten Produkte aus den genannten Rohmaterialien. Wir wollen die Regel festhalten, das Wort *Pigment* oder *Farbstoff* ausschließlich für die chemisch möglichst exakt definierten *Rohmaterialien* zu verwenden und die auftragfertigen gemischten Produkte mit dem Worte *Tünche* zu bezeichnen. Das geht allerdings nicht ganz ohne Zwang an, denn wenn man auch gut *Leimtünche* und allenfalls *Öltünche* sagen kann, so wird doch der Ausdruck *Pastelltünche* als ungewohnt empfunden werden. Immerhin ist dieses ein geringerer Nachteil, als der Mangel an Strenge bei der üblichen Vermischung von Begriffen und Wörtern.

18. Der physiologische Teil. Für das physiologische Gebiet kommt ein ungenauer Gebrauch des Wortes Farbe nicht in Frage. Was sich von dem Eintritt des Lichtes in das Auge bis zur Betätigung der ausgelösten Vorgänge im Zentralorgan vollzieht, wird niemals Gegenstand der alltäglichen Beobachtung und somit hat auch die alltägliche Sprache keinen Anlaß gehabt, entsprechende Bezeichnungen auszubilden.

19. Der psychologische Begriff Farbe. Die Vorgänge werden erst Gegenstand des Bewußtseins und der Erörterung, wenn sie ihre letzte Umwandlung im Zentralorgan erfahren haben und als differenzierte Empfindung zum Bewußtsein kommen. *Diese bewußte Empfindung ist es nun, für welche wir das Wort Farbe vorbehalten.* Und zwar soll es für das gesamte qualitative Gebiet dieser Empfindungen gelten, d. h. für jenen von der Form unabhängigen Anteil, mit dem die verschiedenen Flächen des Sehfeldes erfüllt sind.

Um klar zu machen, um was es sich hier handelt, soll ein Hauptversuch, der von E. HERING herrührt, beschrieben werden und *der Leser wird dringend gebeten, ihn zu wiederholen.* Man macht in

ein steifes Blatt weißen Papiere eine Öffnung von 15 bis 25 mm Durchmesser mit scharfen Rändern, ob ein Kreis oder eine andere Form ist gleichgültig. Dann wird auf einem Tisch, der einige Meter vom Fenster entfernt ist, ein Blatt von möglichst reingelb gefärbtem Papier gelegt und das weiße Papier etwa 20 cm hoch so darüber gehalten, daß das gelbe Blatt ganz zugedeckt ist und seine Farbe nur durch die Öffnung sichtbar wird. Wendet man das Blatt zunächst mit seiner Schärfe gegen den oberen Fensterrand, so daß die Oberfläche dunkel ist, so erscheint der gelbe Fleck in der Öffnung im reinsten Gelb, das nicht nur so rein gelb aussieht, wie der Aufstrich bei unmittelbarer Betrachtung, sondern darüber hinaus den Charakter des *Leuchtens* hat. Wendet man nun das weiße Papier um eine horizontale Achse, die parallel dem Fenster liegt, langsam dem Lichte zu, so daß seine Oberfläche immer heller erleuchtet wird, so wird zunächst das Gelb sichtlich dunkler und verliert sein leuchtendes Aussehen; weiterhin verliert sich auch die reingelbe Farbe und macht einer graugrünlichen, meist als olivgrün bezeichneten trüben Farbe Platz. Hat schließlich das weiße Papier die Stellung angenommen, in der es am meisten Licht vom Fenster empfängt, wobei man ständig darauf Acht gibt, daß kein Schatten auf das gelbe Papier fällt, so erscheint das Gelb in der Öffnung, das vorher unter ganz gleichen Beleuchtungsverhältnissen leuchtend ausgesehen hatte, fast schwärzlich, doch immer mit der charakteristischen graugelben Tönung.

Bei diesem Versuch bleibt der ganze physikalische, chemische und physiologische Teil des Vorganges, welcher die Empfindung der gelben Farbe bewirkt, völlig unverändert. Was sich ändert, ist ausschließlich die weiße Umrahmung, deren Helligkeit man innerhalb der experimentellen Grenzen variiert hat. Trotzdem ist die Farbe der konstant beleuchteten gelben Fläche nichts weniger als konstant geblieben, sondern hat sich innerhalb so weiter Grenzen geändert, daß man des unmittelbaren Anblickes des Versuches und seiner Wiederholung bedarf, um sich eine Vorstellung von dem erstaunlich großen Bereich dieser Veränderung zu machen.

Es ist hier nicht der Ort, die Einzelheiten des Versuches zu erörtern, da er hier ausschließlich dazu dienen soll, die psychologische Bedingtheit der Farbempfindung in einem solchen Falle klarzustellen, wo alle andern Faktoren, außer dem durch die Umgebung beeinflussten psychologischen Moment, konstant geblieben sind.

20. Farbe und Form. Abschließend sei demnach festgestellt, daß künftig mit dem Worte *Farbe* ausschließlich die *psychologische* Tatsache jener qualitativen Empfindung des Lichtsinnes gekennzeichnet werden soll. Gleichzeitig soll der Umfang des Begriffes alsbald dahin festgestellt werden, daß nicht nur die bunten Farben wie sie beispielsweise im Spektrum erscheinen, sondern ebenso die „unbunten“, nämlich Schwarz, Weiß und Grau, sowie alle Mischungen aus beiden Gruppen gleichmäßig den Namen *Farbe* erhalten sollen.

Demgemäß können wir die Beschaffenheit unserer Gesichtsempfindungen summarisch dahin kennzeichnen, daß sie aus verschiedenartigen Farben bestehen, welche nebeneinander ein zweidimensionales Gesichtsfeld erfüllen und deren gegenseitige Begrenzung wir mit dem Namen *Form* bezeichnen. Jeder Teil des Gesichtsfeldes ist von einem anderen, den wir als verschieden empfinden, *nur* durch seine Farbe verschieden und alle Formen lösen sich bei bewußter Betrachtung in Farbenflecken auf, welche irgendwie gegeneinander grenzen. *Gleiche* Farben sind dadurch gekennzeichnet, daß sie aneinandergrenzend *keine Form oder keine Trennungslinie erkennen lassen*. Wir werden alsbald sehen, daß umgekehrt die experimentelle Definition der Farbengleichheit auf das Verschwinden einer Trennungslinie der aneinandergrenzenden Felder hinaus kommt.

21. Der Mannigfaltigkeitscharakter der Farben. Gewöhnlich wird angenommen, daß die Gesamtheit der Farben mit Einschluß des Schwarz, Weiß und Grau eine *dreifache* Mannigfaltigkeit darstellt, deren Veränderliche *Farbton, Reinheit* und *Helligkeit* sind. Diese Aufstellung bedarf in mehrfacher Hinsicht der Verbesserung. Zunächst hat die Helligkeit nicht denselben Charakter als Veränderliche, wie Farbton und Reinheit und wird zweckmäßig durch einen andern Begriff, den des *Grau* ersetzt, welcher folgende Beschaffenheit hat: Jede beliebige Farbe besteht (abgesehen von den später zu erörternden Grenzfällen) aus einem bunten und einem unbunten Anteil. Der erste wird von einer reinen oder gesättigten Farbe des Farbkreises gebildet, der andere ist ein *Grau* von bestimmter Helligkeit, das durch das Verhältnis Weiß: Weiß plus Schwarz definiert ist. Die Erfahrung hat ergeben (der Nachweis dafür wird weiter unten mitgeteilt werden), daß diese Anteile einem *additiven* Gesetz gehorchen. Setzt man den Anteil an reiner Farbe f

in der vorgelegten Farbe $= x$, wo x ein echter Bruch ist, so besteht die Beziehung Farbe $= x \cdot f + (1 - x)g$, wo g das Grau darstellt, das seinerseits zwischen 0 (Schwarz) und 1 (Weiß) variieren kann, während für f alle reinen Farben des Farbkreises eintreten können. Die Veränderlichen x und g definieren also neben dem Farbton die Farbe. Auf solche Weise lassen sich tatsächlich alle in der Natur irgendwie vorkommenden Farben eindeutig kennzeichnen und insofern hat der Satz seine Berechtigung, daß die Farbe im allgemeinen Sinne eine dreidimensionale oder dreifältige Mannigfaltigkeit ist.

22. Das zweifältige Farbensystem. Hierbei darf aber nicht übersehen werden, daß neben den Farben, welche in der eben beschriebenen Weise durch drei unabhängige Veränderliche bestimmt werden, noch eine Gruppe von Farben besteht, bei denen eine von diesen drei Veränderlichen, nämlich das Grau fehlt. Wenn man im Spektroskop durch Anwendung einer Okularblende irgend eine bestimmte Farbe, beispielsweise das Rot in der Nähe der Wellenlänge 620 isoliert hat und man vermindert nun durch Zuschrauben des Spaltes die Lichtmenge, welche in das Spektroskop fällt, so wird die Farbe Rot, welche man sieht, in ihrem Charakter nicht geändert. Es bleibt dasselbe tiefe oder gesättigte Rot bis endlich der Spalt geschlossen ist und der Lichteindruck vollständig verschwindet. Insbesondere geht das Rot durchaus nicht, wie das in andern Fällen beobachtet werden kann, durch Braun in Schwarz über, sondern es ist entweder vorhanden oder nicht vorhanden.

Hierbei soll ausdrücklich abgesehen werden von der anderen Wahrnehmungsfähigkeit des Lichtes, welche das Auge in seinen peripheren Gebieten durch die Betätigung des sehr viel lichtempfindlicheren Stäbchenapparates besitzt. Die Stäbchen sind überhaupt nicht fähig, bunte Farben zu empfinden; sie unterscheiden nur Licht oder Nichtlicht und von ihrer Mitwirkung, die nur im Halbdunkel zur Geltung kommt, soll hier abgesehen werden.

Auch soll abgesehen werden von den Resten der entsprechenden Sehweise des zentralen Auges, demzufolge auch dieses bei starker Dunkeladaptation das Phänomen von PURKINJE zeigt.¹⁾ Bei der eben geschilderten Versuchsweise mit dem Spektroskop

1) E. HERING, Das PURKINJESCHE Phänomen im zentralen Bezirk des Sehfeldes (Graefes Arch. f. Ophtalmol. 90, 1. 1915).

sind diese Fälle ohnedies ausgeschlossen, weil das Auge beständig helladaptiert bleibt.

23. Nichtexistenz des bezugsfreien Grau. Was hier eben für bunte Gesichtseindrücke beschrieben worden ist, gilt in entsprechender Weise auch für unbunte, wie man sich durch folgenden Versuch überzeugen kann. Wenn man ein Mikroskop ohne Objekt von unten her mit Hilfe des ABBESchen Beleuchtungsapparates mit Licht versieht, so erscheint das Gesichtsfeld beim Hineinschauen einfach hell. Verengert man die Irisblende des Kondensators bis zum Verschwinden der Beleuchtung, so beobachtet man nicht etwa abgestufte *graue* Farben, sondern das Gesichtsfeld bleibt „weiß“, solange überhaupt noch Licht empfunden wird. Das Gleiche kann man beobachten, wenn man an einer innen geschwärzten Röhre, die man lichtdicht an das Auge drücken kann, ein Diaphragma aus Milchglas, paraffiniertem Papier oder einem ähnlichen zerstreuenden Mittel befestigt und nun durch irgend eine Blend- oder Schlitzvorrichtung das vom Ende her eintretende Licht vermehrt oder vermindert. Noch einfacher ist es, wenn man sich mit dieser Röhre nach verschiedenen Orten des Zimmers wendet, von denen größere oder geringere Lichtmengen, zuletzt gar kein Licht mehr in das Innere treten. Wesentlich ist, daß das ganze Gesichtsfeld gleichmäßig hell ist. Auch hier ist man außerstande, verschiedene Grau zu konstatieren, sondern man empfindet, trotzdem die objektive Lichtstärke stetig innerhalb weitester Grenzen variiert wird, eben nur das Vorhandensein des Lichtes oder sein Verschwinden.

24. Die bezugsfreien Farben. Aus beiden Gruppen von Tatsachen geht also hervor, daß es Bedingungen gibt, unter denen eine von den drei Veränderlichen der Farbe, welche wir bei freier Betrachtung wahrnehmen, verschwindet. Dieser Fall kennzeichnet sich dahin, daß das *Grau* und seine Mischungen gänzlich fehlen, während sowohl die Farben des gesamten Farbkreises empfunden werden, wie auch die Empfindung des von den bunten Farben verschiedenen unbunten oder weißen Lichtes vorhanden ist. Ferner sind Mischungen in beliebigen Verhältnissen aus buntem und aus weißem Licht möglich und geben zu einer Reihe von Farben Anlaß, die man im Gegensatz zu den reinen bunten Farben, die man *gesättigt* nennt, als *ungesättigte* Farben bezeichnen kann. Jede Farbe dieser Art ist also durch *zwei* Veränderliche bestimmt, nämlich

durch den Farbton und durch das Verhältnis zwischen gesättigter Farbe und beigemischtem Weiß. Vermöge der ersten Veränderlichen läßt sich eine gegebene Farbe, zum Beispiel Grün durch stetige Verschiebung über Blau, Violett, Rot und Gelb wieder bis zum Grün zurückbringen, ohne daß jemals ein Sprung vorzunehmen ist, zum Zeichen, daß die Mannigfaltigkeit des Farbtons eine stetige und in sich geschlossene ist. Ferner läßt sich jede Farbe durch das Verhältnis zwischen bunter Farbe und Weiß variieren. Aus jeder gesättigten Farbe läßt sich durch die Zufügung wachsender Mengen von Weiß eine Reihe von ungesättigten Farben herstellen, in welchen der Charakter des bunten Anteils zunehmend geringer wird, bis er endlich verschwindet und die Farbe einen völlig unbunten oder weißen Eindruck macht. Man erhält also eine vollständige Darstellung dieser Art Farben, wenn man die sämtlichen gesättigten Farben stetig an der Peripherie eines Kreises anordnet und von jeder längs dem zugehörigen Radius die Mischungen mit Weiß stetig so verteilt, daß das reine Weiß im Mittelpunkt erreicht wird. Aus Gründen, die alsbald dargelegt werden sollen, kann dies System als das der *bezugsfreien* oder *unbezogenen* Farben bezeichnet werden. Wir wollen uns des ersten Namens bedienen.

25. Ältere Irrtümer und Unzulänglichkeiten. HELMHOLTZ, der seine Beobachtungen fast ausschließlich mit Spektralfarben angestellt hat, ist logischerweise zu der gleichen Darstellung¹⁾ geführt worden und seine Fig. 16 (a. a. O. S. 111) drückt völlig konsequent diese zweidimensionale Mannigfaltigkeit aus. Aber der Übergang zur dritten Dimension findet bei ihm keine sachgemäße Darstellung. Er schreibt: „Wollte man auch noch die verschiedenen Grade der Lichtstärke der Körperfarben berücksichtigen, so müßte man, wie LAMBERT es tat, noch eine dritte Dimension des Raumes zu Hilfe nehmen.“ Die Lichtstärke tut es nicht, wie oben gezeigt worden ist, und auch nicht die Beschaffenheit der Körperfarben, sondern maßgebend ist die *Bezugnahme auf andere, gleichzeitig gesehene Farben*, wie alsbald dargelegt werden soll.

Demgemäß ist es auch unrichtig, wenn HELMHOLTZ a. a. O. schreibt: „Dagegen kann der Eindruck, den beliebig gemischtes Licht auf das Auge macht, immer dargestellt werden als eine Funktion von nur drei Variabeln, die in Zahlen ausgedrückt werden können,

1) Handb. der physiol. Optik, 3. Aufl. Bd. 2, S. 110.

nämlich erstens der Quantität gesättigten farbigen Lichtes, zweitens der Quantität weißen Lichtes, die gemischt dieselbe Farbempfindung geben, drittens der Wellenlänge des farbigen Lichtes“. Dies ist insofern unrichtig, als wir durchaus nicht fähig sind, die Quantität des gesättigten farbigen Lichtes und des weißen Lichtes als solche zu empfinden. Was wir empfinden, ist vielmehr nur das *Verhältnis* des farbigen und weißen Lichtes, also der Sättigungsgrad der Farbe. Dagegen kann die absolute Lichtstärke sich innerhalb sehr weiter Grenzen ändern, ohne daß der Eindruck auf das Auge ein anderer wird. Erst an den Grenzen der normalen Funktion des Sehorgans, dort, wo infolge zu geringer Intensität das Sehen Schwierigkeiten bereitet und dort, wo infolge zu großer Intensität eine Schädigung des Organs sich geltend zu machen beginnt, treten Abweichungen ein, auf welche hier nicht einzugehen ist.

Die Ursache der Unvollkommenheiten in HELMHOLTZ' Auffassung und Darstellung liegt darin, daß er den Unterschied der Farbengruppe, die unter seinen Versuchsbedingungen gesehen wird, nämlich der *bezugsfreien* Farben von den um eine Dimension mannigfaltigeren *bezogenen* Farben, deren Beschaffenheit als bald erörtert werden soll, nicht bemerkt hat. Die schon vor ihm liegenden Bemühungen zur allgemeinen Ordnung der Farbe, insbesondere LAMBERTS Farbenpyramide, hatten ihn überzeugt, daß die allgemeinen Farben tatsächlich eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit darstellen und er hat deshalb unwillkürlich gesucht, die drei Dimensionen auch in dem Falle der von ihm untersuchten Phänomene nachzuweisen, wo tatsächlich nur zwei Dimensionen vorhanden waren.

26. Biologische Ausschaltung der Lichtstärke. Das Bemerkenswerteste bei den vorangegangenen Darlegungen liegt in der Tatsache, daß die *Lichtstärke*, von der wir objektiv wissen, daß sie in weiten Grenzen variiert wird (denn die beschriebenen Versuche beruhen überall darauf, daß man die Lichtstärke unter Konstanterhaltung der sonstigen Bedingungen zwischen einem endlichen Wert und Null abnehmen läßt) dennoch keinen Einfluß auf die Beschaffenheit der entsprechenden Empfindung haben soll. Es ist dieses eine Folge einer Organisation unseres Auges, die auf der biologischen Notwendigkeit beruht, nicht die Farben, sondern die *Dinge der Außenwelt* zu erkennen und zu unterscheiden, wenn auch die bestehenden Lichtverhältnisse in sehr weiten Grenzen sich verändern. Um dies zu ermöglichen, besitzt das Sehorgan eine An-

zahl Einrichtungen, von denen die wichtigsten die Beweglichkeit der Iris und die Anpassung der Netzhaut sind.¹⁾

Wenn die äußere Lichtstärke zunimmt, so verkleinert sich automatisch die Eintrittsöffnung des Lichtes, so daß eine entsprechende geringere Lichtmenge in das Auge tritt. Dieser Vorgang schwächt die Veränderlichkeit des äußeren Lichtes zwar zu einem guten Teil ab, hebt sie aber nicht auf, weil die Pupillenöffnung sich nicht umgekehrt proportional der objektiven Lichtstärke ändert. Daneben wird ein zweiter Faktor wirksam, der in der Änderung der Empfänglichkeit des nervösen Endapparates der Netzhaut für Lichtwirkungen, der *Adaptation* liegt. Wir brauchen uns über den Mechanismus dieses Vorganges kein bestimmtes Bild zu machen, da der Sinn und Charakter desselben sich aus der unmittelbaren Beobachtung ergibt. Er besteht darin, daß je größer die allgemeine Lichtstärke ist, um so geringer die Empfindlichkeit der Netzhaut für die Wirkung dieses Lichtes wird. Dadurch wird ein zweiter Faktor wirksam, durch welchen die Veränderlichkeit der äußeren Lichtstärke um ein erhebliches abgeschwächt wird.

Beide Faktoren zusammen heben die Wirkung der objektiven Intensitätsveränderung zwar nicht vollständig auf, machen aber die Funktion des Auges doch in so hohem Maße unabhängig von dieser Größe, daß das Gesamtergebnis eine weitgehende Indifferenz der Farbempfindung gegen die objektive Lichtstärke ist. Die Folge davon ist dann bei den oben beschriebenen Versuchen, daß die Veränderungen der objektiven Lichtstärke in einem weiten Gebiete eine Veränderung der spezifischen Farbempfindung, sei es der bunten oder der unbunten, nicht hervorrufen, sondern beide praktisch konstant lassen, bis zu den Schwellen, an denen die Fähigkeit der Lichtempfindung aufzuhören beginnt. An diesen Grenzen treten wie immer in solchen Fällen besondere Erscheinungen auf, deren Untersuchung aber hier bei der prinzipiellen Festlegung der Hauptverhältnisse und der durch sie bestimmten fundamentalen Begriffe nicht in Frage kommt.

27. Erklärung der bezugsfreien Farben. Wir werden demgemäß, die eben angegebenen Tatsachen zusammenfassend und gleichzeitig erklärend, feststellen, daß in gewissen Fällen die dreifache Mannigfaltigkeit der Farben sich auf eine zweifache redu-

1) E. HERING, die Lehre vom Lichtsinn. Leipzig, W. Engelmann.

ziert. Untersuchen wir das Gemeinsame der beschriebenen Fälle, so kommt es darauf hinaus, daß in einem im übrigen lichtlosen Gesichtsfelde die fragliche Farbe *allein* erscheint. Dieses „allein“ ist wesentlich und entscheidend. So berichtet HELMHOLTZ, dem bereits die Unmöglichkeit aufgefallen war, im Spektrum Braun, Olivgrün und ähnliche durch Grau gebrochene Farben zu sehen, daß er allerdings eine braune Spektralfarbe erzeugen konnte, aber in der Weise, daß er neben einem kleinen durch homogenes Licht erleuchteten rotgelben Felde ein großes Feld angebracht hat, welches durch sehr starkes weißes Licht erleuchtet wurde. Während ohne dieses weiße Feld das Gelb den Eindruck einer reinen Farbe macht, geht es in dem Maße als die Lichtstärke des weißen Feldes gesteigert wird, durch Zwischentöne in das charakteristische Braun über, welches an einer rotgelben Fläche auftritt, wenn man sie im Verhältnisse zu einer daneben befindlichen weißen verdunkelt. Das entspricht dem HERINGSchen Grundversuch, der oben beschrieben worden ist. Was die Bezeichnung Braun anbetrifft, so sei erwähnt, daß nur das reine Zitrongelb jenes Graugelb gibt, das oben als Olivgrün bezeichnet worden ist, während bei den mehr rötlichgelben Farben der grüne Anteil verschwindet und eine braune Verdunkelungsfarbe auftritt. Um also jene im Spektrum fehlenden Mischfarben zur Entstehung zu bringen, ist es notwendig und ausreichend, daß außer der betrachteten Farbe noch ein Vergleichsgebiet geschaffen wird (am zweckmäßigsten Weiß), welches an Helligkeit das farbige Feld erheblich übertrifft. Jedesmal wo eine Farbe für sich ohne eine solche Vergleichsmöglichkeit auftritt, kann sie nur gesättigt oder ungesättigt sein, d. h. sie besteht entweder aus reiner Farbe oder aus dieser vermischt mit Weiß. Tritt dagegen die Möglichkeit des Vergleichs auf, so kommt alsbald auch die dritte Variable zur Geltung, d. h. die Farbe kann mit *Grau* gemischt erscheinen, in welchem das Verhältnis Weiß : Schwarz zwischen Null und Unendlich wechseln kann.

28. Biologische Faktoren. Was nun die letzten Ursachen dieses wichtigen und durchgreifenden Gegensatzes anlangt, so sind sie gleichfalls in *biologischen* Verhältnissen zu suchen.¹⁾ Unser Sehapparat hat sich zum Zweck der Beurteilung der Außenwelt entwickelt und es zeigt sich bei diesem Organ dieselbe Erscheinung,

1) Vgl. E. HERING, Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn. Leipzig 1905 u. ff.

welche auch bei anderen Organen, meist in rudimentärer Gestalt zur Geltung kommt und sich andererseits am kräftigsten an dem Gesamtorgan der ganzen menschlichen Kultur, an der *Wissenschaft*, offenbart. Diese Wendung geht dahin, daß die Nachricht, welche das Organ vermittelt, zunehmend von der individuellen Beschaffenheit des Beobachteten unabhängiger und durch die biologisch wichtigen Seiten der Außenwelt bestimmt wird. Die körperlichen Objekte der Außenwelt nun besitzen im allgemeinen eine *Eigenfarbe*, d. h. sie verwandeln das auf sie fallende weiße Licht nach einem bestimmten Verhältnis in farbiges, das sie zurückwerfen, während der Rest durchgeht oder absorbiert wird. Dieses Verhältnis zwischen dem auffallenden und dem zurückgeworfenen Licht bleibt nun qualitativ wie quantitativ ganz unverändert, wenn man an dem auffallenden Licht die Intensität in beliebigem Umfange ändert. Es handelt sich hier um ein ganz allgemeines Gesetz, welches stets benutzt, aber nur selten für sich ausgesprochen wird. Nämlich das Gesetz, daß alle Veränderungen der Lichtstärke, welche irgendeine Anordnung von durchlassenden, absorbierenden und reflektierenden Körpern an dem auffallenden Licht hervorruft, der auffallenden Lichtmenge in aller Strenge proportional sind. Für die Beeinflussung des Lichtes durch die Objekte der Außenwelt besteht somit eine ähnliche Gesetzmäßigkeit, wie das OHMSche Gesetz für die elektrischen Ströme. Es gibt keine „Sättigung“ mit Licht, über welche hinaus die Gegenstände unfähig werden, größere Lichtmengen durchzulassen oder zu reflektieren, ebenso wenig wie es eine untere Grenze für die Lichtbeeinflussungen gibt. Sondern die spezifischen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionskoeffizienten der Körper sind innerhalb des ganzen Gebietes der herstellbaren Lichtintensitäten streng konstant. Infolgedessen dienen diese Koeffizienten als sehr sichere Hilfsmittel zur Erkennung und Definition der verschiedenen Körper, während die mit der sehr veränderlichen Beleuchtung variierenden absoluten Intensitäten der beeinflussten Lichtmengen durchaus zufällig sind. Daher hat sich unser Sehorgan, wie das schon bezüglich der Kompensation wechselnder Intensitäten geschildert worden ist, überall nur auf die Beurteilung jener Koeffizienten eingestellt und umgekehrt Einrichtungen ausgebildet, welche den Einfluß der absoluten Intensität tunlichst vermindern. Hieraus ergibt sich, daß wir auch in den Farben, wie sie uns als Bestandteil der Außenwelt entgegen treten, ganz

vorwiegend jene konstanten Koeffizienten erkennen. *Wir beziehen deshalb jede farbige Erscheinung alsbald automatisch auf die Beleuchtung, unter der sie zustande kommt und in bezug auf diese Beleuchtung empfinden und beurteilen wir sie.*

Dieses tritt beispielsweise bei dem oben beschriebenen Grundversuch von HERING auf das deutlichste zu Tage. Ein und derselbe Komplex von Lichtwellen, die von der gelben Fläche ausgehen, wirkt als leuchtendes Gelb, als normales Reingelb und als stark verdunkeltes Graugelb, je nachdem wir diesen Komplex auf eine dunkle oder heller beleuchtete weiße Fläche beziehen. Damit diese Beziehung automatisch stattfindet, ist es notwendig, daß das Gelb scheinbar in derselben Ebene liegt und unter denselben Beleuchtungsverhältnissen erscheint, wie die weiße Fläche. Deshalb muß die Abstammung des gelben Lichtes von dem besonderen Blatt verdeckt und durch die willkürliche Lokalisierung der gelben Farbe in der Ebene des weißen Blattes ersetzt werden. Sobald man ein kleines weißes Blatt mit einer entsprechenden Öffnung über eine große gelbe Fläche hält, die man allseitig neben dem weißen Blatt erkennen kann, verschwindet jene Veränderlichkeit und man sieht auch in der Öffnung nichts anderes, als dasselbe reine Gelb, wie in der ganzen Umgebung.

29. Bezogene Farben. Die bezogenen Farben mit ihrer dreifachen Mannigfaltigkeit sind somit nicht unmittelbare Ergebnisse der Einwirkung der strahlenden Energie auf unseren Sehapparat, sondern Produkte einer inneren Bearbeitung, oder genauer gesagt *Zuordnung*, durch welche wir an Stelle der absoluten Lichtstärke und ihrer Zusammensetzung aus Strahlen bestimmter Wellenlänge die *Veränderungen* empfinden, die das auffallende durchschnittliche weiße Licht vermöge der optischen Beeinflussung durch die Oberfläche der gesehenen Körper erfährt. Es gibt eine Anzahl psychophysischer Experimente, welche beweisen, daß ein und dasselbe farblose Licht von unveränderter Intensität je nach den Verhältnissen, unter denen es betrachtet wird, grellweiß, tiefschwarz oder grau in allen möglichen Zwischenstufen erscheinen kann. Maßgebend hierfür ist nur der Umstand, daß wir das vom Auge aufgenommene Licht nicht unmittelbar, sondern im Verhältnis zu anderem Licht beurteilen, welches wir gleichzeitig in demselben Gesichtsfelde wahrnehmen. Führt das Urteil zu der Annahme, daß von dem auffallenden Licht nur ein kleiner Teil zurückge-

worfen wird, so werden wir die betreffende Stelle als schwarz ansehen. Führt es zu der entgegengesetzten Annahme, so werden wir sie als weiß beurteilen und wenn wir einen mittleren Bruchteil des auffallenden Lichtes als zurückgesendet annehmen, so wird uns die Stelle grau erscheinen.

30. Unbewußte Schlüsse. HELMHOLTZ hat auf diese und ähnliche Tatsachen, die ihm bei seinen Forschungen vielfältig aufgestoßen sind, den Ausdruck angewendet, daß wir vermöge „unbewußter Schlüsse“ dieses oder jenes Urteil über die Lichtverhältnisse fällen und daß dadurch unsere Empfindungen der vorhandenen Erscheinungen maßgebend beeinflußt werden. Gegen diesen Ausdruck ist dann mannigfaltiger Widerspruch geltend gemacht worden, von dem ein großer Teil nicht zum Ausdruck gekommen wäre, wenn von HELMHOLTZ eine glücklichere Bezeichnung der tatsächlich vorhandenen Verhältnisse gewählt worden wäre. In der Begriffsverbindung: unbewußter Schluß liegt tatsächlich ein Widerspruch insofern, als das normale Schlußverfahren eine eminent bewußte Tätigkeit ist. Der entwickelte Mensch unterscheidet sich gerade durch seine Fähigkeit, bewußte Schlüsse auszuführen, von dem geistig niedrig Stehenden, welcher nicht auf Grund von Überlegungen und bewußten Schlüssen handelt, sondern auf Grund instinktiver Regungen.

Trotz des ungeeigneten Wortes liegt aber doch eine meines Erachtens vollkommen richtige Gedankenbildung vor. Nur ist unglücklicherweise der Umweg, auf welchem der entscheidende Punkt erreicht wurde und der nicht zur Sache, sondern zu den zufälligen persönlichen Bedingungen gehört, im Namen fixiert worden. Es handelt sich hier um eine ähnliche zwecklose Umständlichkeit, wie sie noch bis vor kurzem in vielen Formeln der Elektrizitätslehre in Gestalt des Integrals $\int idt$, wo i die Stromstärke und t die Zeit bedeutet, ein viel zu langes Dasein gefristet hat. Die Stromstärke i ist nämlich ein Quotient aus Elektrizitätsmenge und Zeit und multipliziert man diesen Quotienten wieder mit dem Zeitelement, so kommt nichts als die reine Elektrizitätsmenge heraus, die man unmittelbar hinschreiben kann, statt den unwesentlichen Zeitfaktor zuerst hineinzubringen und ihn dann wieder heraus zu multiplizieren. Ebenso liegt hier die Sache. Es handelt sich um eine ganz elementare geistige Operation, von der der bewußte Schluß nur eine sehr spezielle und

späte Entwicklungsform darstellt, nämlich um die *Zuordnung*. Lange bevor etwas wie Gesetz, Regel und Schluß im menschlichen Geiste entwickelt ist, besteht als fundamentales Phänomen die Zuordnung verschiedener Elemente der Erfahrung, welche durch ihr zeitliches oder räumliches Nebeneinander sich gegenseitig in Erinnerung bringen. Wenn wir die Augenlider beim Herannahen eines Gegenstandes schließen, der das Auge bedroht, so tun wir das nicht auf Grund des unbewußten Schlusses, daß die Bewegung der Lider eine Verletzung des Auges verhindern wird. Sondern es besteht eine ganz unmittelbare Zuordnung zwischen der drohenden Verletzung und der entsprechenden Schutzbewegung, deren Ausbildung ganz ohne irgend ein bewußtes oder unbewußtes Schlußverfahren durch biologische Vorgänge im Sinne von DARWINS Überlegungen erfolgt. Wir können solche Zuordnungen im ganzen Naturreich konstatieren, auch in Fällen, wo die Möglichkeit eines bewußten Schlusses wegen Abwesenheit eines Zentralorgans von vornherein ausgeschlossen ist.

So bestehen auch in unserer Farbempfindung wegen der maßgebenden biologischen Wichtigkeit des Sehorgans zahllose Zuordnungen, welche durch ihren biologischen Nutzen unmittelbar bedingt sind und sich durch Auslese während ungezählter Zeiten befestigt haben, ohne daß jemals ein besonderes Schlußverfahren für diese gegenseitige Zuordnung nötig gewesen wäre. Zu diesen Anpassungen gehört unsere Beurteilung der Farbe als einer wesentlich durch das Objekt bedingten Erscheinung auf Grund der für die Remission des Lichtes von den Körpern erfahrungsmäßig bestehenden Beziehungen oder Gesetze. Mit diesen Gesetzen haben wir uns deshalb zunächst zu beschäftigen.

Drittes Stück.

Photometrie der unbunten Körperfarben.

31. **Die ideal weiße Fläche.** Die überwältigende Mehrheit unserer Gesichtserlebnisse beruht auf Wirkungen, die von *zurückgeworfenem* Sonnenlicht herrühren, dessen Beschaffenheit durch die zurückwerfenden Flächen in wesentlichen Stücken abgeändert worden ist. Wir wollen diese Zurückwerfung, welche sowohl die regelmäßige, wie die diffuse Reflexion, wie insbesondere die Mischungen aus beiden umfassen soll, nach HERINGS Vorgang *Remission* nennen. Es sind demgemäß die allgemeinen Verhältnisse des remittierten Lichtes festzustellen, um daraus zu entnehmen, welchen Mannigfaltigkeitscharakter unsere allgemeinen Farbenerlebnisse haben.

Der Hauptpunkt hierbei ist folgender: Während wir bei den bezugsfreien Farben niemals eine Norm haben, mittels deren wir die absolute Intensität des in das Auge tretenden Lichtes beurteilen und abschätzen können (da ja die Organisation unseres Auges besonders darauf angelegt ist, den Einfluß der wechselnden absoluten Intensität auszuschalten), haben wir bei den optischen Eindrücken unserer gewöhnlichen Umgebung beständig derartige Normen zur Hand, auf welche wir die anderen Farben beziehen. Daher können wir mit Recht im Gegensatz zu den oben abgehandelten bezugsfreien Farben die gewöhnlichen Farbenerlebnisse *bezogene* Farben nennen.

Diese Norm oder Einheit ist durch eine Oberfläche gegeben, welche das darauf fallende Licht *vollständig zurückwirft*, aber ohne Lokalisierung etwa verschiedener Lichtmengen, die von verschiedenen Richtungen darauf gefallen sind, also auch *vollständig zerstreut*. Eine solche Fläche heißt eine *ideal weiße Fläche*. Dabei bringt der Ausdruck „weiß“ nicht nur den Umstand der vollständigen *Zurückwerfung*, sondern auch den der vollständigen *Zerstreung* zum Ausdruck. Denn eine vollständig zurückwerfende Fläche, die nicht zerstreut, heißt ein vollkommener *Spiegel*.

Der Übergang von einem vollkommenen Spiegel zu einem vollkommenen Weiß erfolgt dadurch, daß man sich den Spiegel in eine große Anzahl nach allen Seiten spiegelnder kleinster Flächen zerlegt denkt, deren Sehwinkel unterhalb der Schwelle der Unterscheidbarkeit liegt, so daß die gesamte Fläche einen ebenen Eindruck macht.

32. Physikalische Bedingungen. Ein solcher Zustand wird technisch mit geringerer oder größerer Annäherung verwirklicht, wenn man die Oberfläche aus lauter kleinen farblos durchsichtigen Körnchen von im übrigen unregelmäßiger Gestalt gebildet denkt. Fällt das Licht von außen auf eins dieser Körnchen, so wird nach bekannten optischen Gesetzen zunächst ein Teil, der von dem relativen Brechungskoeffizienten abhängig ist, von der Oberfläche reflektiert, während ein anderer (meist größerer) Teil in das Innere hineintritt. Der Austritt aus den Körnchen, dessen Brechungskoeffizient im allgemeinen als erheblich gegenüber der Umgebung vorausgesetzt werden darf, kann nur unter einem Winkel erfolgen, welcher kleiner ist als der der totalen Reflexion; es wird also durch letztere ein erheblicher Teil des einfallenden Lichtes zurückgeworfen werden. Dieser findet zum Teil nach oben seinen Ausweg, zum Teil erleidet er wiederholte totale Reflexionen, bis er das Innere des Kernes vollständig verlassen hat. Das ausgetretene Licht läßt wiederum zwei Anteile unterscheiden. Der eine hat seinen Weg in das Freie gefunden und vermehrt das remittierte Licht, der andere dringt in das Innere der Schicht und erfährt dort in dem nächsten Körnchen, welches er antrifft, die gleichen Vorgänge, welche das Licht in einen remittierten und einen durchgegangenen Anteil spalten. Für letzteren gilt das eben Gesagte von neuem. Das Endergebnis dieser Vorgänge ist, wenn wir vollständige Durchsichtigkeit der Körnchen voraussetzen und somit keine Gelegenheit zu einem Lichtverlust vorhanden ist, eine vollständige Remission des eingedrungenen Lichtes nach Menge und Farbe. Nur mit dem Unterschiede, daß wenn auch das eingedrungene Licht je nach seinem Azimut verschiedene Intensität besaß, das zurückgeworfene Licht seinerseits derart gleichmäßig verteilt ist, daß ein optisch gleich großes Gesichtsfeld der Oberfläche, in welcher Richtung diese auch betrachtet werden mag, eine gleiche Lichtmenge aussendet. Dieses bedingt, wie vor langer Zeit bereits LAMBERT gezeigt hat, daß die von der Flächeneinheit

der weißen Fläche ausgesendete Lichtmenge dem Kosinus des Ausstrahlungswinkels proportional ist.

33. Herstellung. Die Frage, ob sich eine derartige ideale weiße Fläche *verwirklichen* läßt, ist in gleicher Weise zu beantworten, wie die nach der Verwirklichung aller irgendwie definierten rationellen Ideale. Es läßt sich nur eine Annäherung an das Ideal verwirklichen, die immer um eine endliche, aber stets durch technische Hilfsmittel verkleinerbare Grenze vom Ideal entfernt bleibt.

Und es ist jeweils Aufgabe der Experimentalwissenschaft, festzustellen, welches die Umstände sind, die eine vollständige Verwirklichung verhindern, um die Verhältnisse so einzurichten, daß die störenden Umstände so klein wie möglich werden, wenn sie, was im allgemeinen der Fall zu sein pflegt, sich nicht vollständig fortschaffen lassen. Im vorliegenden Falle ist offenbar die vollständige Zurückwerfung des auffallenden Lichtes davon abhängig, daß es bei seinen Bewegungen und Richtungsänderungen innerhalb der diffus reflektierenden oder weißen Schicht keine Verluste erleidet. Da uns nun Lichtverluste durch Reflexion nicht bekannt sind, bleibt nur die Möglichkeit der Lichtverluste durch *Absorption* übrig. Hieraus geht hervor, daß die weiße Schicht sich umso mehr dem Ideal annähern wird, je geringer die Absorptionsverluste sind. Diese hängen aber erstens von der Natur des durchsichtigen Mittels ab und zweitens von der Länge der Wege, welche das Licht darin zurücklegt. Daraus geht hervor, daß zunächst eine Schicht umso weißer sein wird, je farblos-durchsichtiger das Material der Körnchen ist.

34. Korngröße. Dies bezieht sich auf die spezifische Absorption. Was die *Länge der Wege* anbelangt, so hängt diese offenbar von zwei Faktoren ab, nämlich der Größe der Körnchen und der Häufigkeit der Bedingungen, unter welchen die totale Reflexion eintritt. Die Größe der Körnchen hat den Einfluß, daß bei gegebenen anderen Verhältnissen für die vollständige Zurücksendung des auffallenden Lichtes nicht die absoluten Dimensionen maßgebend sind, sondern ihre *Anzahl*. Denken wir uns nämlich irgend einen Sonderfall so durchkonstruiert, daß der Weg des einfallenden Lichtes überall verfolgt ist und eine so große Anzahl von Schichten der reflektierenden Körnchen angenommen ist, daß die letzten Schichten nur noch einen unterhalb der Meßgrenze liegenden Bruchteil des Lichtes durchlassen (beispielsweise $1/1000$). Eine solche

Schicht wird ihre Wirkung vollständig beibehalten, wenn man sich die Abmessungen der Körnchen, die von absoluter Durchsichtigkeit angenommen sein sollen, in beliebigem Maßstabe vergrößert oder verkleinert denkt. Will man also die Schichtstärke praktisch vollständiger Remission in Gewichtsmengen des weißen Stoffes auf die Flächeneinheit ausdrücken, so wird diese Menge proportional der Größe der Teilchen sein. Und zwar handelt es sich hierbei, wie man alsbald erkennt, nicht um das Volum, sondern um die *linearen* Dimensionen der Teilchen. Um also mit der halben Gewichtsmenge des Stoffes dasselbe optische Resultat zu erzielen, muß das Volum und Gewicht der Körnchen auf den achten Teil herabgesetzt werden.

Da nun absolut durchsichtige Stoffe nicht vorhanden sind, so folgt, daß man eine umso bessere Annäherung an das ideale Weiß wird erlangen können, je kleiner die Stoffteilchen hergestellt werden. Denn hierdurch wird der Weg des Lichtes im Innern der Körnchen, wo es der Absorption ausgesetzt, auf ein Minimum gebracht.

35. Untere Grenze. Ihre Grenze hat diese Verbesserungsmöglichkeit an den *Dimensionen der Lichtwellen*. Nähern sich die Körnchen diesen Beträgen oder werden sie gar kleiner, so hört die Gültigkeit der für die Betrachtung benutzten Reflexionsgesetze auf und es erfolgt eine zunehmend geringere Remission des Lichtes, welche zuletzt bei genügender Kleinheit in der Nähe der molekularen Dimensionen vollständige Durchsichtigkeit ergibt.

36. Einfluß der Lichtbrechung. Die Menge des unter gegebenen Umständen reflektierten Lichts ist ferner, wie erwähnt, abhängig von dem *Brechungskoeffizienten* und zwar dem *relativen* Brechungskoeffizient der Körnchen im Verhältnis zu ihrer Umgebung. Zunächst vermehrt sich das von der Oberfläche reflektierte Licht im gleichen Sinne wie der Brechungskoeffizient, ferner aber nimmt auch das Gebiet der totalen Reflexion schnell mit wachsendem Brechungskoeffizienten zu. Somit wird unter sonst gleichen Umständen insbesondere bei gleicher Korngröße eine farblose Schicht umso weißer sein, je größer der relative Brechungskoeffizient der Körnchen ist.

37. Ergebnis. Das allgemeine Ergebnis dieser Betrachtungen ist, daß *jeder farblose durchsichtige Stoff*, wenn er in Gestalt hinreichend kleiner Körnchen und in hinreichend dicker Schicht

auf irgend einem Grunde eben ausgebreitet ist, als *weißer* Körper in dem definierten Sinne wirkt, wobei die Unvollständigkeit, mit welcher die genannten Idealbedingungen erfüllt sind, die Abweichung des erzielten Produktes von der idealen Weiße bestimmt. Da wir über eine große Anzahl von Stoffen verfügen, die auch bei erheblichen, nach Zentimetern zu zählenden Schichtdicken nahezu farblos sind, so ist daraus zu schließen, daß es eine entsprechend große Anzahl von Stoffen geben muß, die bei geeigneter mechanischer Beschaffenheit solche weiße Schichten ergeben.

Tatsächlich finden wir eine große Anzahl von Substanzen, die als weiße Farbstoffe dienen. Von allen wissen wir, daß sie im zusammenhängenden Zustande farblos durchsichtig sind und daß sie somit ihre Benutzbarkeit als weiße Farbstoffe, die man mit dem Namen *Deckfähigkeit* bezeichnet, dem Umstande verdanken, daß sie fein zerteilt sind. Neben Farblosigkeit und Feinkörnigkeit ist noch, wie wir gesehen haben, der Brechungskoeffizient maßgebend. Demgemäß ist der meistgebrauchte weiße Farbstoff, das Bleiweiß, durch einen besonders hohen Betrag des Brechungskoeffizienten ausgezeichnet, der bei dem Hauptbestandteil des Bleiweißes, dem Bleikarbonat bis über zwei steigt. Die drei Brechungskoeffizienten des zweiachsigen (rhombischen) Bleikarbonats sind nämlich 1,80, 2,08 und 2,08 für Natriumlicht.

38. Bindemittel. Dieser hohe Brechungskoeffizient kommt namentlich aus folgenden Ursachen in Betracht. Man kann die Pulver der farblosen Stoffe nicht unmittelbar als Pigmente verwenden, da sie ohne weiteres nicht auf den zu bekleidenden Oberflächen haften würden. Es ist deshalb nötig, ein *Bindemittel* zuzufügen, durch welches diese Haftung und womöglich eine erhebliche mechanische Widerstandsfähigkeit der erzeugten Schichten bewirkt wird. Als Bindemittel dienen ohne Ausnahme *kolloide* Stoffe, die möglichst farblos sind und daneben die gewünschten mechanischen Eigenschaften haben. Unter solchen Stoffen kann man die beiden großen Gruppen der wasserlöslichen und der ölartigen unterscheiden. Die wasserlöslichen Bindemittel sind erstens die (stickstofffreien) Angehörigen der Gruppe der Kohlehydrate, wie Gummi, Dextrin, Stärke und zahlreiche ähnliche Produkte und zweitens die (stickstoffhaltigen) Angehörigen der Eiweißstoffe, unter denen Leim, Kasëin und Hühnereiweiß die ausgedehnteste Anwendung finden.

Die andere Gruppe Bindemittel wird durch die „trocknenden Öle“ und die Harze gebildet. Die trocknenden Öle sind normale Glyzeride gewisser ungesättigter Fettsäuren, welche die Fähigkeit haben, sich an der Luft freiwillig zu oxydieren und dabei in komplexere Verbindungen überzugehen, welche starr und in den üblichen Lösungsmitteln nicht löslich sind. Die andere Gruppe solcher Bindemittel wird von Harzen gebildet, die gleichfalls kolloide hochmolekulare organische Säuren und auch entsprechende Ester darstellen, die bereits für sich fest sind und in den flüssigen Zustand durch die Vermittelung von Lösungsmitteln gebracht werden. Diese beteiligen sich nicht an dem Aufbau des fertigen getrockneten Farbüberzuges, da sie verdunsten und das gelöste Kolloid als durchsichtige Masse hinterlassen. In sehr vielen Fällen werden beide Formen kombiniert, indem man Harze in trocknenden Ölen auflöst und mit flüchtigen Lösungsmitteln vermischt.

Eine besondere Rolle spielt als anorganisches kolloides Bindemittel die *Kieselsäure*, deren Anwendung indessen durch den Umstand sehr beschränkt ist, daß haltbare wässrige Lösungen nur mit Hilfe von überschüssigem Alkali herstellbar sind, dessen chemische Einwirkung auf die Pigmente den Kreis der anwendbaren Substanzen sehr stark einschränkt. Ob das *Kalziumkarbonat*, welches bei der Freskomalerei als Bindemittel dient, sich unter den gegebenen Umständen kolloid, d. h. amorph ausscheidet, ist anscheinend bisher noch nicht untersucht worden.

Alle derartigen Bindemittel haben nun ihrerseits einen bestimmten Brechungskoeffizienten und ihre Zwischenlagerung zwischen die Körnchen des Pigments bedingt eine Verminderung der relativen Lichtbrechung der letzteren, vermindert somit die Deckfähigkeit der mit dem betreffenden Bindemittel hergestellten Tünche. Die Verminderung ist um so größer, je größer der Brechungskoeffizient des Bindemittels ist und je vollständiger dies die Zwischenräume zwischen den Körnchen ausfüllt. Daher können für ölige und harzige Bindemittel, welche in dieser Beziehung die höchsten Werte aufweisen, nur solche Pigmente dienen, welche ihrerseits besonders hohe Brechungskoeffizienten haben. Dies ist beim Bleiweiß und in etwas minderem Maße auch beim Zinkweiß der Fall, dessen sehr viel feinere Zerteilung aber diesen Nachteil mehr als aufhebt, so daß bei gleichen Gewichtsmengen Zinkweiß erheblich besser deckt als Bleiweiß. Es ist dagegen nicht der

Fall beim Kalziumkarbonat, welches in Gestalt von Kreide als besonders wohlfeiles weißes Pigment ausgiebige Anwendung findet, aber wegen seines niedrigen Brechungskoeffizienten (1,66 und 1,49) nur mit wässerigen Bindemitteln verwendbar ist, wobei diese noch so sparsam als möglich angewendet werden müssen, damit nicht allzu viel optische Brücken zwischen den Körnchen der Tünche nach dem Trocknen bestehen bleiben.

39. Das Normalweiß. Um experimentell festzustellen, in welchem Maße ein gegebenes Pigment dem Ideal eines reinweißen Farbstoffes sich annähert, gibt es zwei Wege. Zunächst kann man relativ die Lichtmengen messen, welche verschiedene weiße Farbaufstriche zurücksenden und auf solche Weise sich systematisch der Art des Pigmentes nähern, welches am vollkommensten das Ideal realisiert, d. h. im Verhältnis zu allen anderen das meiste Licht zurücksendet.

Dieses Verfahren führt indessen nur dazu, eine *relativ* weißeste Schicht festzustellen, gestattet aber nicht, die absolute Annäherung einer solchen Schicht an das ideale Weiß zu messen. Um dieses zu tun, wäre erforderlich, unter genau definierten Bedingungen einen solchen Überzug mit gemessenen Lichtmengen zu beleuchten und die Intensität des remittierten Lichtes zu bestimmen. Die theoretische Photometrie besagt, daß, wenn eine solche Fläche durch eine gleichmäßig leuchtende Halbkugel beleuchtet wird, bei vollkommener Weiße jede Flächeneinheit der beleuchteten Schicht dieselbe Lichtmenge aussenden würde, wie die Flächeneinheit der leuchtenden Halbkugel. Erfolgt die Beleuchtung nicht durch eine Halbkugel, sondern durch ein kleineres Gebiet, so ist deren Intensität zunächst proportional dem Verhältnis des Raumwinkels der leuchtenden Fläche zu dem Raumwinkel der Halbkugel und hängt außerdem noch von der Richtung sowohl der Beleuchtung, wie der Zurückwerfung gemäß dem Kosinus der entsprechenden Winkel ab. Dieser Betrag müßte in dem remittierten Licht bei idealer Weiße wiedergefunden werden.

Wenn ein für allemal die Weiße (Albedo) einer irgendwie in wiederholbarer Weise definierten Schicht dergestalt nach absolutem Maße gemessen ist, so besteht die Möglichkeit, durch relative Messungen, wie oben angegeben, jede andere weiße Schicht an jene anzuschließen und somit ihre Weiße in absolutem Maße auszudrücken.

Es ist eine bemerkenswerte Tatsache, welche die geringe wissenschaftliche Entwicklung auf diesem Gebiete kennzeichnet, daß wir keinerlei abschließende Forschungen besitzen, durch welche die Weiße irgend eines wohldefinierten Pigments in absolutem Maße bestimmt ist. Das wesentlichste Hindernis hierbei ist gewesen, daß die Herstellung einer Schicht, welche in idealer Weise diffus reflektiert, welche also sowohl für Beleuchtung, wie für Zurückwerfung dem LAMBERTSchen Kosinusetz folgt, noch nicht erreicht, ja kaum angestrebt worden ist, nachdem sich ergeben hatte, daß die gewöhnlich benutzten weißen Flächen mehr oder weniger orientierte Spiegelung neben der Lichtzerstreuung aufweisen. Da ich mit den naturgemäß sehr beschränkten Hilfsmitteln meines Privatlaboratoriums eine derartige messende Fundamentalarbeit nicht in Angriff zu nehmen vermag, muß diese Frage vorläufig auf sich beruhen bleiben. Es steht zu hoffen, daß in absehbarer Zeit eine zuständige Stelle (in erster Linie wohl die Physikalisch-technische Reichsanstalt) die Bearbeitung dieser Grundfrage der Farbenlehre in Angriff nehmen wird.

40. Das Halbschatten-Photometer. Bis dies geschehen ist, muß man sich mit *relativen* Bestimmungen der Weiße begnügen. Um solche mit dem Genauigkeitsgrad auszuführen, der für die vorliegenden Forschungen als notwendig und zureichend angesehen werden kann (bis $\frac{1}{2}$ Prozent) habe ich ein Photometer konstruiert, welches unter Aufopferung der letzten Genauigkeit von 0,1 Prozent, deren Erreichung hier keinen Zweck hätte, ein bequemes und hinreichend exaktes Arbeiten gestattet.

Jedes Photometer, welches mit dem Auge benutzt wird, besteht aus zwei Teilen. Der eine hat den Zweck, die Lichtmengen, welche auf die zu vergleichenden Flächen fallen, meßbar zu verändern, wobei die Veränderlichkeit eine der Lichtmengen oder beide gleichzeitig betreffen kann. Der andere Teil hat den Zweck, diese beiden Lichtmengen durch optische Hilfsmittel derartig zur Wirksamkeit zu bringen, daß sie ohne Trennungslinie im Gesichtsfelde zusammentreffen. Denn das Auge ist unfähig, quantitative Bestimmungen auszuführen und kann nur als Nullinstrument die Gleichheit oder Ungleichheit, sowie im letzteren Falle den Sinn der Ungleichheit konstatieren.

Was nun den ersten Teil, die meßbare Veränderung der Beleuchtung betrifft, so gibt es hier eine Anzahl verschiedener Hilfs-

mittel, die nicht im einzelnen dargelegt werden sollen. Für den vorliegenden Zweck erschien von den vorhandenen Möglichkeiten die meßbare Vergrößerung oder Verkleinerung einer diffus leuchtenden Fläche, die sich in unveränderlicher Entfernung von der beobachteten erleuchteten Fläche befindet, als die einfachste und bezüglich der Genauigkeit befriedigendste Lösung der Aufgabe. Für den optischen Teil kam in Betracht, daß das Photometer nicht nur zum Vergleiche grauer Flächen, sondern auch für die Zwecke der heterochromen Photometrie dienen sollte. Für den letzten Fall ist aber nachgewiesen worden, daß übereinstimmende Resultate nur erhalten werden, wenn das Gesichtsfeld bezüglich der zu vergleichenden Farben ganz symmetrisch gestaltet ist. Hieraus ergab sich, daß man auf die von LUMMER und BRODHUHN ausgebildeten vorzüglichen Photometerköpfe verzichten muß, die eine hohe Genauigkeit bei bequemer Einstellung gewähren, weil sie in allen ihren Ausführungsformen ein nicht streng symmetrisches Gesichtsfeld ergeben. Da die letzte Genauigkeit nicht angestrebt wurde, erwies sich der altbekannte WOLFSche Kolorimeterkopf, der aus zwei rhombischen Prismen besteht, durch welche die zwei Halbkreise eines kreisförmigen Gesichtsfeldes beleuchtet werden, als die zweckmäßigste optische Lösung. Bekanntlich erlangt man bei diesem verhältnismäßig einfachen Apparat eine gute Berührung der beiden zu vergleichenden Felder dadurch, daß man den einen Rhombus, dessen Kante besonders sorgfältig bearbeitet ist, ein wenig über den andern hervorragen läßt. Vorversuche mit improvisierten Apparaten überzeugten mich von der Zweckmäßigkeit dieser Maßnahmen und nach Beseitigung einiger weniger gut angepaßter Formen hat sich die nachstehend beschriebene als dauernd lebensfähig erwiesen.

41. Technische Einzelheiten. Der Apparat ist in Fig. 1 in seitlichem Aufriß dargestellt. Er besteht aus einem hölzernen Kasten, der nach dem Licht zu in einen Schlot ausläuft, welcher sich mit einer Neigung von 45° nach oben erhebt. Diese Richtung ist gewählt worden, weil in solcher am leichtesten eine intensive Beleuchtung durch Himmelslicht erreichbar ist. An dem oberen Ende des Schlots befindet sich eine Schlitzvorrichtung, die alsbald genauer beschrieben werden soll. Sie enthält zwei unabhängig verstellbare Öffnungen und sendet ihr Licht in die beiden Hälften des Photometers, die durch eine lichtdichte vertikale Scheidewand, welche den Kasten

in zwei symmetrische Hälften teilt, gebildet werden. Die zu vergleichenden Aufstriche oder anderen Objekte werden auf den Boden jedes Abteils gelegt, zu welchem Zweck die hintere Seite sich als Falltür öffnen läßt. Oben befindet sich der bereits erwähnte

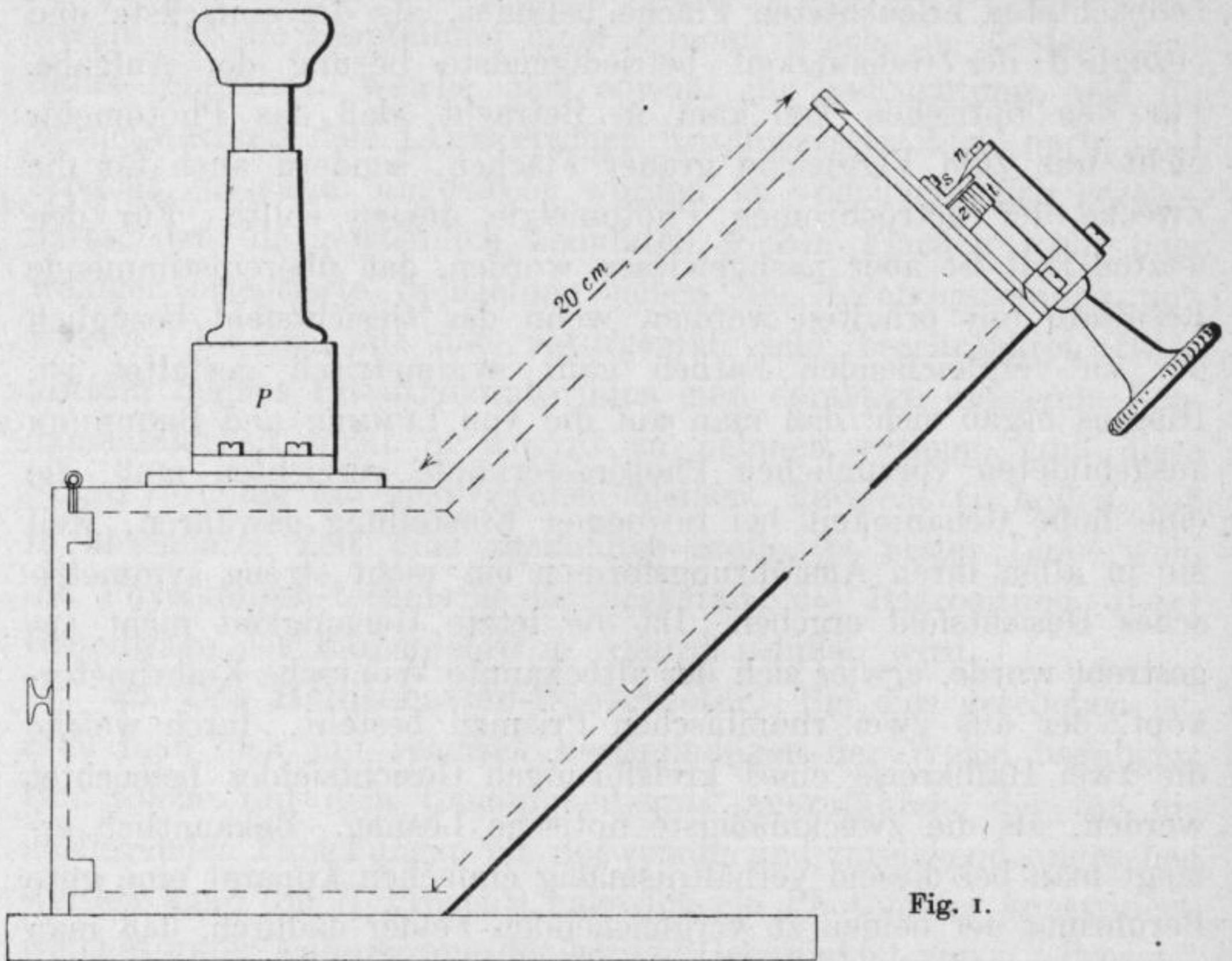


Fig. 1.

Photometerkopf nach WOLF, durch den das von den Objekten zurückgeworfene Licht in das Gesichtsfeld geleitet wird.

Wie man sieht, ist durch die Anordnung ein für allemal das Verhältnis zwischen dem Winkel der Beleuchtung und dem der Betrachtung geregelt. Und zwar erfolgt die Betrachtung normal, während die Beleuchtung unter 45° wirkt. Man kann beide Winkel nur insofern ändern, als man die zu beobachtenden Objekte auf Böcke verschiedenen Winkels legt, so daß Beleuchtungs- und Betrachtungswinkel gleichzeitig um denselben Betrag geändert werden. Da es bei den vorzunehmenden Untersuchungen sich nicht um derartige Fragen handelte, habe ich von der Verstellbarkeit der beiden Richtungen gegeneinander, die technisch ja ausführbar wäre, Abstand genommen und die mitzuteilenden Messungen sind ausschließlich unter den eben geschilderten Verhältnissen von Beleuchtung und Beobachtung angestellt worden. Für die Wahl

dieser Verhältnisse war maßgebend, daß dies die Bedingungen sind, unter denen man fast ausnahmslos Gegenstände mit vorwiegend ebener Fläche, wie Bilder u. dgl. betrachtet.

42. Der Stellspalt. Die Beleuchtungseinrichtung, welche sich am oberen Ende des Schlotes befindet, ist in Fig. 2 in gerader Aufsicht abgebildet. Sie besteht aus einem messingenen Rahmen *RR*, in welchen zwei quadratische Öffnungen von 50 mm Seite geschnitten sind, zwischen denen ein Streifen von 7 mm Breite liegt. Jede dieser Öffnungen beleuchtet eine der symmetrischen Hälften des Photometers. In dem Rahmen bewegen sich die Backen *B* mit Hilfe der Zahnstangen *Z* und der Triebe *t*. Dadurch, daß die Zahnstange in der Mitte der Backen angeordnet ist, wird eine vollständige Vermeidung des seitlichen Klemmens und ein

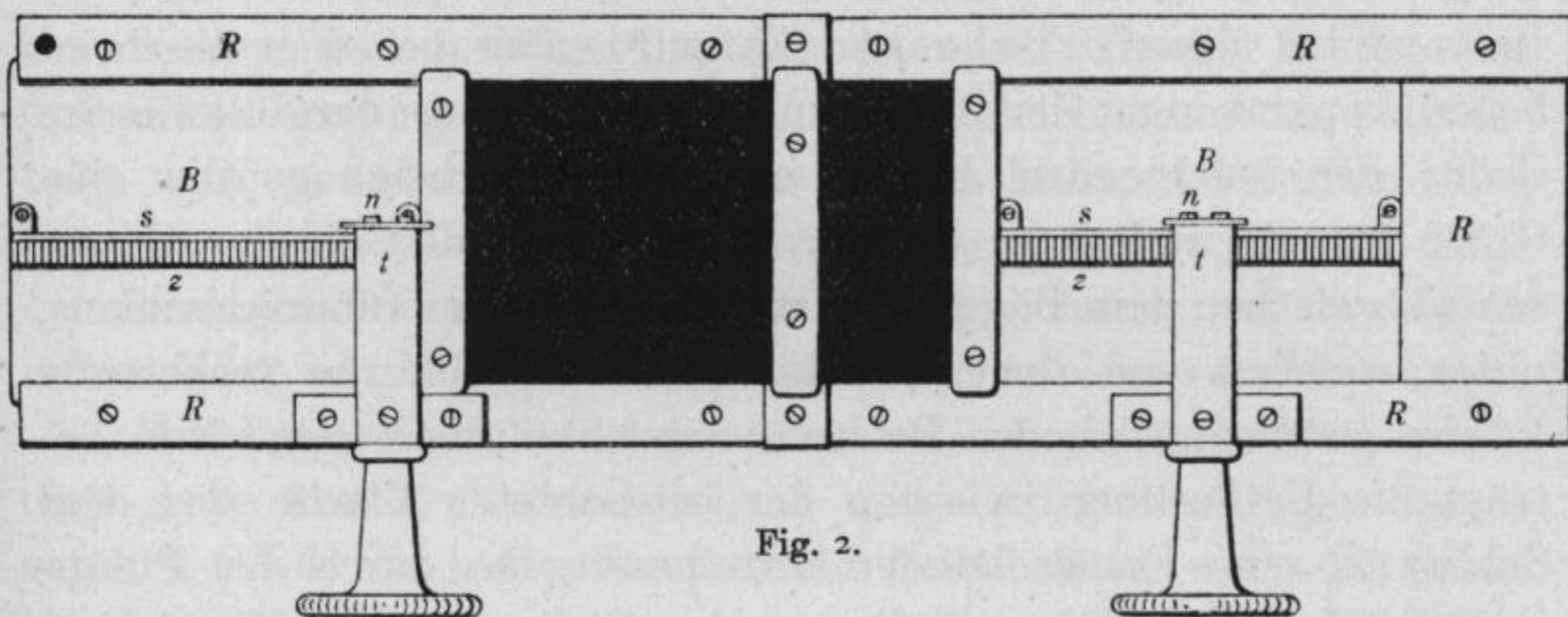


Fig. 2.

überaus weicher und regelmäßiger Gang der Backen erreicht. Diese gestatten eine Bewegung von etwas mehr als 50 mm Weite, so daß man die beiden quadratischen Öffnungen vollständig öffnen und schließen kann. Um die Weite der Öffnung zu messen, sind in der Mittellinie beider Backen die Skalen *s* angebracht, welche in halbe Millimeter geteilt sind. Bei *m* finden sich Zehnernonien angebracht, welche eine weitere Teilung der Ablesung gestatten, so daß die Schlitzbreite auf $\frac{1}{1000}$ ihres Wertes festgestellt werden kann. Eine umschlagbare Lupe, die nicht gezeichnet ist, erlaubt beide Nonien bequem abzulesen.

Die Messung besteht darin, daß man auf die eine Seite des Photometers ein Blatt Normalweiß bringt, auf die andere das zu untersuchende Grau. Dann wird die Lichtöffnung beim Normalweiß so weit geschlossen, bis beide Gesichtsfelder gleich erscheinen und die hierzu erforderliche Schlitzweite abgelesen. Dieser Schlitz-

weite darf die Lichtmenge, welche auf das Normalweiß gefallen ist, proportional gesetzt werden, und sie gibt demgemäß unmittelbar in Tausendsteln des Normalwertes die Helligkeit des untersuchten grauen Aufstriches an. Indem man durch eine leichte Handbewegung den Schlitz um die Gleichheitsstellung bewegt, kann man sich die endgültige Einstellung sehr erleichtern. Die Anbringung der geteilten Skala in der Mittellinie der beweglichen Backen bedingt, daß ein etwaiger Mangel der Parallelführung der Backen unschädlich wird, da beim Schrägliegen der Kante die eine Hälfte des Gesichtsfeldes ebenso viel gewinnt, wie die andere verliert.

Wie man sieht, beruht die Einrichtung des Apparates auf dem photometrischen Gesetz, daß die Beleuchtung eines Gegenstandes durch eine diffus leuchtende Fläche proportional dem Raumwinkel dieser Fläche ist. Es wird aber bei dem beschriebenen Apparat nicht der Raumwinkel gemessen, sondern die lineare Größe der leuchtenden Fläche und die Berechtigung, die eine Größe für die andere zu setzen, hängt davon ab, ob der Unterschied zwischen dem Bogen und der Tangente des Öffnungswinkels, unter welchen von der beleuchteten Stelle aus die leuchtende Fläche gesehen wird, den Beobachtungsfehler übersteigt. Nun beträgt die Entfernung zwischen der beleuchteten Fläche und dem Schlitz 29 cm. Ferner ist der Mittelpunkt, der durch den Photometerkopf beobachteten Stelle um 12 mm von der Mittelachse des vollständig geöffneten Photometers entfernt. Hieraus folgt, daß der größte Winkel, um den die Beleuchtungsrichtung von der normalen abweicht, weniger als 3° beträgt. Für diesen Winkel ist der Bogen 0,05236 und die Tangente 0,05241, der Unterschied zwischen beiden beträgt also noch etwas weniger als $\frac{1}{1000}$, welches die äußerste Grenze ist, bis zu welcher die Schlitzbreite abgelesen werden kann.

43. Die Beleuchtung. Das Photometer war aus naheliegenden Gründen für die Benutzung von Tageslicht konstruiert worden, und ich nahm zunächst an, daß der Teil des Himmels, auf den es gerichtet war, wenn der Apparat unmittelbar am Fenster stand, genügend genau die gleichmäßig leuchtende Fläche darstellen würde, die bei der Konstruktion vorausgesetzt worden war.

Indessen konnte ich mich bald überzeugen, daß der Apparat in hohem Maße empfindlich gegen vorüberziehende Wolken, wech-

selnden Sonnenstand und ähnliche Ursachen war, da die Schlitzvorrichtung namentlich bei den hauptsächlich zur Verwendung kommenden geringen Schlitzbreiten, hinreichend kräftig als Lochkamera wirkte, um sehr merkbare Ungleichheiten der Beleuchtung an der beobachteten Stelle der Objekte hervorzurufen. Die Anwendung von Mattglas selbst in mehreren Schichten verbesserte zwar den Fehler, ließ ihn aber nicht vollständig verschwinden, während Milchglas, das in dieser Beziehung viel kräftiger wirkt, die Färbung des durchgehenden Lichtes zu stark beeinflußt.

Eine wesentliche Verbesserung wurde erzielt, als vor dem Apparat ein Schirm angebracht wurde, welcher aus vertikalen Glasstäben bestand, die eng aneinander gereiht und durch einen Rahmen zusammengefaßt waren. Jeder der Glasstäbe wirkte wie eine Zylinderlinse von kurzer Brennweite, durch welche das Bild der Wolken und sonstige Ungleichheiten am Himmel kräftig (bis 60°) in die Breite gezogen wurden. Die Ungleichheiten der Beleuchtung wurden dadurch in eine Anzahl von horizontal verlaufenden Bändern gleicher Lichtstärke übergeführt, wobei wegen der Lage der Glasstäbe vorhandene Ungleichheiten gleichartig auf die beiden miteinander verglichenen Hälften des Gesichtsfeldes verteilt wurden.

Mit dieser Einrichtung, die ganz befriedigend arbeitete, wurde eine große Anzahl der nachstehend mitgeteilten Messungen durchgeführt. Und ich hätte sie dauernd beibehalten, wenn ich nicht inzwischen in dem mit Paraffin getränkten Papier ein Material gefunden hätte, welches die erforderlichen Eigenschaften vollständiger Lichtzerstreuung bei ausreichender Durchlässigkeit und Farblosigkeit besitzt. So überzog ich damit das Fenster an den in Betracht kommenden Stellen, nämlich soweit, daß das von allen Punkten des Photometerbodens erreichbare Gesichtsfeld auf die diffus leuchtende Fläche traf. Damit war die theoretische Voraussetzung erfüllt. Daß diese zerstreuende Fläche nicht etwa unmittelbar vor oder hinter dem Schlitz angebracht wurde, hatte seinen Grund darin, daß ich eine möglichst große Lichtmenge in den Apparat bringen wollte. Dieser Zweck wurde besser durch die Anbringung der zerstreuenden Fläche an der Fensterscheibe erreicht, wo sie ganz erheblich mehr Licht empfing, als unmittelbar am Photometerschlitz möglich gewesen wäre.

Als *Objekte* der Messung kamen so gut wie ausschließlich Aufstriche auf Papier in Betracht. Hier stellte es sich, wie zu er-

warten war, alsbald heraus, daß das Papier völlig eben liegen muß, wenn nicht sehr merkliche Fehler durch wechselnde Neigung gegen die Richtung der Beleuchtung und die der Beobachtung entstehen sollen. Anfangs erfüllte ich diese Bedingung dadurch, daß ich zwei Glasplatten durch einen schmalen Streifen von Gewebe scharnierartig verband und das Papier, welches bis zum Augenblick der Beobachtung unter Druck zwischen ebenen Platten gehalten wurde, zwischen beide Gläser brachte. Es stellt sich indessen als wünschenswert heraus, die Beobachtung ohne das darüberliegende Glas anzustellen und so wurde später die obere Glasplatte des eben beschriebenen Trägers durch einen steifen Rahmen mit abgeschrägten Rändern ersetzt, der auf das Probeobjekt gedrückt und durch eine kleine entsprechende Vorrichtung festgehalten werden konnte.

Da das Gesichtsfeld, von welchem Licht in den Photometerkopf gelangt, weniger als 10 mm Durchmesser hat, so brauchen die Papierproben nicht groß zu sein. Dagegen ist mit großem Nachdruck darauf zu achten, daß die Aufträge gleichförmig und von Pinselspuren so frei wie möglich sind. Sind solche nicht vollständig zu vermeiden, so wirken sie am wenigsten nachteilig, wenn sie parallel der Längsachse des Photometers verlaufen, worauf man beim Ausschneiden der Proben Rücksicht nehmen kann. Am Boden des Photometers sind Führungsleisten angebracht, durch welche der beschickte Rahmen jedesmal an genau dieselbe Stelle geschoben wird.

44. Subjektive Vorsichtsmaßregeln. Das menschliche Auge ist bekanntlich viel mehr auf die Beobachtung räumlicher Verschiedenheiten im Gesichtsfelde als auf die Schätzung von Lichtintensitäten eingerichtet. Deshalb ist die Benutzung des Auges zur Messung von Helligkeitsverschiedenheiten und -gleichheiten ein einigermaßen unnatürliches Verfahren, und man muß es künstlich in die Lage versetzen, eine Aufgabe zu lösen, welche ihm gewöhnlich gar nicht gestellt ist.

Die objektiv hier erforderlichen Maßnahmen, insbesondere das scharfe Aneinandergrenzen der zu vergleichenden Felder sind wohl bekannt und soweit sie hier in Betracht kommen, bereits früher erörtert worden. Auch in bezug auf die subjektive Seite sind die Bedingungen wohlbekannt, welche beim Photometrieren beobachtet werden müssen, um gute Resultate zu erhalten. Denn die tech-

nische Bedeutung dieses Verfahrens zur Beurteilung von Beleuchtungsverhältnissen von Gas- und elektrischen Lampen usw. hat zu einer weitgehenden Entwicklung der Methode geführt. Wenn daher auch schwerlich erheblich Neues zur Sache gesagt werden kann, so wird es doch von Wert sein, die Gesichtspunkte kennen zu lernen, welche man bei der Benutzung des vorbeschriebenen Halbschattenphotometers besonders beachten muß.

Daß man zunächst in einem halbverdunkelten Raume, d. h. in einem solchen arbeitet, in dem die zu vergleichenden Gesichtsfelder als relativ hell erleuchtete Objekte erscheinen, ist bereits erwähnt worden. In einem solchen Raum adaptiert sich das Auge an seine Umgebung und wird für die vorgelegte Aufgabe besonders empfindlich und brauchbar. Da es sich ferner um die Vergleichung zweier aneinandergrenzender, also räumlich verschiedener Teile des Gesichtsfeldes handelt, so ist offenbar eine unbedingte Voraussetzung für die Genauigkeit des Vergleiches, daß das Gesichtsfeld seinerseits überall in einem Zustand gleicher Empfindlichkeit ist. Dieser Zustand, wenn er auch vorher erreicht war, wird nun zerstört, falls, wie das im allgemeinen der Fall ist, die beiden Hälften zunächst im Gesichtsfeld stark verschiedene Helligkeit haben. Es entsteht dann durch die hellere Hälfte ein Nachbild im Auge, und da dieses annähernd die eine Hälfte des Gesichtsfeldes auch weiterhin deckt, so ist dadurch folgende Fehlerquelle gegeben. Die ersten Einstellungen auf Gleichheit der beiden Gesichtsfelder erfolgen unter dem Eindruck dieses Nachbildes und sind infolgedessen in solchem Sinne falsch, daß diejenige Seite, welche vorher zu hell war, auch zu hell eingestellt wird, weil das entsprechende Gebiet der Retina weniger lichtempfindlich ist. Es entsteht demgemäß die allgemeine Erscheinung, daß die ersten Einstellungen sehr stark von den späteren abweichen, welche viel gleichförmiger sind. Da der Sinn der Abweichung von der zufälligen ursprünglich vorhandenen Verschiedenheit der Gesichtsfelder abhängt, so steht er in keinem systematischen Zusammenhang mit Faktoren, die in dem zu messenden Objekt selbst liegen, und die Ermittlung ihrer Ursache hat mir demgemäß eine verhältnismäßig große Mühe gemacht.

Man kann auf folgende Weise die Erscheinung vermeiden und gleichzeitig ein Maximum von Empfindlichkeit für das Auge herstellen. Nachdem der Apparat für die Beobachtung hergerichtet

und das zu untersuchende Objekt hineingebracht ist, wird zunächst eine annähernde Einstellung ausgeführt. Alsdann schließt man das Auge ohne Zwang und wartet, bis alle Nachbilder verschwunden sind. Die dazu nötige Zeit wird vermutlich individuell verschieden sein. Bei mir pflegt mit großer Exaktheit das Verschwinden der Nachbilder nach Ablauf von 30 Sekunden einzutreten. Sie erscheinen bekanntlich, wenn der ursprüngliche Eindruck einigermaßen stark gewesen war, hernach periodisch in abgeschwächter Form wieder, ich habe es aber nicht notwendig gefunden, auf dieses Wiederkommen noch besondere Rücksicht zu nehmen. Nachdem das Auge in solcher Weise nachbilderfrei ist, bewerkstelligt man die endgültige Einstellung. Die Ablesung des Nonius wird womöglich mit dem anderen Auge ausgeführt. Vor der zweiten Ablesung schließt man gleichfalls das Auge, aber nur während kürzerer Zeit und schaltet in solcher Weise während der fünf Ablesungen, die zu einem zusammenhängenden Satz von Beobachtungen desselben Objektes gehören, kürzere Ruhepausen von 10 bis 20 Sekunden ein. Es ist nicht erforderlich, zu diesem Zweck nach der Uhr zu sehen, vielmehr lernt man sehr bald Sekunden aus dem Gedächtnis zu zählen, wenn man dies zunächst unter Anwendung der Uhr einübt. Nach einiger Zeit erfolgt das Zählen im Sekundenrhythmus halb unbewußt. Man konstatiert bei dieser Behandlungsweise des Auges eine sehr erhebliche Einschränkung der bisherigen Abweichungen.

Sobald man das Auge angestrengt fühlt, unterbricht man die Beobachtungen, denn abgesehen davon, daß man das Organ zu schonen allen Anlaß hat, sind die Einstellungen unter solchen Umständen die Zeit nicht wert, die man an sie verwendet.

Eine weitere Quelle von Nachbildern ist das weiße Papier, auf welche man die Beobachtungen niederschreibt. Man tut gut, es auf dem Tische nur soweit zu beleuchten, daß man den Ort ohne Schwierigkeit findet, wo die Zahlen hinschreiben sind.

Ob es zweckmäßig ist, das Auge während der ganzen Beobachtungsreihe in der Zwischenzeit geschlossen zu halten, sei es durch das Augenlid, sei es durch einen besonderen schwarzen Deckel, den man mittels eines Gummibandes vor dem arbeitenden Auge befestigt und während der Beobachtung nach oben klappt, ist mir zweifelhaft geblieben. Denn mir schien, daß die Akkommodationsanstrengung, welche hernach bei der einzelnen Beobachtung er-

forderlich ist, um das ruhende und dabei unwillkürlich auf unendlich eingestellte Auge für das Gesichtsfeld brauchbar zu machen, den Gewinn der vollständigen vorhergegangenen Ruhe wieder aufbraucht. Doch wird dies Sache der Übung oder der Gewohnheit sein und jeder Beobachter wird nach dieser Richtung individuelle Besonderheiten haben, die ihn das eine oder das andere Verfahren werden bevorzugen lassen.

45. Das Substitutionsverfahren. Für die Ausführung der Helligkeitsmessungen ist weiterhin folgendes zu beachten. Die beiden Seiten des Halbschattenphotometers pflegen auch bei sorgfältiger Ausführung wegen der ungleichförmigen Verteilung der Beleuchtung nicht völlig übereinstimmend hell zu sein. Man hat also auf diese Verschiedenheit Rücksicht zu nehmen, die im wesentlichen unverändert bleibt, solange das Photometer seinen Stand beibehält. Um diese Verhältnisse zu übersehen und zu regeln, legt man zunächst beiderseits ein Blatt Normalweiß ein und stellt beide Öffnungen auf die größte Weite entsprechend 1000 Einheiten. Dann wird sich beim Betrachten des Gesichtsfeldes die eine oder die andere Seite als etwas heller erweisen. Man schließt auf der helleren Seite den Spalt so weit, daß beiderseits gleiche Helligkeit entsteht, wobei man die Einstellung etwa zehnmal wiederholt, um ein zuverlässiges Mittel zu erhalten. Stellt man die Schlitzöffnung auf diesen Mittelwert ein, so hat man dadurch das Photometer so gerichtet, daß beiderseits gleiche Lichtmengen einfallen. Nun wird das Normalpapier auf der dunkleren Seite, deren Öffnung = 1000 blieb, beibehalten, während auf der helleren Seite, deren Öffnung vermindert werden mußte, das zu untersuchende Objekt eingelegt wird. Da die Einstellung darin besteht, daß man die Beleuchtung des Normalweiß um so viel vermindert, bis sie der Helligkeit des Probeaufstriches gleich geworden ist, so gibt die verminderte Spaltbreite unmittelbar und ohne Korrektur die beobachtete Helligkeit an. Wenn man die umgekehrte Anordnung benutzte, müßte man die beobachteten Zahlen im Verhältnis der dort vorhandenen Einstellung zu 1000 vergrößern.

Handelt es sich um Arbeiten, die sich über eine längere Zeit erstrecken, so wird man beobachten, daß im Laufe einiger Wochen durch das Ansetzen von Staub auf dem Normalweiß, auch wenn man das Photometer inzwischen geschlossen hält, dessen Helligkeit um kleine Beträge abnimmt. Diese haben sich bei mir auch

nach jahrelanger Arbeit nicht über einige Prozente erhoben, doch wird dieses zum großen Teil dadurch bewirkt worden sein, daß auf dem Lande, wo diese Beobachtungen angestellt worden sind, der Rußgehalt des städtischen Staubes vollständig fehlt. Da es in der Natur der Sache liegt, daß der Helligkeitsverlust frischer Schichten durch Staub in der ersten Zeit am größten ist und sich asymptotisch einem Grenzwert annähert, so bietet sich folgendes Verfahren an. Statt bei eintretender Trübung des Normalweiß dieses gegen ein neues Blatt auszuwechseln, stellt man den Objektspace um so viel weiter, als dem Beleuchtungsverlust entspricht. Um dies auszuführen, legt man an der Objektseite ein frisches Blatt Normalweiß ein und stellt dort das Gleichgewicht gegen das alte Blatt her, wozu der Spalt noch ein wenig verengt werden muß. Ist durch zehnfache Wiederholung die mittlere Einstellung ermittelt, so kann man das Photometer benutzen als läge auf der Messungsseite ein Blatt frisches Normalweiß.

Das Verfahren erinnert an das einer exakten Wägung, die man unter Berücksichtigung der Ungleichheit der Länge der Wagebalken ausführt. Man kann entweder dieses Längenverhältnis bestimmen und bei jeder Wägung in Betracht ziehen, was der ersten Anordnung entspricht oder aber man kann die Wägung durch *Substitution* ausführen, wobei das Längenverhältnis der Arme überhaupt nicht in Frage kommt. Grundsätzlich hat das zweite Verfahren gewisse Vorzüge und da es auch in Summa das bequemere ist, so habe ich es ganz allgemein beibehalten.

46. Normalweiß. Die zunehmende Genauigkeit, welche durch die Verbesserung des Apparates und der Beobachtungsmethode erreicht wurde, macht sich besonders auffällig geltend in der experimentellen Entwicklung, welche das Problem des *Normalweiß* im Laufe der Untersuchungen erfuhr. Die ersten Beobachtungen hatten mir keine feststellbaren Unterschiede zwischen den verschiedenen weißen Pigmenten ergeben, die ich der Untersuchung unterwarf, mit Ausnahme des Umstandes, daß die Kreide niemals so rein und so frei von färbenden Bestandteilen, insbesondere Eisenoxyd und organischer Substanz vorkommt, um das reine Weiß des Kalziumkarbonats zu zeigen. Das theoretische Erfordernis einer eindeutigen Definition hatte mich veranlaßt, aus chemischen Gründen dem *Zinkweiß* die Rolle des Normalweiß zuzuschreiben, die sonst der Maler dem Bleiweiß einzuräumen geneigt wäre. Als dann das

Messungsverfahren genauer wurde, konnte ich Verschiedenheiten in der Remission der verschiedenen weißen Pigmente feststellen, und da hierbei zunächst wieder Zinkweiß sich als das weißeste von allen ergab, schien die ursprünglich getroffene Wahl vollends gerechtfertigt zu sein.

Auffallende spätere Anomalien, die mir bei der Herstellung der normalen Grauskala entgegentraten, veranlaßten mich, von neuem eine Vergleichung der verschiedenen weißen Pigmente vorzunehmen, wobei sich zunächst überraschender Weise herausstellte, daß ein zufällig mituntersuchtes Präparat von gefällttem *Strontiumkarbonat* die größte Remission aufwies, d. h. sich als weißestes von allen Pigmenten herausstellte. Die Untersuchung ergab nun weiter, daß wegen der besonders lockeren Beschaffenheit des Strontiumkarbonates die daraus hergestellte streichfertige Tünche dicker ausgefallen war als mit den andern weißen Pigmenten, so daß auch der Überzug auf dem weißen Zeichenpapier stärker werden mußte. Das weiße Zeichenpapier seinerseits remittierte etwa 12% Licht weniger, als das mit Strontiumkarbonat eingedeckte, und so entstand der Verdacht, daß ich bei den andern Pigmenten nicht ihre eigentliche Remission beobachtet hatte, sondern nur einen Teil derselben, kombiniert mit dem Durchscheinen des weniger weißen Untergrundes. Eine nach solcher Richtung durchgeführte Untersuchung ergab denn auch in der Tat, daß das Zinkweiß bei meinen bisherigen Versuchen seine hervorragende Stellung nur dem Umstande verdankte, daß es einen stärker deckenden Auftrag ergeben hatte, als die anderen weißen Pigmente, was gleichfalls eine Folge seiner besonders lockeren Beschaffenheit war. Denn *gefälltes Bariumsulfat*, das bisher 2 bis 3% dunkler erschien als Zinkweiß, überholte dieses bei wiederholtem Decken des Blattes und *erwies sich schließlich als das weißeste der mir erreichbaren Pigmente*.

Gleichzeitig mußte die Frage beantwortet werden, welchen Einfluß die auch bei sorgfältigem Auftrag nicht vollständig verschwindenden Pinselspuren auf die Remission haben. Betrachtet man nämlich eine derartige Oberfläche bei der schrägen Beleuchtung, wie sie im Farbmesser vorliegt, so ergeben sich, wenn die Pinselstriche rechtwinklig zur Beleuchtungsrichtung stehen, regelmäßige Abwechslungen von hellbeleuchteten und dunkleren, weil im Schatten liegenden feinen Streifen, die einige Zehntel Millimeter Abstand haben. Die Messung ergab, daß hierbei ein Mittel-

wert entsteht, welcher nicht wesentlich von der Helligkeit abweicht, die man bei völliger Ausglei chung der Oberfläche beobachtet. Da aber immerhin aus diesen Verhältnissen eine Fehlerquelle zu befürchten ist, so tut man gut ihre Möglichkeit ganz zu beseitigen. Dieses geschieht folgendermaßen. Durch eine Anzahl von wiederholten Aufstrichen, die jeweils nach dem Trocknen des vorigen mit dem weißen Pigment ausgeführt werden, sorgt man zunächst dafür, daß die Farbe der Unterlage vollständig gedeckt wird. Unter den von mir eingehaltenen Bedingungen geschah dieses reichlich mit drei Anstrichen. Man kann feststellen, ob das Ziel erreicht ist, wenn man das angestrichene Blatt über einem schwarzweißen Untergrund (große Druckbuchstaben auf recht weißem Papier) bei gutem Licht beobachtet. Solange der Untergrund noch durchscheint, sieht man eine entsprechende Abwechslung von helleren und dunkleren Stellen, welche vollständig verschwinden, soweit die Deckung erreicht ist. Auch trägt man Sorge dafür, jedesmal die letzten ausgleichenden Pinselstriche bei dem neuen Auftrag senkrecht zu den vorigen zu führen.

Ist die vollständige Deckung erreicht, so wird die Oberfläche *eben geschliffen*, indem man ein kleines Stückchen bestrichenen Papieres mit leichter Hand in kreisförmiger Bewegung über das Blatt führt, ähnlich wie man zwei Glasplatten gegeneinander mit Schmirgel matt schleift. Durch Beobachtung in streifend einfallendem Licht kann man leicht feststellen, daß auf solche Weise die Pinselspuren vollständig zum Verschwinden gebracht werden können und eine höchst gleichförmige samtartig aussehende Oberfläche entsteht, von der man etwa liegengebliebene Flocken des abgeschliffenen Staubes durch Blasen entfernt.

Dies ergibt den Zustand höchster Weiße, den ich erzielen konnte und auf diese Norm beziehen sich sämtliche später mitgeteilten Messungen.

Ich erwähne, daß das benutzte Bariumsulfat als Marke I in feuchter Form von KÖNIGSWARTER und EBELL, Linden bei Hannover bezogen war. Vergleichende Versuche mit Bariumsulfat, das ich selbst aus reinem Bariumchlorid mit Schwefelsäure gefällt hatte, überzeugten mich, daß es auf solche Weise möglich ist, übereinstimmende Präparate zu erhalten, denn die entsprechend hergestellten Blätter ließen keine Unterschiede erkennen, welche einige Zehntel Prozent überstiegen hätten. Ebenso erwiesen sich

die einzelnen Blätter, die nach diesem Verfahren zu verschiedenen Zeiten hergestellt wurden, untereinander übereinstimmend innerhalb derselben Grenze, wie das folgende Beispiel erkennen läßt

Blatt	Helligkeit	Blatt	Helligkeit
1	1,000	5	0,997
2	1,000	6	1,002
3	0,998	7	0,999
4	1,000		

47. Schnee als Normalweiß. Einige Worte seien noch über den Vorschlag gesagt, *frischgefallenen Schnee* als ideales Weiß anzunehmen. Wendet man die oben gegebenen Kriterien auf den Schnee als weißes Pigment an, so stellt sich heraus, daß die Wahl nicht eben günstig genannt werden kann. Einerseits ist die Korngröße des Schnees ziemlich erheblich, da er jedenfalls ein viel gröberes Pulver darstellt als irgendein als Pigment benutzter weißer Stoff. Ferner aber ist der Brechungskoeffizient des Schnees, d. h. der des Eises verhältnismäßig niedrig, da er noch kleiner als der des Wassers ist und rund 1,3 beträgt. Beide Ursachen wirken zusammen, um das einfallende Licht zu zwingen, verhältnismäßig lange Strecken innerhalb des Eises zurückzulegen, bevor es wieder an die Oberfläche gelangt. Bei dieser Gelegenheit kann sich denn auch die spezifische Absorption geltend machen, die sich vorwiegend auf die roten und rotgelben Teile des Spektrums bezieht und deren Erfolg in der Blaufärbung des Eises zu Tage tritt, die bei einigen Zentimetern Dicke schon sichtbar wird.

Der Versuch hat diese Erwägungen denn auch bestätigt. Unmittelbar nach einem Schneefall, als der Himmel noch allseitig mit weißen Wolken bedeckt war, habe ich Blätter mit Normalweiß und ferner solche mit den nächsten grauen Stufen, die alsbald beschrieben werden sollen, auf die Schneefläche gelegt und in vertikaler Richtung beobachtet. Das Resultat war, daß die Schneeschicht deutlich dunkler erschien als das Normalweiß und zwar schätze ich die Remission des frischgefallenen Schnees auf 0,90. Der Unterschied ist für das Auge angesichts der geringen Empfindlichkeit für schwarze Anteile in der Nähe der vollständigen Remission nicht eben auffallend, er tritt aber mit voller Deutlichkeit zu Tage, wenn man zum Vergleich andere Papiere mit geringerer Weiße neben das Normalweiß auf den Schnee legt.

Der Vorschlag ist also abzulehnen.

48. Andere weiße Pigmente. Gelegentlich der vorstehend beschriebenen Versuche sind eine Anzahl von weißen Pigmenten und ähnlichen Stoffen in bezug auf ihre Weiße untersucht worden. Und es hat einiges Interesse die dabei erhaltenen Resultate genauer zu betrachten. Die nachstehende Tabelle enthält die Mittelwerte der betreffenden Messungen, wobei, um das beständige Niederschreiben von Bruchzahlen zu vermeiden, die Weiße des Normalweiß des gefällten Bariumsulfats nicht = 1, sondern = 1000 gesetzt worden ist.

Bariumsulfat	1000	Bariumkarbonat	932
Strontiumkarbonat	980	Magnesia	909
Wismutsubnitrat	947	Lithopon	893
Zinkoxyd	945	Gips	904
Kalziumkarbonat gef.	942	Zeichenpapier	863
Bleiweiß	932	Kreide	835

Wie man sieht, handelt es sich bei allen diesen ohne weiteres als weiß beurteilten Stoffen um ziemlich bedeutende Unterschiede, da der wenigst weiße Stoff Kreide bereits 16,5% Schwarz neben 83,5% Weiß enthält. Nun muß allerdings betont werden, daß ein geringer Anteil Schwarz im Weiß aus Gründen, welche im FECHNERSCH-WEBERschen Gesetz liegen und alsbald eingehender erörtert werden sollen, unverhältnismäßig viel weniger in die Erscheinung tritt, als ein Anteil Weiß in Schwarz im umgekehrten Verhältnis. Es kommt dieses ja ohne weiteres darin zur Geltung, daß die genannten Stoffe ohne Einschränkung als Weiß gelten. Insbesondere wird Bleiweiß, welches fast 7% Schwarz gegenüber dem Bariumsulfat enthält, von den Malern und andern Fachleuten ohne weiteres als ein völlig weißer Stoff angesehen, wenn sie auch zuzugeben bereit sein werden, daß Zinkweiß in seinen besten Marken (die hier untersuchte war eine Probe der Marke „Grünsiegel“, welche als die weißeste gilt) dem Bleiweiß etwas überlegen ist. Da die Messungen etwa bis auf $\frac{1}{2}\%$ genau angestellt werden können, so sieht man, daß das beschriebene Photometer durchaus geeignet ist, um die kleinen, der gewöhnlichen Beurteilung schlecht zugänglichen Unterschiede in der Weiße verschiedener weißer Pigmente genau zu messen und die vielfach auf diesen Unterschieden beruhende Bewertung dadurch exakter zu fundieren, als es nach den gegenwärtigen Schätzverfahren möglich ist.

Im einzelnen stellt sich heraus, daß die Weiße keinen nachweisbaren Zusammenhang mit der chemischen Beschaffenheit, dem Brechungskoeffizienten und den andern Faktoren zu zeigen scheinen, welche vorstehend als entscheidend für das Zustandekommen einer vollständigen Remission des Lichtes gekennzeichnet worden sind. Nur der eine Punkt tritt deutlich zu Tage, daß eine sehr feine Zerteilung, wie sie beim gefällten Bariumsulfat und beim Zinkweiß vorliegt, in der Tat günstig auf die Vollständigkeit der Remission wirkt. Im übrigen ist aber der Brechungskoeffizient des Bariumsulfats viel kleiner als der des Bleiweißes, während ersteres doch erheblich weißer ist.

Die Ursache der Unterschiede muß daher überall in sekundären Umständen liegen. Daß das Strontiumkarbonat dem Normalweiß so nahe kommt, schreibe ich ausschließlich dem Umstande zu, daß es ein besonders reines Präparat ist, wobei der Begriff der Reinheit sich in diesem Falle auf die Abwesenheit absorbierender, d. h. farbiger Beimischungen bezieht. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Weiße der Kreide mit der des gefällten Kalziumkarbonates vergleicht, welche beide chemisch identisch sind, dennoch aber beinahe an den äußersten Enden der Reihe erscheinen. Die dunkle Färbung der Kreide rührt ausschließlich von ihren Beimischungen her, die man in ihrer bräunlich-grauen Färbung erkennen kann, wenn man einige Dekagramm des Stoffes in verdünnter Salzsäure auflöst und den unlöslichen Rückstand auf einem kleinen Filter sammelt. Das gefällte Kalziumkarbonat ist von diesen Verunreinigungen im wesentlichen frei und zeigt infolgedessen die sehr viel größere Weiße. Ähnliche Bemerkungen gelten für den Gips, den man durch sorgfältige Herstellung aus reinen Materialien zweifellos zu einem viel höheren Grade der Weiße bringen könnte, als das vorliegende Produkt aufweist, welches aus dem erhitzten natürlich vorkommenden Mineral erzeugt worden ist. Was das Wismutsubnitrat anlangt, so besitzt es eine hervorragende Weiße, die es noch etwas über das beste Zinkweiß stellt. Ich hatte eigentlich aber eine noch größere Annäherung an das Normalweiß erwartet. Denn dieser Stoff dient bekanntlich als Schminke und daß man ihn den wohlfeileren und auch ungiftigeren anderen weißen Pulvern gegenüber so bevorzugt, glaubte ich dem von dem hierfür interessierten Teil des weiblichen Geschlechtes zwar nicht quantitativ gemessenen, wohl aber mit instinktiver

Sicherheit herausgefundenen besonders hohen Grade seiner Weiße zuschreiben zu sollen. Vermutlich hat auch dieser Stoff zu der Zeit, in welcher er zuerst in Gebrauch genommen worden ist, d. h. vor einem oder einigen Jahrhunderten, sich unter den übrigen zur Verfügung stehenden weißen Substanzen viel mehr als jetzt durch die Reinheit seiner Weiße ausgezeichnet. Denn die Kunst der Darstellung chemisch reiner Produkte ist erst ziemlich jungen Datums, und die alte Herstellungsmethode des Subnitrats: Fällung mit Wasser unter Freiwerden von Salpetersäure ist geeignet, zufällige Verunreinigungen färbender Schwermetalle erfolgreich auszuschließen.

Der gleiche Umstand ist es, welcher dem Bariumsulfat seine bevorzugte Stelle an der Spitze aller weißen Substanzen sichert. Hierzu kommt noch die sehr feinpulvrige Beschaffenheit, welche eine Folge der äußeren geringen Löslichkeit und der gering entwickelten Neigung zur Bildung größerer Kristalle ist.

Daß diese Faktoren maßgebend für die Grade der entstehenden Weiße sind, geht ja auch aus der Stellung des Strontiumkarbonates hervor. Ich bin daher der Meinung, daß nicht nur jeder der hier erwähnten Stoffe, sondern auch jeder andere farblose Stoff mit nicht zu kleinem Brechungskoeffizienten ($> 1,5$), fähig ist, die Weiße des Normalstoffes Bariumsulfat zu erreichen und daß es sich nur um die technische Frage handelt, die einzelnen Produkte im Zustand solcher Reinheit und solcher Zerteilung zu gewinnen, welche eine praktisch vollständige Remission des auffallenden Lichtes sichern. Da ferner beim Bariumsulfat die hierzu erforderlichen Verhältnisse in nahezu idealer Vereinigung bereits vorhanden sind, so glaube ich auch zu der Annahme berechtigt zu sein, daß mit dieser Substanz der ideal weiße Stoff bereits so gut wie vollkommen, d. h. innerhalb eines Prozentes des remittierten Lichtes verwirklicht ist.

Es wird ein Gegenstand weiterer Untersuchungen sein müssen, deren Verfolgung ich nicht unternommen habe, weil sie mich von meinen zunächst gesetzten Zielen zu weit ablenken würde, experimentell an den hier genannten Stoffen, wie an anderen weißen Niederschlägen den Grad der Annäherung festzustellen, welcher sich unter Benutzung der gegenwärtigen chemischen Hilfsmittel bezüglich der Verwirklichung der vollständigen Remission erreichen läßt. Sollte wider Erwarten sich herausstellen, daß noch ein einigermaßen erheblicher

Schritt bis zu diesem Ziele zurückzulegen ist, so würde der Wert der auf Bariumsulfat als Einheit bezogenen Messungen dadurch nicht wesentlich geschmälert werden. Denn wie bereits bemerkt, fallen die unabhängig voneinander zu verschiedenen Zeiten hergestellten Proben dieses Stoffes und die damit erzeugten mattweißen Oberflächen in bezug auf ihre Remission so übereinstimmend aus, daß es hernach nur nötig sein würde, das Verhältnis zwischen der Remission des Bariumsulfates und dem des ideal weißen Stoffes ein für allemal festzustellen, um für die auf Bariumsulfat bezogenen Messungen die erforderliche Korrektur einzuführen. Es sei nochmals betont, daß das Bariumsulfat für den hier vorliegenden Zweck nicht etwa durch neutrale Sulfate, sondern durch freie Schwefelsäure aus Chlorbarium gefällt werden muß, da unter diesen Umständen eine Verunreinigung am sichersten ferngehalten wird. Daß das hierzu angewendete Chlorbarium insbesondere eisenfrei sein muß, sei zu allem Überfluß noch besonders bemerkt.

49. Das ideale Schwarz. Das vorstehend definierte und verwirklichte ideale Weiß mit der Albedo Eins hat sich theoretisch wie experimentell als ein mit hinreichender Annäherung realisierbares Ziel erwiesen. Insbesondere ergibt sich aus der Tatsache, daß selbst mehrere Prozent Schwarz in dem Ideal sich nähernden weißen Farben nur unter Anwendung besonderer Hilfsmittel erkannt und gemessen werden können, der Schluß, daß selbst wenn das als Norm angenommene Bariumsulfat noch um einige Prozente von dem Ideal entfernt wäre, dieses dem Auge dennoch nicht wesentlich verschieden von der zur Zeit erreichten Stufe erscheinen würde. Denn der übriggebliebene Unterschied würde nur beim messenden Vergleich unter besonders günstigen Umständen zur Geltung kommen.

Ganz anders liegen die Verhältnisse am *schwarzen* Ende. Wenn man mit Hilfe schwarzer Pigmente und verschiedenartiger Bindemittel schwarze Aufstriche herstellt, so sind diese nicht nur untereinander deutlich verschieden, sondern erweisen sich sämtlich für das Auge als weitgehend von dem idealen Schwarz entfernt. Ein solches läßt sich mit einer Annäherung, welcher nur durch das Eigenlicht im Auge ein Ziel gesetzt ist, verwirklichen, wenn man einen Hohlraum innen mit möglichst schwarzem Material auskleidet und in ihm eine verhältnismäßig kleine Öffnung anbringt. Das durch diese Öffnung eindringende Licht wird dann im Innern des

Raumes zum größten Teil schon beim ersten Auffallen absorbiert, während die wenigen zurückgeworfenen Reste bei neuem Auffallen auf den schwarzen Überzug bis auf unmerkliche Beträge verschluckt werden. Als derartiger möglichst stark absorbierter Überzug dient bester Seidensammet, welcher allen anderen Stoffen in dieser Beziehung weit überlegen ist. Tatsächlich reflektiert er nur 0,2 Prozent des auffallenden Lichtes. Der Versuch zeigt, daß ein solcher absolut schwarzer Hohlraum nicht besonders groß zu sein braucht. Ein würfelförmiger Kasten von 10 bis 20 cm Seite genügt, wenn die Öffnung nicht mehr als 5 cm nach ihrer größten Weite mißt. Richtet man sich dabei so ein, daß die Hauptmenge des einfallenden Lichtes nicht die Stelle im Innern des Kastens erleuchtet, welche man bei der Benutzung der Öffnung erblickt, so ist das absolute Schwarz im wesentlichen realisiert.

Hält man nun irgendwie hergestellte schwarze Aufstriche neben dieses absolute Schwarz, so überzeugt man sich alsbald, daß sie sämtlich sehr bedeutende Lichtmengen, *psychophysisch* beurteilt, reflektieren. Sie sehen mit anderen Worten im Vergleiche mit diesem Schwarz mehr oder weniger grau aus.

Die Messung mit Hilfe des Halbschattenphotometers belehrt uns nun, daß diese Flächen nur wenige Prozente weißes Licht remittieren. Mit den schwärzesten Pigmenten und wäßrigen Bindemitteln habe ich den Betrag von etwa 2% erreicht, den man mit bestem *Frankfurter Schwarz* und einem ähnlichen als *Pariser Schwarz* im Handel gehenden Pigment erzielt. Ein aus besonders hergestelltem Ruß bestehendes Pigment, welches *Diamantschwarz* genannt wird, geht über diesen Betrag einigermaßen hinaus, indem es nur 1,4% Licht remittiert. Die Überzüge mit diesem Material haben aber den Nachteil, daß sie äußerst leicht „Druckflecken“ bekommen. Der Kohlenstoff, aus dem sie bestehen, nimmt bereits bei sehr geringer mechanischer Beeinflussung Glanz an, d. h. erfährt eine Art Politur. Derartige Stellen remittieren das Licht dann nicht mehr in zerstreuter Weise, wie normale Aufträge, sondern spiegeln einigermaßen und erscheinen dadurch als helle Flecken auf dem dunklen Grunde.

Diese Gründe und die Rücksicht auf die praktischen Erfordernisse eines für die allgemeine Anwendung bestimmten Farbenatlas haben mich veranlaßt, als untere Grenze der Remission den Betrag von 2% anzunehmen, welchen man mit matten Aufträgen

zwar gut erreichen, aber nur in Ausnahmefällen einigermaßen überschreiten kann.

Die Notwendigkeit, hier einen endlichen willkürlichen Wert anzunehmen und nicht, wie beim Weißpunkt mit dem idealen Grenzwert selbst zu rechnen, liegt in dem Umstande, daß das Auge zwischen jener willkürlichen Grenze mit 2% und dem absoluten Schwarz noch eine sehr große Anzahl von Stufen würde unterscheiden können, wenn wir die technischen Hilfsmittel hätten, sie herzustellen. So kann man beispielsweise die Aufträge von Diamantschwarz mit 1,4% Remission auf den ersten Blick von denen des Pariser Schwarz mit 2,0% unterscheiden, obwohl die Differenz nur 0,6% Weiß beträgt, während umgekehrt ein Unterschied von 0,6% Schwarz am weißen Ende der Reihe mit der im Halbschattenphotometer ersichtbaren Genauigkeit annähernd zusammenfällt, also für das bloße Auge längst unerkennbar geworden ist.

50. Das Fechnersche Gesetz. Die Ursache dieses gegensätzlichen Verhaltens am weißen und schwarzen Ende der Helligkeitsstufenreihe liegt in dem von FECHNER aufgestellten Gesetz begründet, nach welchem die Empfindung des Helligkeitsunterschiedes nicht durch den absoluten Betrag dieses Unterschiedes, sondern durch dessen Verhältnis zu der fraglichen Helligkeit selbst bestimmt wird. Wenn also beispielsweise unter den Bedingungen der Beobachtung, wie sie im Halbschattenphotometer gegeben sind, ein Unterschied von 0,5% der Helligkeit noch eben mit Sicherheit erkannt werden kann, so besteht dieser relative Betrag des Unterschiedes unabhängig von der absoluten Helligkeit. Man wird mit andern Worten an einem hellen Tage dieselbe relative Genauigkeit der Einstellung erreichen, wie an einem dunkleren, obwohl die absolute Helligkeit in weiten Verhältnissen, wie 1 zu 1000 und mehr schwanken mag.

Es liegen eine große Anzahl von experimentellen Untersuchungen vor, die zu dem Zweck ausgeführt worden sind, festzustellen, mit welcher Genauigkeit dieses psychophysische Grundgesetz von FECHNER für die Beurteilung von Helligkeitsunterschieden zutrifft. Die Ergebnisse dieser Forschungen sind vielfach widersprechend, doch wird man wohl als allgemeines Resultat den Satz aufstellen können, daß das FECHNERSche Gesetz im Großen und Ganzen zutreffend ist. Die Empfindlichkeit für Helligkeitsunterschiede wird also maßgebend durch das Verhältnis zwischen den Absolutwerten des Ün-

terschiedes und der Helligkeit selbst oder durch den *relativen* Helligkeitsunterschied bestimmt.

Über diese fundamentale Beziehung lagert sich aber eine zweite Funktion, derzufolge die relative Unterschiedsempfindlichkeit nicht ganz unabhängig von der Helligkeit ist. Sie nimmt vielmehr von der unteren Grenze, bei welcher überhaupt eine Beurteilungsmöglichkeit beginnt und wo das Urteil natürlich am unsichersten ist, zuerst schnell und dann zunehmend langsamer zu, bis schließlich wieder bei sehr großer Helligkeit, welcher gegenüber das Auge seinen Dienst zu versagen beginnt, auch die Beurteilung von Helligkeitsunterschieden leidet und demgemäß die Unterschiedsempfindlichkeit kleiner wird. In dem für uns in Betracht kommenden Gebiet mittlerer Helligkeiten ist aber die Änderung der Unterschiedsempfindlichkeit verhältnismäßig klein, so daß man, solange es sich nicht um exakte quantitative Schlüsse aus den Werten der Unterschiedsempfindlichkeit selbst handelt, die Gültigkeit des FECHNERSchen Gesetzes für die Behandlung allgemeiner Verhältnisse annehmen darf.

Das Halbschattenphotometer gewährt unmittelbar die Möglichkeit, sich davon zu überzeugen, wie weit das FECHNERSche Gesetz für die in ihm verwirklichten Bedingungen zutreffend ist.

Man braucht für diesen Zweck nur beiderseits normales Weiß einzulegen und nachdem man auf der einen Seite den Spalt auf 1000 gestellt und auf der anderen durch angemessenes Verkleinern des Spaltes gleiche Helligkeit hergestellt hat, die erste Breite so weit zu verkleinern, daß ein deutlicher Helligkeitsunterschied sichtbar wird. Dann wird die zweite Seite auf 900 gestellt und wiederum die erste bis zum deutlicheren Dunklersein verengt. Indem man entsprechende Versuche mit den Spaltbreiten 800, 700 usw. bis 100 anstellt, kann man für dieses ganze Gebiet die relative Unterschiedsempfindlichkeit bestimmen. Das Resultat ist, daß in dem größeren Teil dieses Messungsbereiches die Unterschiedsempfindlichkeit praktisch konstant ist, d. h. unregelmäßig mit dem Betrag der Versuchsfehler um einen Mittelwert schwankt, daß aber bei den schwächeren Beleuchtungen etwa von 300 ab ein deutliches Größerwerden der relativen Unterschiedsschwelle, also ein geringer Wert der Empfindlichkeit erkennbar ist. Die nachstehende Tabelle gibt eine derartige Messungsreihe wieder.

Spaltbreite	Unterschied in Prozenten der Spaltbreite	Spaltbreite	Unterschied in Prozenten der Spaltbreite
1000	4,5	500	4,7
900	4,3	400	4,8
800	4,8	300	5,0
700	4,2	200	5,5
600	4,7	100	5,6

51. Das mittlere Grau. Dieses allgemeine Ergebnis, daß das FECHNERSche Gesetz in großen Zügen für die Beurteilung von Helligkeiten bezogener unbunter Farben maßgebend ist, tritt auch noch bei anderen Versuchen auf das deutlichste in die Erscheinung. Zuerst von PLATEAU sind Experimente in der Richtung angestellt worden, daß er verschiedene Maler veranlaßt hat, nach ihrer Schätzung ein mittleres Grau zwischen einem schwarzen und einem weißen Auftrag herzustellen. Man kann diese Versuche von der Geschicklichkeit in der technischen Handhabung der Pigmente unabhängig machen, wenn man zwischen Schwarz und Weiß eine größere Anzahl abgestufter grauer Aufstriche herstellt und die Versuchspersonen veranlaßt, denjenigen auszuwählen, der ihnen am genauesten zwischen Schwarz und Weiß zu passen scheint. Es stellt sich hierbei zunächst heraus (was PLATEAU nicht bemerkt zu haben scheint), daß von der Wahl des Schwarz das Urteil über den Mittelwert in entscheidendem Maße abhängig ist. Andererseits üben die für das bloße Auge kaum merklichen Unterschiede in der Remission der verschiedenen weißen Pigmente auch nur einen entsprechend geringen Einfluß auf die Beurteilung des mittleren Grau aus. Die Wahl dieses Mittelgrau erfolgt nun mit auffallender Sicherheit, zumal durch solche Personen, welche Erfahrung und Übung in der Beurteilung von Farben und Helligkeiten haben, und das Resultat fällt ganz unzweideutig im Sinne des FECHNERSchen Gesetzes aus. Wenn man als schwarzen Auftrag den mit 2% Remission wählt, so wird niemals das Grau mit 51% Remission als Mittelwert zwischen jenem und dem hundertprozentigen Weiß angesehen. Dieses wird vielmehr als viel zu hell beurteilt und es wird ein Grau gewählt, welches 14—16% Remission aufweist. Das geometrische Mittel zwischen 2 und 100 beträgt aber 14,1, so daß ganz offenbar für die empfindungsmäßige Einordnung der Helligkeit zwischen zwei gegebene Grenzen nicht das arithmetische,

sondern das geometrische Mittel maßgebend ist. Letzteres ist aber der vom FECHNERSchen Gesetz geforderte Wert.

52. Das logarithmische Photometer. Hieraus würde man folgern, daß man die Öffnungen des Halbschattenphotometers, statt sie wie beschrieben durch zwei parallele Ränder rechteckig zu begrenzen, vielmehr durch zwei Exponentialkurven begrenzen müßte, die in der Schlußstellung des beweglichen Backens asymptotisch zusammenlaufen. Die verstellbare Öffnung würde dadurch die Form eines Dreieckes erhalten, das eine gerade Seite hat, während die beiden anderen Seiten von Stücken der Exponentialkurve gebildet werden. Eine solche Spaltöffnung würde die Eigenschaft haben, daß die relative Genauigkeit der Einstellung überall dieselbe wäre, während sie bei der gegenwärtigen Ausführung der Spaltöffnung proportional ist. Ich habe diese Einrichtung an meinem Apparat nicht anbringen lassen, weil durch die mechanische Herstellung der Exponentialkurven, die nie vollkommen fehlerfrei sein können, ein schwer zu kontrollierender Fehler in die Messungen hineingebracht werden würde. Zudem würde eine derartige Form der Spaltöffnung die Gesamthelligkeit des Apparates auf etwas weniger als die Hälfte heruntersetzen, was ebenfalls ein besser zu vermeidender Nachteil wäre.

Handelt es sich um die Messung sehr geringer Helligkeiten und wünscht man den Einstellungsfehler bei schmalem Spalt zu vermindern, so gibt es ein anderes einfaches Mittel dazu. Man braucht nur vor dem Spalt eine Blende in Gestalt zweier horizontaler Backen anzubringen, durch welche die Lichtmenge, die bei gegebener Einstellung in den Apparat fällt, nach einem bestimmten Verhältnis (5 : 1 oder 10 : 1) vermindert wird. Die Horizontalblende hat mit anderen Worten eine Breite von 10 oder 5 mm für den Lichteintritt freizulassen. Dadurch muß für dieselbe Beleuchtung die Spaltöffnung auf das Fünf- oder Zehnfache vergrößert werden, wodurch sachgemäß der Einstellungs- und Ablesungsfehler auf den fünften oder zehnten Teil herabgeht.

53. Die Grauleiter. Da es für viele Zwecke wünschenswert oder notwendig ist, Oberflächen von genau bekannter Remission zu besitzen, so habe ich eine erhebliche Menge Arbeit darauf gewendet, solche in reproduzierbarer Weise herzustellen. Die erste Aufgabe bestand darin, die Stufenfolge der Helligkeiten festzusetzen, nach welchen die Einteilung des ganzen Gebietes erfolgen sollte.

Gemäß dem, was über die sehr annähernde Geltung des FECHNERschen Gesetzes mitgeteilt worden ist, kam nur eine Ordnung in geometrischer Reihe in Frage, derzufolge die Abstände der einzelnen Stufen unmittelbar als gleich oder doch nahezu gleich empfunden werden konnten. Eine solche Reihe gestattet bei ihrer Benutzung auch eine schätzungsweise Interpolation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Werten, was bei einer arithmetischen Reihe von Helligkeiten, die für die Empfindung außerordentlich verschiedene Abstände aufweist, nicht so leicht ausführbar ist.

Nun wäre eine geometrische Reihe im Sinne des FECHNERschen Gesetzes zwischen idealem Weiß und idealem Schwarz unendlich lang. Denn, wenn b ein echter Bruch ist, welcher das Verhältnis der Helligkeit zwischen dem ersten und zweiten Gliede angibt, so ist b^n die Helligkeit n -ten Gliedes und dieser Wert wird niemals gleich Null, wie groß man n auch wählen mag. Es ist deshalb notwendig, an die Stelle des idealen Schwarz mit der Helligkeit Null irgend ein konkretes Schwarz von endlicher Helligkeit zu setzen und es ist bereits mitgeteilt worden, daß das praktische Ende von matten Pigmentaufträgen bei der Helligkeit 0,02 liegt, über welchen Wert man nur in Ausnahmefällen fortschreiten kann. Ich habe deshalb zunächst diesen Wert als willkürlich festzulegenden Festpunkt für das schwarze Ende der Helligkeitsstufenreihe gewählt, möchte aber gleich bemerken, daß es sich hier nur um eine praktische Wahl handelt und daß die Erwägung aller für eine rationelle oder absolute Einteilung in Betracht kommenden Faktoren zu einer etwas anderen Entscheidung führt. Da aber zunächst alle Arbeiten unter jenem Gesichtspunkt durchgeführt worden sind, so sollen sie in dieser Gestalt beschrieben werden. Die theoretischen Erwägungen, welche zu einer etwas abweichenden Entscheidung führen und eine entsprechend abgeänderte Ausführung bedingen würden, werden am Schluß dieser Mitteilungen besonders dargelegt.

Ähnlich wie bei einem Thermometer ist es für die Grauleiter notwendig, außer dem zweiten Festpunkte auch noch die *Anzahl* der Stufen willkürlich festzustellen, welche man zwischen beiden Festpunkten anbringen will. Ich habe diese Anzahl für die erste Ausführung willkürlich auf 24 festgelegt. Die Ursache war in erster Linie der Wunsch, die Buchstaben des Alphabetes zur Kennzeichnung dieser Stufen zu benutzen, da die Anzahl Zehn der

Einzelziffern nicht ausreichend erschien, denn vorläufige Versuche hatten mich alsbald überzeugt, daß zehn Stufen eine zu geringe Zahl auch für die Erfordernisse der täglichen Praxis sind. So wurde die Differenz der Logarithmen von 1000 und von 20 in 24 Teile geteilt und aus diesen eine arithmetische Reihe gebildet, welche beim Zurückgehen auf die Numeri die zugehörige geometrische Reihe von 24 Stufen ergab, deren Glieder mit Zurechnung der nullten oder Anfangsstufe den 25 Buchstaben des Alphabetes zugeordnet wurden. Die nachstehende Tabelle ergibt (vollständige Remission wie immer = 1000 gesetzt) die Zahlenwerte für die Helligkeiten der FECHNERSchen Stufenfolge neben den zugeordneten Buchstaben.

Die Grauleiter.

A	1000	F	443	L	196	Q	86,7	V	38,4
B	850	G	376	M	166	R	73,6	W	32,6
C	722	H	320	N	141	S	62,6	X	27,7
D	613	I	271	O	120	T	53,2	Y	23,5
E	521	K	231	P	102	U	45,2	Z	20,0

54. Das neutrale Grau. Die Aufgabe, jene rechnerisch festgestellten Stufen durch verschieden dunkle graue Pigmente herzustellen, sieht auf den ersten Blick überaus einfach aus. Man braucht ja eben nur schwarze und weiße Farbstoffe in den erforderlichen Verhältnissen zu mischen, und damit wäre die Sache erledigt. Verfährt man in dieser Weise, so überzeugt man sich alsbald, daß, was den Malern längst geläufig ist, die entstehenden grauen Farben durchaus nicht gleichartig und unabhängig von der Natur der verwendeten Farbstoffe sind. Ein mit Zinkweiß und Rebschwarz hergestelltes Grau sieht ganz anders, nämlich sehr viel mehr ins Blaue fallend aus, als etwa ein Grau aus Kreide und Schieferschwarz. Und selbst wenn man den einen Bestandteil, das schwarze oder das weiße Pigment unverändert läßt und nur den anderen wechselt, beobachtet man ähnliche Unterschiede, wenn auch in nicht ganz so weitem Umfange. Im allgemeinen erscheinen derartig gemischte graue Pigmente entschieden zu bläulich.

Man gibt sich von diesen Verhältnissen leicht wissenschaftliche Rechenschaft auf Grund des Umstandes, daß trübe Mittel, also hier der weiße Farbstoff gegen einen dunklen Grund, das schwarze Pigment, blau erscheinen. Es ist dies eine ganz allge-

meine Tatsache, welche bekanntlich von GOETHE irrtümlicherweise als Urphänomen der gesamten Farbenlehre angesehen worden ist. Kommt ihr auch nicht jene theoretische Stellung zu, so ist doch ihre praktische Bedeutung nicht gering, da der Maler bei der Herstellung seiner Zwischentöne aus den reinen Farben beständig auf diese Erscheinung stößt und sie kennen und berücksichtigen muß, wenn er die gewünschten Resultate ohne umständliches Probieren und Suchen erreichen will.

Wenn man dergestalt nun die Überzeugung gewinnt, daß die gemischten Graue alle mehr oder weniger ins Bläuliche verfärbt sind, und auch in der Zumischung eines geeigneten gelben oder rotgelben Farbstoffes das Mittel kennt, um den bläulichen Ton fortzunehmen und in einen neutralen umzuwandeln, so ist damit doch noch nicht ein Verfahren gegeben, um zu einem wohldefinierten Neutralgrau zu gelangen. Denn man weiß nicht, wie weit man den bläulichen Ton fortzunehmen oder zu brechen hat, um ein Grau zu erhalten, welches weder bräunlich noch bläulich ist. Durch das regelmäßige Bläulichwerden der Graumischungen sind wir von vornherein in solchem Sinne beeinflusst, daß uns ein bläuliches Grau eher normal erscheint, als ein wirklich neutrales. Wir müssen uns deshalb nach Mitteln umsehen, um ohne willkürliche Schätzung und ohne den durch das Urphänomen bedingten Fehler zu einem neutralen Grau zu gelangen.

Hierzu gibt es zwei Wege. Man kann entweder ein reines Weiß *beschatten*, so daß es geringere Lichtmengen als die Umgebung erhält und zurückwirft und darf dann annehmen, daß die so entstehenden grauen Töne, wenn man die Mitwirkung irgendwelchen farbigen Lichtes ausschließt, ein wirkliches neutrales Grau darstellen. Daneben gibt es noch ein zweites Mittel, nämlich die optische Mischung von Schwarz und Weiß mit Hilfe der Drehscheibe, oder eines der anderen Verfahren zu additiver Mischung, wobei gleichfalls das „Urphänomen“ ausgeschlossen ist.

Führt man die entsprechenden Versuche aus, so überzeugt man sich zunächst, daß das neutrale Grau tatsächlich viel bräunlicher aussieht, als man es von vornherein zu schätzen geneigt wäre. Eine Farbe, die man gewöhnlich *Mausgrau* nennt, bezeichnet am ehesten das, was die Beobachtung ergibt.

Achtet man bei diesen Versuchen darauf, daß keinerlei fremdartige Farbe das Aussehen des entstehenden Grau stört, so kann

man sich überzeugen, daß alle diese verschiedenen Hilfsmittel zu dem gleichen Farbton führen. Zu dessen technischer Herstellung muß man außer einem schwarzen und weißen Pigment noch ein rötlich gelbes verwenden. Es hat sich herausgestellt, daß man in den meisten Fällen in dem ungebrannten reichgefärbten Ocker, der unter dem Namen *Goldocker* im Handel ist, den richtigen Farbton hat, um die bläuliche Färbung der grauen Gemische auf Neutralgrau umzustimmen. Die Menge dieses Zusatzes ist sowohl von der Natur des schwarzen, wie des weißen Pigments abhängig und muß natürlich um so größer bemessen werden, je stärker die Verfärbung nach Blau ist.

Aus der Theorie dieser Erscheinung ergibt sich, daß ein weißes Pigment um so stärker das Urphänomen zeigen wird, je feiner es zerteilt ist. Demgemäß ist auch die Blaufärbung beim Zinkweiß, welches unter den gebräuchlichen weißen Pigmenten das feinste Korn hat, bei weitem am stärksten, während es bei grobkörnigeren Pigmenten entsprechend abnimmt. Ein zweiter Faktor ist das Brechungsvermögen, indem Stoffe mit kleinerem Brechungskoeffizienten stärker das Urphänomen zeigen.

Ferner ist auch die Natur des schwarzen Pigments von Einfluß. Zwar nicht aus ähnlichen optischen Gründen, wie sie eben für das weiße auseinandergesetzt wurden, wohl aber durch den Umstand, daß viele schwarze Pigmente mehr oder weniger braunen Farbstoff beigemischt enthalten. Denn sie bestehen stets aus Kohle und je nachdem die organische Substanz, aus welcher diese entstanden ist, mehr oder weniger vollständig zersetzt ist, bleibt ein unter Umständen noch sehr merklicher Rest von braunen hochkondensierten Produkten übrig, welche zwischen dem ursprünglichen Material und der reinen Kohle stehen.

Man wird also in jedem besonderen Fall das Mengenverhältnis der Bestandteile festzustellen haben, welches zu einem neutralen Grau führt. Ob man den Farbton richtig getroffen hat, kann man durch jedes der eben geschilderten Hilfsmittel kontrollieren. Am bequemsten ist es, ein derartiges Grau im Halbschattenphotometer zu beobachten und festzustellen, wie genau sein Farbton mit dem eines gleich hellen Grau übereinkommt, das man durch die Beschattung das Normalweiß hergestellt hat.

55. Ausgangsmaterial. Die ersten Arbeiten zur Verwirklichung der logarithmischen Helligkeitsstufenleiter führte ich im

Anschluß an das Material, welches zu der Farbtonkarte von BAUMANN-PRASE benutzt worden ist, mit *Kreide* als weißem Pigment aus. Da sich alsbald herausstellte, daß das erzielte Grau von mehreren Faktoren abhängig ist, insbesondere von der Innigkeit der Verreibung des schwarzen und weißen Pigments, sowie von der Natur und der Menge des Bindemittels, war es erforderlich, eine entsprechende Reihe von Voruntersuchungen auszuführen, durch welche die genannten Einflüsse quantitativ festgestellt und entsprechend den gefundenen Gesetzmäßigkeiten so zweckmäßig wie möglich gestaltet werden konnten.

Die erste Schwierigkeit, die hier zu überwinden war, bestand darin, daß die meisten schwarzen Pigmente, wenn man sie mit Kreide gemischt und durch ein passendes Bindemittel in eine Tünche verwandelt hat, sich nicht gleichförmig auftragen lassen. Durch kapillare Wirkung sondert sich das weiße Grundmaterial von dem schwarzen Zusatz ab. Auch bei großer Sorgfalt ist es in vielen Fällen nicht möglich, einen vollkommen gleichförmigen Auftrag zu erzielen und die Entstehung von Pinselstreifen infolge Störung der kapillaren Ordnung vollständig zu verhindern. Schließlich ergab sich, daß von allen schwarzen Pigmenten am wenigsten mit diesem Fehler das *Schieferschwarz* behaftet ist. Schieferschwarz ist feingemahlener kohlehaltiger Schiefer, der zu einem sehr geringen Preise in den Handel kommt und seine Fähigkeit mit Kreide ein nicht streifig auftrocknendes Gemisch zu bilden, wohl in erster Linie der geringen Feinheit seiner Körnung verdankt. Es hat außerdem noch für unseren besonderen Zweck den Vorzug, daß die Graumischungen, welche es liefert, weniger als die meisten anderen Pigmente zum Blauwerden neigen, so daß ein geringerer Zusatz von Goldocker erforderlich ist, um den neutralen Ton zu erhalten. Der letzte Umstand ist dann auch maßgebend gewesen, daß ich dieses Pigment beibehalten habe, nachdem ich die Kreide durch Litopon ersetzt hatte.

56. Das Bindemittel. Gemäß PRASE-BAUMANN'S Empfehlung benutzte ich gleichfalls als Bindemittel für die Kreidemischfarben *Sichelleim*, von dem mir die Firma F. SICHEL in Limmer bei Hannover genügende Quantitäten zur Verfügung stellte, wofür ihr auch an dieser Stelle der schuldige Dank ausgesprochen werden soll. Es ist dies eine Art von aufgeschlossenem Kleister, der hauptsächlich Stärke enthält und in Gestalt einer weißen, ganz schwach gelblich gefärbten

ziemlich dicken Masse in den Handel gelangt. Durcharbeiten mit Wasser, das man zuerst in kleinen Mengen zusetzt, gestattet die Masse gleichförmig zu verdünnen, und einige Handversuche hatten mir ergeben, daß, wenn man die trockenen Farben mit einer Leimlösung im Verhältnis von einem Teil Leim zu drei Teilen Wasser anreibt, und zwar gleiche Gewichtsmengen Farbstoff und Leimlösung, man eine Masse erhält, die sich gut auftragen und gleichförmig verteilen läßt und auch eine genügende mechanische Festigkeit besitzt, um beim Reiben nichts abzugeben. Demgemäß wurden anfangs die Versuche nach diesem Rezept durchgeführt.

Gelegentlich auffallende Unregelmäßigkeiten haben mich dann aber aufmerksam gemacht, daß die gewählten Verhältnisse sehr empfindlich gegen geringe Abweichungen sind, so daß ein und dasselbe fertig gemischte Farbpulver bei etwas verschiedener Behandlung Aufträge ergab, deren Helligkeitsunterschiede weit über die Versuchsfehler hinausgingen. Es war deshalb angezeigt, über den Einfluß der Bindemittelmenge auf die Farbhelligkeit eine eingehendere Untersuchung anzustellen, welche, wie vorauszusehen war, ergab: je verdünnter das Bindemittel ist und je geringere Mengen davon im Verhältnis zum trockenen Farbstoff angewendet werden, um so heller erweist sich der getrocknete Auftrag. Indessen wird dieser Einfluß bei zunehmender Konzentration des Leims schnell geringer und von einem gewissen Gehalt ab verschwindet er ins Unmerkliche. Der Zufall hatte es nun gewollt, daß die von mir gewählte Konzentration gerade an der Grenze des empfindlichen Gebietes liegt, so daß zufällige kleine Wassermengen, die durch die Benutzung eines feuchten Pinsels oder nicht vollkommen getrockneter Gefäße in die Farben hineinkamen, jene Abweichungen bewirkt hatten.

Um einen Überblick über die hier vorhandenen Verhältnisse zu geben, seien nachstehende Tabellen mitgeteilt. Es wurde zu allen Versuchen ein Gemisch aus 90 Teilen Kreide und 10 Teilen „Neutralschwarz“ (bestehend aus 9 Teilen Schieferschwarz und 1 Teil Goldocker) angewendet, welches eine Stunde in der Kugelmühle naß gemahlen war. Dadurch wird ein konstantes Produkt erhalten, welches auch durch längeres Mahlen, bis fünf Stunden, seine Helligkeit nicht ändert. Die gemahlene Masse war an der Luft getrocknet und gepulvert worden, und es wurden für jeden Versuch gleiche Mengen abgewogen.

Verdünnung		Helligkeit
1 Teil Leim	auf 6,25 verdünnt	337
„ „	„ „ 5,00 „	322
„ „	„ „ 4,00 „	312
„ „	„ „ 3,50 „	300
„ „	„ „ 3,00 „	300

Wie man sieht, wird bei der Verdünnung 1 auf 3,50 ein Punkt erreicht, der bei weiterer Konzentration, 1 auf 3, nicht überschritten wird. Man würde also bereits seinen Zweck erreichen, wenn man den Leim im Verhältnis 1 auf 3,5 verwenden würde. Um aber die entstehenden Gemische ganz unempfindlich gegen zufällige kleine Wassermengen zu machen, tut man besser, den Punkt zu überschreiten. Und ich habe demgemäß allgemein die konzentriertere Lösung 1 Leim + 2 Wasser angewendet.

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn man auf die gleiche Menge des trockenen Farbstoffes zunehmende Mengen verdünnten Leim anwendet. Während der auf 4 Teile verdünnte Leim, wie die nachstehende Tabelle zeigt, ein kräftiges Dunkeln der Farbe bei zunehmender Leimmenge aufweist, hört diese Erscheinung gleichfalls auf, wenn man den Leim auf 3,5 verdünnt und ist natürlich ebensowenig bei dem stärkeren Leim 1 auf 3 vorhanden.

Leim 1 auf 4 verdünnt		Helligkeit
1 Teil Farbstoff	auf 1 Teil Leim	312
„ „	„ „ 1,25 „	309
„ „	„ „ 1,50 „	303
Leim 1 auf 3,5 verdünnt		
1 Teil Farbstoff	auf 1 Teil Leim	300
„ „	„ „ 1,5 „	298
Leim auf 3,0 verdünnt		
1 Teil Farbstoff	auf 1 Teil Leim	300
„ „	„ „ 1,25 „	300
„ „	„ „ 1,50 „	299

Während in der ersten Reihe noch ein deutlicher Einfluß der Leimmenge erkennbar ist, verschwindet dieser in der zweiten und dritten innerhalb der Versuchsfehler.

Man braucht somit bei dem stärkeren Leim 1 + 2,5 oder weniger Wasser weder in bezug auf zufällige Wasserzusätze, noch in bezug auf die Einhaltung des genauen Verhältnisses zwischen Farbstoff

und Leim ängstlich zu sein, da diese Mischung weitgehend unempfindlich gegen derartige Variationen ist. In den meisten Fällen, insbesondere jedesmal, wo die Kreide mindestens die Hälfte des Farbpulvers beträgt, wird man gleiche Gewichtsmengen Farbstoff und Bindemittel (genauer gesagt auf jedes Gramm Farbstoff ein Kubikzentimeter Leim) anwenden und nur in solchen Fällen, wo der Farbstoff sehr voluminös ist und das Gemisch demgemäß sich nicht bequem aufstreichen läßt, etwas größere Leimmengen nehmen. Für meine Hand ergibt das Verhältnis 1 : 1 nach gutem Verreiben eine besonders angenehm aufzutragende Mischung.

57. Träger und Auftrag. Als Grundlage für die Aufstriche habe ich ein gut geleimtes Druckpapier mit ziemlich rauher Oberfläche am zweckmäßigsten gefunden. Die rauhe Oberfläche erleichtert sehr einen gleichförmigen Auftrag, und die etwas schnellere Wasseraufnahme durch das Druckpapier gegenüber dem Zeichenpapier wird ebenfalls die Herstellung einer genügend deckenden Schicht erleichtern. Von Zeichenpapier lassen sich diejenigen Arten gut verwenden, welche nicht ein Korn ähnlich der Narbe des Leders haben, sondern eine mehr gleichartige tuchförmige Oberfläche. Denn das „Korn“ gibt bei der photometrischen Messung leicht zu störenden Nebenerscheinungen Anlaß. Auch habe ich vielfach ein Zeichenpapier mit Pyramidenkorn Nr. III benutzt, welches gleichfalls leicht einen gleichförmigen Auftrag ermöglicht.

Das Aufstreichen der geriebenen Tünche erfolgt mit flachen Dachshaarpinseln, welche je nach der Größe der zu deckenden Fläche breiter oder schmaler zu wählen sind. Man legt das Papier auf eine Lage von feuchtem Zeitungspapier, deckt zunächst die Fläche nicht allzu reichlich ein und ebnet dann den Auftrag dadurch, daß man den Pinsel leicht darüber führt und einen Strich etwas übergreifend regelmäßig neben den anderen setzt. Hat man den Auftrag derart der Länge nach behandelt, so macht man es der Quere nach. Wenn nach zwei- oder dreimaliger Wiederholung dieser Behandlung der Auftrag schließlich gleichförmig geworden ist und die Streifen verloren hat, so wird das feuchte Blatt mit einer Stecknadel an einer Ecke frei aufgehängt und so getrocknet. Dies ist das einfachste und sicherste Mittel, um ohne das umständliche Aufspannen des Papiers die Bildung von Falten und Unebenheiten zu vermeiden. Gewöhnlich rollt sich das Papier beim Trocknen nach innen ein wenig zusammen, es bildet dabei aber eine „auf-

wickelbare“ Fläche und wenn man es hernach unter leichtem Druck aufbewahrt, so hat man nach kurzer Zeit vollkommen ebene Blätter, die sich für ihre weitere Verwendung gut eignen. Der Auftrag der Farbe erfolgt mithin ungefähr so, wie er für den photographischen Gummidruck vorgeschrieben ist. Diejenigen, welche diese Technik beherrschen, werden gar keine Schwierigkeit finden. Nur muß die Farbe sehr viel fetter gehandhabt werden, da sie den Untergrund vollkommen *decken* muß. Denn eine optische Mitwirkung des Untergrundes würde ja die Definition der Farbe und Helligkeit des Auftrages beeinflussen und muß daher unbedingt vermieden werden.

Zu bemerken ist, daß die nasse Farbe durchsichtiger als die trockene ist, so daß die Deckung erst nach dem Trocknen beurteilt werden kann. Dadurch, daß das anfänglich vorhandene Wasser zwischen den Pigmentteilchen verdunstet und durch die Luft ersetzt wird, nimmt aus wohlbekanntem optischen Ursachen die Deckfähigkeit sehr stark zu. Indem man etwa bedrucktes Papier anstreicht und nach dem Trocknen sich überzeugt, ob die schwarzen Buchstaben noch durchscheinen, gewinnt man bald eine genügende Anschauung über die Dicke der zum Decken im trockenen Zustande erforderlichen Schicht.

Man hat hier seinen Weg zwischen zwei Klippen hindurch zu finden. Wird der Auftrag gar zu naß und reichlich ausgeführt, so ist es nicht möglich, ihn so weit auszugleichen, daß seine Oberfläche sich hernach frei von Unebenheiten entsprechend den Spuren des Pinsels erweist. Je magerer der Auftrag ist, um so leichter kann er durch die vorher erwähnte kreuzweise Behandlung mit dem Pinsel gleichförmig und streifenfrei gemacht werden, um so näher tritt allerdings auch die Gefahr der ungenügenden Deckung.

Die Oberfläche der Leimfarbe ist hiernach zwar gegen mechanische Beanspruchung ziemlich widerstandsfähig, zeigt aber eine große Empfindlichkeit gegen Öl und Fett. Diese ziehen sich in die Poren der Farbe hinein und bilden zwischen den Farbkörnchen optische Brücken, welche die Masse durchsichtiger machen und demgemäß durch verstärkte Absorption des auffallenden Lichtes dunkle Flecke bewirken. Man muß deshalb die derartig hergestellten Farbeoberflächen mit entsprechender Vorsicht behandeln und insbesondere nicht mit schweißigen oder fettigen Fingern berühren. Wo solche Ölflecken entstanden sind und die Umstände es etwa

nicht gestatten, das Blatt zu verwerfen und ein neues herzustellen, können sie durch die wohlbekanntesten Lösungsmittel gereinigt werden. Am geeignetsten hierfür ist *Toluol*, welches so gut wie alle in Betracht kommenden Fette und harzartigen Stoffe löst. Man wendet das Lösungsmittel am besten nicht lokal unter Reiben an, sondern badet das ganze Objekt in der Flüssigkeit, welche man hernach in derselben Weise, wie es beim Trocknen der Anstriche geschildert worden war, aus den aufgehängten Blättern verdunsten läßt.

58. Einfluß des Reibens. Bereits die elementarsten Versuche belehren darüber, daß die Helligkeit einer Mischung aus gegebenen Mengen Kreide und Schieferschwarz von der Dauer und Stärke des Reibens abhängt, welches man zum Zweck der Vermischung an dem Gemenge betätigt. Und zwar wird durch stärkeres oder längeres Reiben das Gemisch zunächst schneller, später langsamer dunkel. Eine längere auf diesen Punkt gerichtete Versuchsreihe endete in folgendem Verfahren, welches ein völlig konstantes Produkt ergab. Das nach bestimmten Verhältnissen abgewogene Gemisch von Kreide, Schieferschwarz und Goldocker wurde mit etwa dem doppelten Betrag Wasser in eine porzellanene Kugelmühle getan, die durch einen Petroleummotor in mäßige Drehung, ein bis zwei Umläufe in der Sekunde, versetzt wurde. Eine eigens dahin gerichtete Versuchsreihe überzeugte mich, daß nach einstündigem Mahlen des leichtflüssigen Breies ein Endzustand erreicht wird, der sich weiterhin in vier Stunden weiteren Mahlens nicht meßbar verändert. So wurden denn alle für diesen Zweck bestimmten Gemische in dieser Weise feingemahlen. Der fertige Brei wurde dann auf ein Filter gegeben, mit weiteren Wassermengen die in der Mühle verbliebenen Reste dazu gespült, worauf nach dem Abtropfen der Rückstand an der Luft zur Trocknung gebracht wurde. Gewöhnlich sondert sich hierbei an der Oberfläche der Masse ein Teil des schwarzen Pigments ab. Es ist daher nötig, das trockne Produkt noch einmal in einer großen Reibschale gleichförmig zu reiben, wozu aber eine ganz kurze Behandlung genügt.

Bei der zukünftigen genaueren Untersuchung der Verdünnungskurven wird daher auf den Einfluß Rücksicht zu nehmen sein, den das Verreiben der Farbbestandteile miteinander auf die Helligkeit ausübt. Es ist bereits bemerkt worden, daß bei der Zusammenstellung Schieferschwarz-Schlemmkreide die Verhältnisse besonders

günstig liegen, da die Lichtstärke unverändert bleibt, ob man mit dem nassen Brei das Reiben eine Stunde oder fünf Stunden in der Kugelmühle vornimmt, welches die wirksamste Form des Verreibens darstellt, die ich mit meinen Mitteln habe erzielen können. Andere Verhältnisse zeigen sich aber so wie man mit dem Material wechselt. Beispielsweise ergab eine Mischung von Zinkweiß mit zehn Prozent Schieferschwarz folgende Helligkeiten:

	Helligkeit
Nur mit dem Pinsel vermischt	496
mit dem Pistill verrieben bis zur Gleichförmigkeit	440
stärker gerieben	406
weiter gerieben	404
wiederum gerieben	398
weiter gerieben	400
sehr energisch gerieben	388

Mit dem letzten Versuch war die in Arbeit genommene Farbstoffmenge verbraucht. Man erkennt, daß zunächst das Reiben eine sehr schnelle Verminderung der Helligkeit bewirkt und diese dann längere Zeit konstant bleibt. Der Zustand bleibt aber nicht auf die Dauer bestehen, sondern nach besonders kräftigem Verreiben macht sich von neuem eine Verdunkelung geltend, in bezug auf welche natürlich auch kein Zweifel besteht, daß sie schließlich bei der Fortsetzung des Reibens eine Grenze finden wird. Es ist keineswegs ausgeschlossen, daß, nachdem die Gesetze der Helligkeitsbeeinflussung durch das Reiben erkannt und in jedem einzelnen Falle wohl definierte und endgültige Verhältnisse hergestellt sind, auch die Beziehungen zwischen Konzentration und Helligkeit sich einfacher gestalten mögen, als es bei dem bisher noch nicht allseitig durchgearbeiteten Material der Fall ist.

Ferner ist zu berücksichtigen, daß mehrfach statt des reinen Schwarz Gemische desselben mit Ocker benutzt worden waren, da es sich in erster Linie um die Herstellung von neutralen Graugemischen gehandelt hatte. Nun haben die Versuche mit anderen Farben, die mit Grau aufgemischt wurden, eindeutig ergeben, daß ternäre Gemische sich nicht einfach als die Summen der Komponenten auffassen lassen, sondern ihren eigenen Gesetzen folgen.

Um für den Einfluß des Reibens auf die Helligkeit einen Grenzfall zu haben, wählte ich *geglühten Kienruß* als schwarze Komponente. Wir haben es hier mit einem äußerst feinen Pulver

zu tun, das durch die mechanischen Mittel, die hier in Anwendung kommen, nicht weiter verkleinert werden kann. Es ist also zu erwarten, daß die Ausgiebigkeit dieses Farbstoffes durch Reiben überhaupt nicht verändert wird. Da wegen der sehr großen Ausgiebigkeit ein starkes Mißverhältnis zwischen den Gewichtsmengen des schwarzen und weißen Anteils bestehen muß, so verrieb ich einen Teil Ruß mit neun Teilen des weißen Farbstoffes, zunächst Kreide, und stellte von diesem zehnpromzentigen Gemisch aus die anderen Verhältnisse durch Abwägen her. Bereits zwei Prozent Ruß färben die Kreide so schwarz, daß weniger als $\frac{1}{5}$ des Lichtes zurückgeworfen wird. Da die Einstellung an diesem Punkte recht empfindlich ist, so benutzte ich für die Vergleichsversuche das zweiprozentige Gemisch. Es wurden 5 g davon mit der gleichen Leimmenge in der Reibschale zunächst sorgfältig, aber ohne viel Druck drei Minuten lang abgerieben und davon ein Aufstrich gemacht. Der Rest wurde wieder drei Minuten unter kräftigem Aufdrücken verrieben, wieder ein Aufstrich gemacht, mit dem Rest so fortgefahren, indem jeweils drei Minuten lang gerieben wurde, bis der Vorrat verbraucht war. Es wurden auf solche Weise acht Aufstriche hergestellt, von denen der letzte somit 24 Minuten lang gerieben worden war, wobei die Intensität der Reibwirkung natürlich in dem Maße zunahm, als die Gesamtmenge der Farbe sich verminderte. Es hat keinen Zweck, die erhaltenen Zahlen im einzelnen anzuführen, denn es ergab sich der Erwartung gemäß, daß ein Einfluß der Reibedauer auf die Lichtstärke des Gemisches innerhalb dieser Zeit überhaupt nicht beobachtet werden konnte. Die einzelnen Messungen schwanken innerhalb der Beobachtungsfehler um den gemeinsamen Mittelwert.

Es sei noch bemerkt, daß das Auftragen mit besonderer Sorgfalt geschehen muß, da das Gemisch eine große Neigung zum Streifigwerden aufweist. Ein Teil des Rußes geht in die Oberfläche der Tünche, und wenn man nach dem Reiben den Brei mit dem Pinsel zusammenstreicht, so bemerkt man in der Mitte, wo die Oberflächenschichten sich zusammengeschoben haben, dunklere Flecken von den Spuren des Rußes, die in die Oberfläche gegangen waren. Natürlich wurde vor dem Auftragen das Ganze noch einmal sorgfältig mit dem Pinsel vermischt. Wird der Auftrag unter kreuzweisem Streichen bis nahezu zum Trockenwerden der Farbe fortgesetzt, so kann man das Streifigwerden vermeiden.

Durch diesen Tatbestand der Unveränderlichkeit beim Reiben und die chemisch elementare Natur des Rußes erweist sich dieser Farbstoff als besonders geeignet für die Untersuchung des Einflusses, den verschiedene weiße Farbstoffe auf die Verdünnungslinie der Grauskala, d. h. das Verhältnis zwischen Konzentration und Helligkeit haben.

59. Einfluß der Feuchtigkeit. Nasse Leimtünche ist bekanntlich sehr viel dunkler als im ausgetrockneten Zustande, weil das Wasser des nassen Aufstriches zwischen den reflektierenden Teilchen des Farbstoffes optische Brücken bildet und dadurch ein tieferes Eindringen des Lichtes ermöglicht, bevor es reflektiert wird. Demgemäß erleidet es eine stärkere Absorption. Dieser Einfluß ist sehr bedeutend. Ein Auftrag beispielsweise, der im trockenen Zustande die Helligkeit 160 besitzt, bekommt im vollständig nassen Zustande die Helligkeit 64. Es ist dies eine Verschiebung um nicht weniger als sechs unserer Stufen. So ist die Vermutung nicht von der Hand zu weisen, daß auch die Feuchtigkeitsunterschiede, wie sie durch die Veränderlichkeit des Sättigungszustandes der Luft im Arbeitszimmer bedingt sind, einen Einfluß auf die beobachtete Helligkeit haben könnten.

Um diese Frage zu entscheiden, wurde ein Gemisch von Kreide mit 2 % Kienruß benutzt. Die Kreide zeigt von allen weißen Farbstoffen diesen Einfluß des Wassergehaltes am stärksten, weil ihr Brechungskoeffizient am geringsten ist. Es wurden zwei Blätter aus demselben bestrichenen Bogen geschnitten, der vorher einige Tage im Zimmer gelegen hatte und somit lufttrocken geworden war. Eines der Blätter wurde in einem Exsikkator über Chlorkalzium gebracht, das andere in einen zweiten, der mit reinem Wasser beschickt war, in dem also eine Feuchtigkeit von 100 % herrschte. Nach einer Stunde untersucht, erwiesen sich beide Blätter noch als praktisch gleich, die Helligkeit des getrockneten war 158, die des feucht aufbewahrten 157, obwohl das Papier der zweiten Probe sich bereits deutlich feucht anfühlte und weich war. Als indessen der Versuch weiter fortgesetzt wurde, konnte nach 24 Stunden der erwartete Unterschied beobachtet werden. Das trockene Papier zeigte 160, während das feuchte 141 ergab. Um jeden zufälligen Fehler auszuschließen, wurden beide Blätter gewechselt. Das bisher feucht gehaltene wurde über Chlorkalzium getrocknet und das trockene über Wasser gelegt. Nach sieben

Stunden bereits war das feuchte Blatt auf 161 gestiegen, während das trockene Wasser aufgenommen hatte und auf 145 herabgegangen war. Als dieses wieder über Chlorkalzium gebracht wurde, zeigte es bereits nach einer halben Stunde die maximale Helligkeit 160. Nun wurde eines der Blätter wiederum auf 24 Stunden über Chlorkalzium gebracht, während das andere in dieser ganzen Zeit an der Zimmerluft verweilte. Die Beobachtung ergab für beide vollkommen gleiche Helligkeit 161 und 161.

Diese Tatsache im Verein mit gelegentlichen Beobachtungen während anderer Messungen, daß nämlich vor kurzem hergestellte Aufstriche, wenn sie auch für das Gefühl der Hand trocken erscheinen, sich doch noch einige Zeit um mehrere Prozent dunkler erweisen als später, läßt folgendes allgemeine Verhalten der Aufstriche erkennen: Der nasse Aufstrich verliert sein Wasser verhältnismäßig langsam und darf infolgedessen nicht untersucht werden, bevor er vollständig trocken geworden ist, d. h. nicht vor Ablauf mehrerer Stunden nach der Herstellung des Aufstriches. Ist der Aufstrich einmal trocken geworden, so ändert er sich unter den Bedingungen der Feuchtigkeitsverhältnisse im Zimmer nicht mehr meßbar. Er nimmt das Maximum der Helligkeit an, welches überhaupt durch die Entfernung von Wasser erreichbar ist, denn der lufttrockene Aufstrich ist nicht verschieden von dem über Chlorkalzium getrockneten. Ebenso erweist sich der einmal lufttrocken gewordene Aufstrich als einigermaßen widerstandsfähig gegen den Einfluß der Luftfeuchtigkeit, da er nach einstündigem Aufenthalt in vollständig feuchter Luft sich noch nicht geändert hatte. Auf die Dauer wird er unter solchen Umständen aber nicht unerheblich, nämlich über 10% dunkler. Die so aufgenommene Feuchtigkeit verschwindet indessen bald in ganz trockener Luft wie in der des Laboratoriums. Es ist also nur Vorsicht beim ersten Trocknen und Messen zu beobachten, und man tut anfangs wohl, sich durch eine spätere Messung zu überzeugen, ob der Zustand erreicht ist, welcher weiterhin unter gewöhnlichen Bedingungen unverändert bleibt.

60. Neutralschwarz. Was das Mischungsverhältnis anlangt, nach welchem die verschieden hellen Grau auf den neutralen Ton gestimmt werden, so stellte sich heraus, daß es genügt, das Verhältnis zwischen Schieferschwarz und Goldocker konstant zu lassen. Das Verhältnis von neun Teilen Schieferschwarz und einem Teil

Goldocker, welches Mischungen von neutralem Grau ergibt, soll weiterhin Neutralschwarz genannt werden. Dieses Verhältnis ist nicht ganz unabhängig von der Natur und Menge des Bindemittels, mit welchem man die Gemische aufträgt, die angegebene Zahl gilt also ausdrücklich für die vorstehend geschilderten Bedingungen und die oben angegebenen Vorschriften über die Natur und den Gehalt des Bindemittels.

Als es sich später nötig erwies, die Kreide in den grauen Gemengen durch Lithopon zu ersetzen, mußte auch das Verhältnis zwischen Schieferschwarz und Goldocker geändert werden: vier Teile Schieferschwarz und ein Teil Goldocker ergeben mit Lithopon unter Beibehaltung der für das Bindemittel angegebenen Vorschrift neutrales Grau. In ähnlicher Weise ist es notwendig, für jede neue Kombination von vornherein die Zusammensetzung des Neutralschwarz festzustellen, da von der Genauigkeit, mit welcher das neutrale Grau nachgebildet ist, die Anwendbarkeit der erzeugten Aufstriche zu Messungen im Gebiete der bunten Farben maßgebend abhängig ist.

61. Bestimmung der Mischungsverhältnisse. Da über die Gesetze, von denen die Helligkeit der Gemische aus zwei gegebenen Farbstoffen abhängt, noch gar nichts bekannt ist, gelangt man zur Lösung der praktischen Aufgabe der Herstellung einer entsprechenden Grauskala aus gegebenen Farbstoffen (in unserem Falle Kreide und Neutralschwarz) am einfachsten, indem man die Beziehung zwischen Helligkeit und Mischungsverhältnis zunächst experimentell an einer genügenden Anzahl von Gemischen bekannter Zusammensetzung feststellt und dann zwischen den so erhaltenen Punkten graphisch die erforderlichen Mischungsverhältnisse interpoliert, welche den Helligkeiten der obenstehenden Tabelle entsprechen. Hierbei macht man zweckmäßig von der Tatsache Gebrauch, *daß sich sehr angenähert eine arithmetische Reihe von Helligkeiten ergibt, wenn man die Mischungsverhältnisse in geometrischer Reihe abändert.* Um demgemäß einigermaßen äquidistante Punkte der zu suchenden Kurve synthetisch zu bestimmen, hat man die Mischungsverhältnisse nach gleichen Quotienten abzustufen und erhält eine fast geradlinige Beziehung, wenn man als Koordinaten der Kurve die Logarithmen der Mischungsverhältnisse gegen die Helligkeit einträgt.

Praktisch kann man demgemäß folgendermaßen verfahren. Man stellt zunächst Gemische aus Schwarz und Weiß her, in

denen der Anteil an Schwarz 0,5, 0,2, 0,1 beträgt; sodann Gemische mit 0,05, 0,02, 0,01 Schwarz. Ist die letzte Mischung dem Weiß noch nicht nahe genug, so macht man noch 0,005, 0,002, 0,001. Weiter zu gehen, ist im allgemeinen nicht nötig. Die zweite Reihe stellt man des genaueren Abwägens wegen nicht aus Schwarz und Weiß her, sondern aus fertigem Grau mit 0,1 Schwarz und 0,9 Weiß, die man im Verhältnis 0,5, 0,2, 0,1 auf 1 ergänzt. Ebenso macht man für die dritte Reihe einen Vorrat mit 0,01 Schwarz usf. Die sorgfältig hergestellten Gemische werden in der beschriebenen Weise aufgetragen, worauf man sie nebst reinem Weiß und Schwarz wiederholten Messungen ihrer Lichtstärke unterzieht. Man trägt dann, wie angegeben in Koordinatenpapier als Abszissen die Logarithmen dieser Verhältnisse als Ordinaten die beobachteten Helligkeiten ein und verbindet die so erhaltenen Punkte durch eine stetige Linie, die fast geradlinig ausfällt. Nur an beiden Enden wendet sie sich, um asymptotisch zur Abszissenachse zu verlaufen.

Sucht man nun in den so erhaltenen Kurven die Punkte auf, welche den Helligkeiten der Tabelle (S. 422) entsprechen, so findet man als zugehörige Abszissen die Logarithmen der Anteile Schwarz bzw. Weiß, welche die gesuchten Helligkeiten ergeben. Man braucht dann nur diese Gemische herzustellen und in der angegebenen Weise zu behandeln, um alsbald die gesuchte Grauskala zu haben. Da die ganze Arbeit naturgemäß mit Versuchsfehlern behaftet ist, ist es gut, die Gemische mehrfach herzustellen und zu messen, und die Mengenverhältnisse aus den erhaltenen Mittelwerten zu bestimmen.

62. Die Grauskala mit Lithopon. Nachdem in mannigfaltiger und ausführlicher Vorarbeit die z. T. ziemlich prekären Bedingungen festgestellt worden waren, unter denen man mit Hilfe von Schieferschwarz, Ocker und Kreide eine Grauskala herstellen kann, und diese Skala auch verwirklicht worden war, stellte sich heraus, daß die graugelbliche Färbung der Kreide bei den helleren Stufen so auffallend in die Erscheinung trat, daß diese nicht mehr als Neutralgrau angesprochen werden konnten. Der Ersatz einer Anzahl dieser hellsten Stufen durch ein entsprechendes Gemisch mit einem weißeren Farbstoff, zu dem ich aus mehreren Gründen Lithopon wählte, gestattete zwar, diesen wesentlichen Übelstand zu vermeiden, brachte aber einen anderen mit sich. Da nämlich

der Charakter der aufgetragenen Deckfarbe beim Lithopon einigermaßen anders als bei der Kreide ist, so tritt an der Übergangsstelle von einem Material zum anderen ein nicht zur Sache gehöriger Sprung auf, welcher die allgemeine Brauchbarkeit der Skala benachteiligt und unter allen Umständen als ein vermeidbarer ästhetischer Nachteil angesehen werden muß. So gelangte ich schließlich dazu, die ganze an die Kreidegrauskala gewendete Arbeit als eine bloß vorläufige anzusehen und an ihrer Stelle eine durchgängig mit Lithopon als weißem Farbstoff hergestellte Skala zu verwenden. Auf Grund der vorher gemachten Erfahrungen nahm diese Arbeit nur eine verhältnismäßig geringe Mühe in Anspruch; sie wurde folgendermaßen durchgeführt.

Zunächst überzeugte ich mich, daß, wenn man ein Gemisch aus Lithopon und dem durch Ocker neutralisierten Schieferschwarz (4 Schwarz, 1 Goldocker), etwa 10 bis 15 Minuten lang in der Reibschale unter mäßigem Druck verrieben hat, die Veränderlichkeit der Remission mit der Dauer oder Stärke des Reibens gering genug wird, um eine recht gute, wenn auch allerdings nicht vollkommene Reproduzierbarkeit der zu verschiedenen Zeiten hergestellten Gemische zu ermöglichen. Allerdings wird auf solche Weise keineswegs ein Endzustand erreicht, denn, wenn man kleine Mengen eines derartigen Gemisches in der Reibschale einer sehr energischen Weiterbehandlung unterwirft, so kann man dessen Remission ziemlich erheblich vermindern und das Gemisch ohne Änderung seiner Zusammensetzung um eine, ja bei sehr langem Reiben sogar um fast zwei Stufen dunkler machen. Ich hatte hier die Wahl, entweder wie bei der Kreide einen Endzustand etwa durch genügend lange fortgesetztes nasses Mahlen anzustreben oder aber mich mit der Unvollständigkeit der Definition aus der Zusammensetzung allein zufriedenzugeben und die letzte Einstellung des Gemisches auf die richtige Remission so zu bewerkstelligen, daß ich das Gemisch zunächst noch etwas heller ließ als der angestrebten Stufe entsprach und dann durch bemessene Weiterbehandlung in der Reibschale genau auf den angestrebten Punkt einstellte. Trotz seiner tastenden Beschaffenheit gewährt das zweite Verfahren eine recht förderliche Möglichkeit, zum gewünschten Ziele zu kommen, wie ich denn in etwa drei Tagen die ganze Skala von 25 Gliedern bis auf etwa 1% genau herzustellen vermochte. Die in Arbeit genommene Menge der Gemische betrug je 100 Gramm. Da man

nun mit 1 g etwa 250 qcm gut decken kann, so reicht die genannte Menge für $2\frac{1}{2}$ qm aus, d. h. sie gewährt eine fast unabsehbare Arbeitsmöglichkeit nach allen Richtungen. Im einzelnen wurde folgendermaßen vorgegangen. Es wurden wieder zunächst Gemische mit 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20 und 50% Neutralschwarz in Mengen von je 100 g hergestellt. Jede Portion wurde 20 Minuten lang in einer großen Reibschale gerieben, wobei acht darauf gegeben wurde, ein bestimmtes, stets gleichbleibendes Verfahren einzuhalten. Dann wurden mit diesen Gemischen Aufstriche hergestellt, deren Remission mittels des Lichtmessers in wiederholten Bestimmungen und zwar an mehreren Versuchsblättern festgestellt wurde. Die Mittelwerte dieser Bestimmungen der Helligkeiten wurden nun als Ordinaten in Netzpapier eingetragen, während als Abszissen die Logarithmen der genannten Konzentrationen 0,002 bis 0,5 dienten. Die Benutzung der Logarithmen anstelle der Zahlenwerte selbst ist notwendig, damit die Kurve in bequemen Abmessungen hergestellt werden kann, ohne daß die Genauigkeit im Gebiete der kleinen Konzentrationen leidet. Denn die logarithmischen Abszissen ergeben für die Bestimmung des Gehalts an schwarzem Farbstoff auf der Kurve überall fast die gleiche *relative* Genauigkeit, d. h. die anzustrebende ideale Beziehung. Wie an anderer Stelle dargelegt worden ist, verläuft eine derartige Kurve in einem großen Teil ihrer Erstreckung fast geradlinig, biegt sich aber im Gebiete der sehr kleinen Konzentrationen und großen Helligkeiten, ebenso wie in dem Gebiete der größten Konzentration und geringsten Helligkeit im Sinne der Abszissenachse um, so daß sie in Summa die Gestalt eines sehr flach gezogenen S annimmt. Durch diese Punkte mußte nun eine stetig verlaufende Kurve gelegt werden. Dies gelingt leicht mit Hilfe eines stählernen Kurvenlineals, welches durch angebrachte Zapfen und doppelgängige Schrauben in beliebiger Weise gekrümmt werden kann. Wenn die Kurve nach beiden Richtungen etwa 50 cm mißt, so ist die Genauigkeit auf dem gewöhnlichen Millimeterpapier völlig zureichend. Denn da die Mengen des zuzusetzenden Schwarz bei zwei aufeinanderfolgenden Stufen sich um 25% ihres Betrages und mehr ändern, so sieht man, daß eine Bestimmung der Konzentration auf 1% ihres Betrages reichlich für die Definition des Gemisches genügt. Indem man nun mit der Tabelle für die Helligkeiten der 25 (logarithmischen) Stufen zwischen 1000 und

20 in die Kurve eingeht, erhält man als zugehörige Abszissen die Logarithmen der entsprechenden Prozente an Schwarz. Man hat damit die Zusammensetzung aller Gemische, welche innerhalb des Remissionsgebietes liegen, das einerseits vom Lithopon und andererseits von dem mit Ocker vermischten Schieferschwarz begrenzt ist. Praktisch nutzt man, wie weiter unten dargelegt werden wird, diese Grenze nach der Seite des Schwarz nicht ganz aus, weil die nur wenig Weiß enthaltenden Gemische wegen des vorhandenen Ockers zu braun aussehen.

Oben war angegeben worden, daß ein „Neutralschwarz“ aus Schieferschwarz im Verhältnis von 4 Teilen zu 1 Teil dunklem Goldocker gemischt für den größten Teil der Grauskala ein neutrales Grau ergibt. Ganz vollständig trifft dieses nicht zu, da die helleren Abmischungen vielleicht um eine Spur zu blau und die dunkleren Abmischungen um ein geringes zu braun ausfallen. Auf die Korrektur der sehr geringen ersten Abweichung habe ich verzichten zu können geglaubt, die zweite Abweichung ist verbessert worden, wie alsbald angegeben werden wird. Es sei noch bemerkt, daß ich, um einer vollständigen Gleichförmigkeit der Mischung sicher zu sein, das angewandte Normalschwarz vor dem Gebrauch eine Stunde lang trocken in der Kugelmühle gemahlen habe. Von diesem Gemisch wurde eine größere Menge hergestellt, damit man in der Menge der herzustellenen Zwischenstufen nach keiner Richtung beschränkt war, und doch auf die Konstanz des Ausgangsmaterials sich verlassen konnte.

Die auf die vorbeschriebene Weise erhaltene Tabelle diene für die Herstellung des größten Teils der Stufen, nämlich von B bis R. Die gefundenen Mengenverhältnisse teile ich in der nachfolgenden Tabelle mit; da aber voraussichtlich nicht alles, was man unter dem Namen Schieferschwarz jetzt und später wird kaufen können, sich ebenso verhält wie mein Farbstoff, so hat die Tabelle nur die Bedeutung eines Beispiels und eines Anhaltes für den ungefähren Verlauf der Konzentrationsverhältnisse bei anderen Proben des gleichnamigen Pigments. Vielleicht darf man sogar darauf rechnen, daß bei einem solchen die Zahlen, wenn sie auch im numerischen Betrag einigermaßen von den in der Tabelle mitgeteilten abweichen, sich doch proportional verhalten werden, so daß einige wenige Bestimmungen an den Enden und in der Mitte des ganzen Gebietes genügen würden, um die korrigierten Zahlen für das andere Pigment abzuleiten.

Neutral- schwarz	Remission		Neutral- schwarz	Remission	
	gef.	ber.		gef.	ber.
A — (Barytweiß)	1000	1000	K 14,8 % in Lithopon	230,0	230,6
B 0,18 % in Lithopon	850	853	L 19,0	194,8	195,6
C 0,72	724	722	M 25,1	166,3	166,4
D 1,41	616	613	N 32,4	139,8	141,4
E 2,46	520	521	O 40,8	119,6	120,2
F 4,06	443	443	P 49,8	101,1	102,1
G 6,66	379	376	Q 59,1	86,6	86,7
H 9,10	317,5	319,5	R 68,6	74,0	73,6
I 11,7	274,2	271,4			

Jedes Gemisch wird nun nach dem Abwägen der Bestandteile zum Gesamtgewicht von 100 g 15 Minuten lang auf dieselbe Weise gerieben, wie das mit den der Kurve zugrunde gelegten Normalgemischen geschehen war. Dann fertigt man einen Aufstrich und mißt ihn im Farbmesser. Da die Reibedauer kürzer war als die Normalgemische, so wird man voraussichtlich eine etwas zu große Remission finden. Aus dem Betrage der Abweichung vom Sollwert entnimmt man, wie lange man das Reiben noch fortführen muß, und einige wenige Erfahrungen geben einem bald die erforderliche Zeit an die Hand. Ich kann angeben, daß ich selten mehr als zwei Proben zu machen brauchte, um die Remission innerhalb eines Prozentes auf den angestrebten Wert einzustellen.

Für die Stufen S bis W diene folgendes Verfahren. Es wurde zunächst ein Gemisch aus 60 Teilen Normalschwarz und 40 Teilen Lithopon hergestellt. Während Lithopon allein oder Gemenge, welche diesen Farbstoff in vorwiegender Menge enthalten, sich in der Kugelmühle nicht behandeln lassen, weil sie durch den Druck der Kugeln zu festen Massen zusammengepreßt werden, welche der Trommelwand anhängen, bewirkt der reichliche Gehalt an Schieferschwarz, daß jenes Gemisch pulverförmig bleibt, und somit durch einstündiges Reiben in der Kugelmühle gleichförmig gemacht werden kann. Es werden nun Aufstriche erstens von diesem Gemisch, zweitens von einem Gemisch aus 50 % desselben mit der gleichen Menge Schieferschwarz, und endlich von reinem Schieferschwarz hergestellt und gemessen. Diese drei Punkte genügen, um den schwach gekrümmten Verlauf der Helligkeitswerte zwischen den Grenzen festzustellen; es ist hierbei nicht nötig, Logarithmen der

Konzentration anzuwenden. Der entsprechenden Zeichnung entnimmt man die Prozentverhältnisse, nach denen die Nummern S bis W zusammengesetzt sind. Wiederum als Beispiel gebe ich die von mir gefundenen Mengenverhältnisse in der nachstehenden Tabelle wieder.

	60%-Gemisch	Schieferschwarz
S	84	16
T	63	37
U	33	67
V	27	73
W	9	91

Was endlich die drei letzten Glieder X, Y, Z anlangt, so müssen diese aus Schieferschwarz, dessen Remission zwischen W und X liegt und Pariserschwarz, welches zuweilen um ein geringes dunkler als Z ausfällt, zusammengesetzt werden. Hier genügt eine geradlinige Interpolation, zumal die Genauigkeit der Messung dieser dunkelsten Stufen um ein merkliches geringer ist, als die der mittleren und helleren. Auch für diesen Teil der Skala seien als Beispiel die von mir benutzten Zahlen mitgeteilt.

	Schieferschwarz	Pariserschwarz
X	79	21
Y	41	59
Z	10	90

Auch die Gemische dieser Gebiete werden in Aufstrichen untersucht, und wenn sie die theoretisch erforderliche Remission nicht genau ergeben, mit Hilfe der einen oder andern Komponente nach einfacher Interpolation korrigiert.

Das Auftragen der Gemische erfolgt, indem man jede Nummer mit dem gleichen Gewicht von 33prozentigem Sichellem vermischt, mit Hilfe des Spatels den Brei homogen macht und ihn mit einem breiten, weichen Haarpinsel auf dünnes Zeichenpapier mit matter aber nicht genarbter Oberfläche aufträgt. Einige Erfahrungen lehren bald die Stärke des Auftrages kennen, welche einerseits vollständige Deckung ergibt und andererseits ein Ausgleichen durch kreuzweise Behandlung mit dem Pinsel ermöglicht. Mit einiger Geduld und Geschicklichkeit kann man diesen Auftrag (und zwar viel leichter als bei Kreidefarben) sehr gleichförmig und schön erhalten und die Pinselspuren bis auf unsichtbare Reste beseitigen.

Das Bestreichen der Blätter geschieht, indem man das Papier auf einen Bausch Filtrierpapier legt, der stark befeuchtet, aber nicht mehr naß ist. Hierdurch wird bewirkt, daß zu derselben Zeit, wo die Feuchtigkeit von oben aus der Tünche in das Papier dringt, auch die untere Seite feucht wird. Dieser kleine Kunstgriff bewirkt, daß das Blatt beim Aufstreichen der Tünche eben bleibt; man kann so das Ausgleichen des Auftrages in aller Bequemlichkeit durchführen. Das nasse Blatt wird an einer Ecke freihängend angenadelt und nach dem völligen Trocknen unter Druck in einer Mappe aufbewahrt. Auf solche Weise erzielt man ohne die geringste Schwierigkeit vollständig ebene Blätter, was eine wesentliche Voraussetzung für die Genauigkeit der Remissionsbestimmung ist.

63. Die Grauleiter als Photometer. Die wichtigste Verwendung einer so hergestellten Grauskala ist die als handliches Photometer zur Messung der Helligkeit anderer Aufstriche sowohl von grauer wie jeder anderen Farbe. Zu diesem Zweck habe ich folgende Einrichtung am geeignetsten gefunden. Man zeichnet auf die Rückseite der gestrichenen Blätter ein Netz, welches Streifen von 8 mm Breite und 30 mm Länge abgrenzt, und schneidet die Blätter mit einer scharfen Schere nach diesen Linien. Es ist wichtig, daß die Klinge der Schere fehlerlos ist und nirgendwo das Papier ausreißt, da die Leichtigkeit und Genauigkeit der Ablesung von der Schärfe der Ränder in der Skala abhängt. Es werden dann Rahmen aus schwarzem Karton hergestellt, die einen inneren Ausschnitt von 20 : 304 mm haben, und die 25 Streifen der Skala werden mit 4 mm Abstand so am Rahmen festgeklebt, daß sie eine regelmäßige Leiter bilden. Man klebt die einzelnen Farbstreifen mit der farbigen Seite nach unten an beiden Enden an, wobei man den Rahmen umgekehrt auf einem Papier festnadelt, auf welchem die Abstände von 12 zu 12 mm verzeichnet sind, und gibt vorsichtig acht, daß nichts vom Klebemittel auf den freien Teil des Aufstriches gelangt, da es diesen viel dunkler macht. Die fertige Leiter wird unter Druck getrocknet. Zuletzt schreibt man noch zu den einzelnen Farbstreifen auf den Rahmen ihre Bezeichnungen von A bis Z und hat nun ein allgemeines Helligkeitsmaß zur Hand.

Um die Helligkeit eines vorgelegten Gegenstandes, beispielsweise eines farbigen Blattes Papiers zu bestimmen, legt man

die „Grauleiter“ so darüber, daß diejenigen grauen Streifen das Objekt decken, welche ungefähr die gleiche Helligkeit wie die zu untersuchende Farbe aufweisen. Hierbei muß man acht geben, daß das Licht parallel den Farbstreifen einfällt und somit keine Schatten an ihren Rändern erzeugt. Das Grau gleicher Helligkeit findet man sehr leicht, wenn man darauf achtet, daß die untersuchte Farbe einerseits in den Zwischenräumen zwischen den dunkleren grauen Streifen *hell* hervortritt, während auf der andern Seite die Zwischenräume *dunkler* erscheinen als die Streifen. Man wird überrascht sein von der Leichtigkeit, mit welcher man denjenigen Streifen findet, von dem aus die Zwischenräume einerseits zunehmend dunkler, andererseits zunehmend heller erscheinen.

Da die hier ausgeführten Stufen mindestens viermal größer sind, als der Unterschiedsschwelle entspricht, so wird man bald auch noch die beiden Fälle unterscheiden, wo entweder ein bestimmtes Grau völlig an Helligkeit mit der untersuchten Farbe übereinkommt, oder wo von zwei benachbarten Streifen der eine entschieden heller, der andere entschieden dunkler als die Farbe ist. Durch die Benutzung dieses Unterschiedes wird die Anzahl der unterscheidbaren Stufen verdoppelt und überschreitet damit erheblich die Genauigkeit, welche für die meisten praktischen Zwecke erforderlich ist.

Um sich von der Ausgiebigkeit dieses einfachen Hilfsmittels zu überzeugen und gleichzeitig die Bedingung kennen zu lernen, innerhalb deren Messungen dieser Art übereinstimmende Resultate ergeben, kann man z. B. mit seiner Hilfe das bekannte PURKINJE-Phänomen beobachten. Dieses besteht darin, daß rote und gelbrote Farben bei zunehmender Dunkelheit viel schneller dunkel werden, als neutrale und blaue Farben. Streicht man beispielsweise ein Papier mit Mennige an, so findet man dafür bei hellem Tageslicht die Stufe G. Wiederholt man diese Messung beim Einbruch der Abenddämmerung (am geeignetsten sind Abende, an denen die Sonne hinter Wolken untergeht und daher keine Abendröte erzeugt) so sieht man, wie das Grau gleicher Helligkeit weiter und weiter abwärts wandert. Bei einem Licht, bei welchem ich kleine Schrift nicht mehr, wohl aber noch leicht 4 mm hohe Buchstaben lesen konnte, wurden die Stufen M oder N erreicht. Hat man derart einigemale die allgemeine Helligkeit festgestellt, bei welcher dieses Wandern beginnt (sie entspricht einer sehr

trüben Beleuchtung, wie sie über Tag nur selten bei Schneesturm und Gewittern einzutreten pflegt), so prägt man sich leicht die Grenze ein, oberhalb deren man Helligkeitsuntersuchungen ausführen kann.

Daß die bei Tageslicht ermittelten Helligkeiten stark gefärbter Objekte bei künstlichem Licht sich ändern, ist wohl bekannt. Auch hierüber lassen sich mit Hilfe der beschriebenen Grauleiter sehr belehrende Messungen von überraschender Genauigkeit anstellen.

Die eben beschriebene Grauleiter ist vorzugsweise geeignet für schnelle und angenäherte Bestimmungen. Soll das photometrische Verfahren mit Hilfe bekannter grauer Aufstriche etwas höheren Ansprüchen genügen, so müssen die grauen Flächen, um die Sicherheit des Vergleiches zu erhöhen, angemessen vergrößert werden. Die nachstehend beschriebene Form hat sich bei ausgedehntem Gebrauch als praktisch erwiesen.

Man schneidet aus den abgestuften Aufstrichen Blätter von etwa 3 : 6 cm Seite und klebt diese nebeneinander auf einen entsprechenden langen Streifen dicker Pappe oder ein hölzernes Brettchen. Dann wird eine Pappe, die um einige Zehntel Millimeter stärker ist als das Papier der Aufstriche längs dieser Reihe aufgeklebt. Sie hat den Zweck, daß man auf ihrer etwas hervorragenden Oberfläche die zu vergleichenden Papierblätter oder Karten über der Skala hin- und herbewegen kann, ohne daß diese die grauen Aufstriche unmittelbar berühren und verkratzen; während sie ihnen doch so nahe sind, daß ein unmittelbarer Vergleich möglich ist. Die zu messenden Aufstriche werden am besten gleichfalls auf das Format 3 : 6 cm gebracht und behufs genauer Vergleichung so gestellt, daß sie gleichzeitig zwei nebeneinanderliegende graue Felder, zwischen denen ihre eigene Helligkeit liegt, teilweise überdecken.

Man kann auf diese Weise nach einiger Übung den Unterschied zweier Stufen noch fünffach unterteilen, so daß die Gesamtzahl der unterscheidbaren Stufen auf 120 steigt. Um diese Zwischenstufen zu kennzeichnen, habe ich mich gewöhnt, die entsprechende Ziffer des Dezimalbruches hinter den Buchstaben der Stufe zu schreiben. So bedeutet F8 eine Helligkeit, welche um vier Fünftel oder acht Zehntel des Unterschiedes zwischen F und G zwischen beiden liegt.

Eine derartige photometrische Skala ist bei den angegebenen Abmessungen etwa $\frac{3}{4}$ Meter lang und daher zuweilen unbequem zu handhaben und zu transportieren. Man kann sie in zwei oder drei Teile zerlegen, muß aber dann an den Zerlegungsstellen beiderseits noch mindestens zwei Stufen zufügen, damit die Schätzungen der Zwischenstufen nicht durch den Mangel an Symmetrie benachteiligt werden. So enthält beispielsweise die dreigeteilte Skale, welche ich vorwiegend gebrauche, zunächst die Stufen A bis K, sodann die Stufen H bis R und endlich Q bis Z.

Um die Benutzung dieser Einrichtung zu erleichtern, teile ich nachstehend die Helligkeitswerte für die Zwischenstufen ausgerechnet mit. Da hierbei die Versuchsfehler rund 3% betragen, genügt eine abgekürzte Tabelle mit zwei Stellen

	0	2	4	6	8
A	100	97	94	91	88
B	85	82	80	77	75
C	72	70	68	65	63
D	61	59	58	56	54
E	52	50	49	47	46
F	44	43	42	40	39
G	38	36	35	34	33
H	32	31	30	29	28
I	27	26	25	25	24
K	23	22	22	21	20
L	20	19	18	18	17
M	17	16	16	15	15
N	14	14	13	13	12
O	12	12	11	11	10
P	10	10	9,6	9,3	9,0
Q	8,7	8,4	8,1	7,9	7,6
R	7,4	7,1	6,9	6,7	6,5
S	6,3	6,1	5,9	5,7	5,5
T	5,3	5,1	5,0	4,8	4,6
U	4,5	4,4	4,3	4,1	4,0
V	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4
W	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9
X	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4
Y	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1
Z	2,0	—	—	—	—

64. Die endgültige Anordnung der Schwarz-Weiß-Skala.

Die Herstellung der vorläufigen Grauskala zwischen Barytweiß und Pariserschwarz als den zurzeit in Betracht kommenden Extremen in der fraglichen Reihe und unter der Voraussetzung, daß die Remission des Pariserschwarz ein Fünfzigstel von der des Barytweiß beträgt, in 24 Stufen hat gezeigt, daß die gemachte Voraussetzung, nämlich die mindestens angenäherte Gültigkeit des *Fechnerschen* Gesetzes, gut erfüllt ist. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Stufen erscheinen dem Auge tatsächlich praktisch gleichwertig, und die Bestimmung der Remission beliebiger gefärbter Flächen, ob grau oder bunt mit Hilfe einer solchen Skala hat sich als so leicht und sicher erwiesen, daß es wünschenswert erscheint, dies System rationell und daher für alle Zukunft endgültig zu entwickeln. Eine derartige Skala mit hinreichend engen Intervallen erspart nämlich für sehr viele Arbeiten das Photometer, dessen Handhabung, abgesehen von seinem für manchen bereits in Betracht kommenden Preise durch die erforderlichen Beleuchtungs- und Verdunkelungseinrichtungen immerhin etwas umständlich ist und einen in physikalischen Arbeiten einigermaßen geübten Beobachter voraussetzt. Im Gegensatz dazu ist z. B. die leiterartig angeordnete Grauskala, in deren Zwischenräumen die zu untersuchende Farbe im Vergleich mit den grauen Stufen erscheint, ohne weiteres überall anwendbar, sie strengt das Auge nicht an und ergibt Beobachtungen, die an Genauigkeit für praktische Zwecke mehr als ausreichend sind.

Es erscheint deshalb an der Zeit, sich auf die endgültigen Grundlagen einer rationellen Einteilung des ganzen Gebietes von Weiß bis Schwarz zu besinnen und das Provisorium, welches angenommen werden mußte, um die Arbeiten überhaupt in Gang zu bringen, zu gegebener Zeit durch endgültige, weil willkürfreie und eindeutige Bestimmungen zu ersetzen.

Es sei daran erinnert, daß der eine Punkt der Skala durch die diffuse Reflexion oder Remission des reinen Bariumsulfats bestimmt ist, welcher Farbstoff von allen untersuchten (die im übrigen nicht erheblich abweichen) die reinste Weiße zeigt und sich leicht in übereinstimmender Beschaffenheit herstellen und aufbewahren läßt. Die Remission einer mit diesem Weiß (unter Zusatz von soviel farblosem Bindemittel als nur eben zur Herstellung der Reibefestigkeit erforderlich ist) hergestellten matten Oberfläche

wird als Einheit angesehen unter der Annahme, daß sie die theoretische Albedo Eins darstellt.

Für den zweiten Festpunkt der Skala, die Definition eines Schwarz kommt man nicht so bald zum Ziel, weil es sich hier um eine unbegrenzte Annäherung an einen Endwert handelt, der theoretisch nie erreicht werden kann und dessen jeweilige angenäherte praktische Verwirklichung dem Übertroffenwerden durch neue technische Hilfsmittel stets ausgesetzt bleibt. Da ferner gemäß dem *Fechnerschen* Gesetze die Stufen der Helligkeit, welche als gleich empfunden werden, nach einer Reihe sich fortsetzen, die durch die Logarithmen der Helligkeit gegeben sind, der Logarithmus der Helligkeit Null aber Minus Unendlich ist, so hat auch grundsätzlich die Weiß-Schwarz-Reihe am schwarzen Rande keinen natürlichen oder eindeutig definierbaren Endpunkt. Es ist daher notwendig, diese zwischen den Helligkeiten 1 und 0 nach Stufen, deren Anzahl unendlich werden kann, sich erstreckende Reihe mit einem *zweiten Fixpunkt im endlichen Gebiete* zu versehen, mit dessen Hilfe man zunächst die Stufen dieses endlichen Gebietes festlegt. Dann kann man über diesen zweiten Fixpunkt hinaus beliebig viel Stufen mehr ansetzen, um die jeweils durch Pigmente oder sonstwie künstlerisch-technische Mittel realisierbaren schwarzen Farben zu erreichen. Wir stehen hier vor einer Aufgabe, die ganz vergleichbar der ist, die von 0 bis + unendlich fortlaufende Reihe der ganzen positiven Zahlen, die ebenfalls keinen natürlichen Fixpunkt in ihrem Verlauf aufweist, so zu teilen, daß sie in endliche Stücke zerlegt wird, deren stufenweise Anwendung zur Ordnung des gesamten Zahlenmaterials eine vollständige Übersicht und Beherrschung derselben ermöglicht. Bekanntlich ist dieses Problem dadurch gelöst worden, daß man die *Gruppe der ersten zehn Zahlen* als Typus gewählt hat, daß man also den willkürlichen Fixpunkt *zwischen neun und zehn* gelegt hat. Durch Vervielfältigung und Potenzierung der Zehn läßt sich das unendliche Gebiet des positiven Zahlkörpers so einteilen, daß jedes endliche Stück desselben geordnet und übersehbar gemacht ist. Die Durchführung des indisch-arabischen Ziffernsystems, welche erst das Zahlenrechnen praktikabel gemacht hat, beruht ja ganz und gar auf dieser ersten willkürlichen Annahme des Zehnerteilung.

Hieraus ergibt sich die ganz allgemeine Konsequenz, daß *jedes* andere Zahlenwerk im gesamten Gebiet der zählenden, messenden

und rechnenden Wissenschaften gleichfalls nach dem dekadischen Prinzip eingeteilt werden muß, wenn es anders sich systematisch der allgemeinen Welt der Zählbaren einordnen lassen soll.

Demgemäß haben wir auch in unserem besonderen Falle die Frage zu beantworten, in welcher Weise das dekadische Prinzip willkürfrei auf das hier vorliegende Problem der systematischen Einteilung der Weiß-Schwarz-Reihe anzuwenden ist. Die Antwort, und zwar die einzige, willkürfreie und daher unabänderliche, soviel ich erkennen kann, die es auf diese Frage gibt, ist die folgende. *Der festzulegende Fixpunkt muß ein Zehntel der Helligkeit des normalen Weiß haben.* Zwischen den entsprechenden Remissionen 1 und 0,1 sind *zehn* Stufen nach einer geometrischen Reihe einzuschalten, welche sich als die Numeri der Logarithmen 0,9 0,8 0,7 ... — 1 ergeben. Die Remissionen 1 bis 0,1 entsprechen ungefähr drei Fünfteln der bisherigen alphabetischen Skala (*P* hat 0,102), und es gibt noch ein erhebliches Gebiet dunkler Graue, welches über diesen Punkt hinaus liegt. Der nächste Punkt in diesem Gebiet ist gemäß dem *Fechnerschen* Gesetz und den oben dargelegten Grundsätzen die Remission $1/100$ oder 0,01. Dieser Punkt liegt bereits um mehrere Stufen über das schwärzeste Pigment, das man bisher hat ausfindig machen können, das Diamantschwarz hinaus, denn dieses hat 0,014. Innerhalb des Gebietes der Remissionen 1 bis 0,01 liegen also 20 der oben definierten Stufen, welche die ganze schwarz-weiße Skala, soweit sie durch Pigmente realisierbar ist, reichlich umfassen und auch für absehbare Zeit umfassen werden.

65. Unterteilung der Grundreihe. Eine Stufe dieser Reihe liegt zufällig sehr genau bei der Remission 0,02, dem unteren Endpunkt der bisherigen Skala, und zwar ist dies der 17. Punkt der neuen Skala. Es entsprechen mit anderen Worten ungefähr zwei Stufen der Skala dreien der alten. Eine derartig grobe Abstufung ist natürlich nur für die einfachsten empirischen Verhältnisse ausreichend und bedarf einer Verfeinerung, sobald exaktere Beziehungen aufgestellt werden sollen. Die Unterteilung dieser Skala, welche solchergestalt erforderlich wird, darf natürlich wiederum nur dekadisch erfolgen. Es sind somit zwischen je zwei Punkten der bisherigen dekadischen Skala noch zehn Unterteile anzubringen. Hierdurch wird der Exponent der entsprechenden geometrischen Reihe auf rund 2,3% gebracht und die engere Skala erhält Stufen,

die in der Nähe der Schwelle liegen. Diese schwankt je nach den Beobachtungsverhältnissen, insbesondere je nach der Schärfe, mit welcher die zu vergleichenden Felder aneinander grenzen, etwa zwischen 0,2 und 2%. Die gesamte durch Pigmente herstellbare Skala würde bei dieser feineren Einteilung etwa 180 Stufen umfassen und praktisch für weitaus die meisten Zwecke vollkommen ausreichen. Eine weitere dekadische Unterteilung führt über den kleinsten Wert der Schwelle, der unter den allergünstigsten Umständen erreichbar ist, jedenfalls hinaus und stellt damit für das, was der physiologischen Beobachtung zugänglich ist, die äußerste Grenze dar. Wenigstens solange die menschlichen Sinnesapparate keine wesentlich andere Beschaffenheit annehmen als bisher, wofür keinerlei Wahrscheinlichkeit spricht.

Um eine Anschauung von den Helligkeitswerten dieser rationalen oder absoluten Skala der Helligkeiten zu geben, teile ich nachstehend zunächst die zehnstufige Einteilung zwischen 1 und 0,1 mit; weiterhin die hundertstufige, soweit sie für Messungen überhaupt in Betracht kommt, und zuletzt ein Stückchen der tausendstufigen.

Zehnstufige absolute Helligkeitsreihe.

Helligkeit		Helligkeit	
Nr. 0	1,000	Nr. 10	0,1000
1	0,794	11	0,0794
2	0,631	12	0,0631
3	0,501	13	0,0501
4	0,398	14	0,0398
5	0,316	15	0,0316
6	0,251	16	0,0251
7	0,200	17	0,0200
8	0,159	18	0,0159
9	0,126	19	0,0126
10	0,100	20	0,0100

Wie man sieht und wie sich aus den Eigenschaften der Logarithmen unmittelbar ergibt, ist die dunklere Hälfte der Skala, welcher die Nummern 10 bis 20 beigeschrieben worden sind, die Wiederholung der helleren Hälfte, nur daß das Dezimalkomma um

eine Stelle nach links verschoben worden ist. Dasselbe gilt natürlich auch für die hundertstufige Skala, so daß es genügt, den Teil von 1,000 bis 0,100 anzugeben.

Hundertstufige absolute Helligkeitsreihe.

Weiß = 1000							
00	1000						
01	977,2	26	549,5	51	309,0	76	173,8
02	955,0	27	537,0	52	302,0	77	169,8
03	933,3	28	524,8	53	295,1	78	166,0
04	912,0	29	512,9	54	288,4	79	162,2
05	891,3	30	501,2	55	281,8	80	158,5
06	871,0	31	498,8	56	275,4	81	154,9
07	851,1	32	478,6	57	269,2	82	151,4
08	832,8	33	467,7	58	263,0	83	147,9
09	812,8	34	457,1	59	257,0	84	144,5
10	794,3	35	446,7	60	251,2	85	141,3
11	776,2	36	436,5	61	245,5	86	138,0
12	758,6	37	426,6	62	239,9	87	134,9
13	741,3	38	416,9	63	234,4	88	131,8
14	724,4	39	407,4	64	229,1	89	128,8
15	707,9	40	398,1	65	223,9	90	125,9
16	692,8	41	389,0	66	218,8	91	123,0
17	676,1	42	380,2	67	213,8	92	120,2
18	660,7	43	371,5	68	208,9	93	117,5
19	645,7	44	363,1	69	204,2	94	114,8
20	631,0	45	354,8	70	199,5	95	112,2
21	616,6	46	346,7	71	195,0	96	109,6
22	602,6	47	338,8	72	190,5	97	107,2
23	588,8	48	331,1	73	186,2	98	104,7
24	575,4	49	323,6	74	182,0	99	102,3
25	562,3	50	316,2	75	177,8	100	100,0

Schließlich ist noch die *Bezifferung* oder *Bezeichnung* der so erhaltenen absoluten Stufen zu erörtern. Diese Bezeichnung muß eindeutig und dabei so sparsam wie möglich sein. Da das Ma-

terial dekadisch aufgebaut ist, so geht daraus mit Notwendigkeit hervor, daß als Hilfsmittel für die Bezeichnung gleichfalls nur die Ziffern dienen können. Nun haben wir hier zwei Reihen von Werten, nämlich die der Helligkeit oder Remission, deren gegenwärtig mit Pigmenten realisierbares Gebiet von 1 bis etwa 0,014 deren Werte die Maßzahlen der entsprechenden Helligkeitsempfindung sind, und wir haben zweitens die Logarithmen der Helligkeiten oder die Exponenten der geometrischen Reihe, welche theoretisch von 0 bis $-\infty$, praktisch dagegen nur von 0 bis in die Nähe von -2 gehen. Demgemäß wäre die erste Hälfte der Reihe bis zur Remission 0,1 mit den Zahlen 0,0, $-0,1$; $-0,2$; ... $-1,0$ zu beziffern und die zweite Hälfte mit $-1,1$; $-1,2$; ... bis etwa $-1,8$ und $-1,9$, wo die praktische Verwirklichungsmöglichkeit aufhört. Die Zahlen der ersten Reihe stellen die Stufen der physikalischen Lichtstärken dar, die der zweiten die der Empfindungen. Gemäß den Grundsätzen, welche dieser Arbeit zugrunde liegen, hat die zweite Reihe durchaus maßgebende Bedeutung, und sollte daher vorwiegend zum Ausdruck gebracht werden. Dies kann in der Bezifferung bewerkstelligt werden, und demgemäß entscheiden wir uns für die zweite Möglichkeit.

Was die Form dieses Ausdruckes anlangt, so kann man diese erheblich vereinfachen. Zunächst wollen wir das Abkommen treffen, daß, da sämtliche Logarithmen das negative Zeichen haben und da sie ferner sämtlich das Komma nach der ersten Ziffer haben, diese beiden konstanten Zeichen fortzulassen sind und daher die Bezifferung in der Form 00, 01, 02 bis 10, 11 usw. durchzuführen ist. Dies gilt für die gröbere Zehntelteilung, die feinere Hundertstelteilung würde in ganz entsprechender Weise 000, 001, 002 bis etwa 180 erhalten.

Zweifellos ist dieses die rationellste Bezeichnungsweise; und könnte man sich von vornherein bei ihr beruhigen. Sie hat nur den Nachteil (wenn es einer ist), daß sie wegen des negativen Zeichens wachsende Ziffernwerte für abnehmende Helligkeiten hat. Aber man braucht sich nur zu vergegenwärtigen, daß die Ziffern die Logarithmen der Werte der *Absorption* angeben, d. h. derjenigen Lichtmengen, welche von der Pigmentschicht verschluckt werden, oder anders ausgedrückt, sich vorzustellen, daß die Ziffern die *Schwärze* und nicht die Weiße der bezifferten Oberflächen kennzeichnen, um über diese Unebenheit hinwegzukommen. Nummern

welche im gleichen Sinne wie die Helligkeit sich ändern, würden erhalten werden, wenn man die gewöhnliche Technik beobachtete, keine negativen Logarithmenmantissen zu schreiben, sondern die dekadische Ergänzung derselben unter Zufügung von -1 bzw. -2 usw. Dann würde Weiß die Bezeichnung $1,0$ haben, und die Zehnerstufen der ersten Skalenhälfte würden mit $0,9$; $0,8$; $0,7 \dots 0,1$ beziffert werden, wobei überall -1 dazu gedacht wird. Die dekadischen Werte der zweiten Hälfte würden wiederum die Werte $0,9 \dots 0,0$ erhalten mit der Ergänzung -2 . Bei der Hunderter- bzw. Tausenderteilung würde nur die Zahl der Ziffern zu vermehren sein und im übrigen das Prinzip unverändert bleiben. Auch hier könnte man konventionelle Abkürzungen vornehmen, z. B. indem die Bezifferung mit 2 bzw. 20 , 200 oder 2000 beginnt und bis 1 herabführt. Wie bereits angegeben, ist es nicht wahrscheinlich, daß dieser Punkt 1 mit Pigmenten in absehbarer Zeit erreicht wird. Indessen ist bei dieser Bezifferung doch eine *willkürliche* Annahme gemacht, nämlich daß man mit Zwei beginnt, während die erst beschriebene Numerierungsmethode von solchen willkürlichen Annahmen ganz frei ist. Sie verdient also grundsätzlich den Vorzug.

Viertes Stück.

Gesättigte Farben.

66. Farbe und Wellenlänge. Eine Haupttatsache der physikalischen Farbenlehre ist, daß die Mannigfaltigkeit der Farbeempfindung maßgebend durch die Wellenlänge oder Schwingungszahl des Lichtes bestimmt wird. Das Verhältnis zwischen beiden Werten ist indessen ein sehr verwickeltes. Während die Wellenlängen derjenigen Arten der Strahlung, welche vom Auge empfunden werden, eine einseitig wachsende Reihe bilden, die sich zwischen äußersten Werten von rund 400 und 700 Millionstel Millimeter abstuft, zeigen die bunten Farbeempfindungen keineswegs ein ähnliches einseitiges Steigen, wie es z. B. auf unbuntem Gebiete zwischen Schwarz und Weiß vorhanden ist. Die Gesamtheit aller bunten Empfindungen bildet eine *in sich zurücklaufende Reihe*. Diese hat demgemäß weder ein kleinstes noch ein größtes Glied und in ihr sind die beiden entgegengesetzten Richtungen zwar voneinander unterscheidbar, sie haben aber nicht einen einsinnigen Charakter, wie beispielsweise die Beziehung heller > dunkler. Ferner besteht noch die grundlegende Tatsache, daß zwar jeder bestimmten Schwingungszahl (und jeder Kombination solcher) ein bestimmter Farbton eindeutig zugeordnet ist, daß aber umgekehrt aus einer bestimmten Farbeempfindung nicht eindeutig auf das Vorhandensein einer bestimmten Schwingungszahl (oder einer bestimmten Gruppe von Schwingungszahlen) geschlossen werden kann. Vielmehr gibt es eine unbegrenzt große Zahl physikalisch unterscheidbarer Arten Licht, welche durchaus dieselbe Farbeempfindung hervorrufen und durch das Auge auf keine Weise unterschieden werden können. Während also den Schwingungen die Farbeempfindung eindeutig zugeordnet ist, ist umgekehrt die Beziehung von den Farbeempfindungen zu den Schwingungszahlen vieldeutig und zwar unendlich vieldeutig.

67. Farben und Töne. Diese Tatsachen müssen in erster Linie hervorgehoben werden, wenn man sich der Aufklärung über die Beziehungen zwischen den Schwingungsarten des Lichtes und den entsprechenden Farbempfindungen widmen will. Der Umstand, daß die Vieldeutigkeit der einen Beziehung übersehen worden ist, hat Veranlassung dazu gegeben, daß man in irgendwelchen Gesetzmäßigkeiten der Schwingungszahlen die Ursache oder wenigstens den Typus für die Gesetzmäßigkeiten der Farbempfindung gesucht hat. Gegenüber dem in dieser Beziehung vollständig abweichenden Verhalten der Gehörsempfindungen, wo jedem Ton und Klang eine ganz bestimmte Art der Schwingung zugeordnet ist (wird doch sogar die von Einzelforschern noch angenommene Unabhängigkeit des Klanges von der gegenseitigen Verschiebung der Teiltöne andererseits bestritten), besteht bei den Farben gar kein Zweifel, daß unendlich viele Arten von Lichtschwingungen gleiche Farbempfindungen hervorrufen können und daß diese Gleichheit sich auch in gemeinsamen Wirkungen dieser Farben fortsetzt. Es ist deshalb vollkommen hoffnungslos, zwei grundsätzlich so weit verschiedene Erscheinungskomplexe wie das Gebiet der Töne und das der Farben durch gegenseitige Analogien wechselseitig klären zu wollen. Deshalb sollen gleich eingangs derartige Versuche mit aller Bestimmtheit zurückgewiesen werden, wie denn auch die geschichtliche Entwicklung bewiesen hat, daß auf diesem Wege zwar eine Menge Literatur entstanden ist, aber kein sachlicher Fortschritt der Farbenlehre bewirkt werden konnte. Man wird im Gegenteil behaupten dürfen, daß das Suchen nach solchen Analogien eine überaus weitgehende Energievergeudung bewirkt hat und daß, wenn es niemals jemandem eingefallen wäre, solche Gedanken zu verfolgen, unsere gegenwärtige Kenntnis der Farbenlehre sich erheblich besser entwickelt hätte.

68. Weißes Licht. Die fundamentale Tatsache, welche uns zuerst entgegentritt ist die, daß ein Gemenge von allen möglichen Schwingungsarten, welche auf das Auge wirken, in bestimmtem Verhältnis einheitlich als *weißes* Licht empfunden wird, welches die Grundempfindung alles Sehens darstellt. Wir haben guten Grund zu der Annahme, daß entwicklungsgeschichtlich dem gegenwärtigen farbigen Sehen der Menschen ein Zustand vorangegangen ist, in welchem nur Intensitätsunterschiede der strahlenden Energie wahrgenommen wurden, etwa in derselben Art, wie das Bolometer

Intensitätsunterschieden der strahlenden Energie Größenunterschiede des Galvanometerausschlages zuordnet. Das menschliche Auge besitzt noch gegenwärtig in seinem Stäbchenapparat ein Organ, dessen Wirkungsweise jener primitiven Form entspricht, die anatomisch bei weniger entwickelten Lebewesen vorwiegend oder ausschließlich vorhanden ist. Die gegenwärtige Ausbildung des farbigen Sehens beim menschlichen Auge stellt demgemäß das Anfangs- oder Mittelstadium eines Entwicklungsvorganges dar, welcher voraussichtlich zu dem vollständigen Vorwiegen des farbigen Sehens unter gleichzeitiger Zurückdrängung der primitiveren Form des Stäbchensehens enden wird. Hier liegt auch vielleicht die Erklärung dafür, daß das Weiß, welches physisch ein Gemisch der Gesamtheit der wirksamen Strahlen ist, von uns durchaus als eine einheitliche Farbe, dieses Wort im allgemeinen Sinne angenommen, empfunden wird und keineswegs als ein Gemenge aller bunten Farben, welche den in diesem Weiß vertretenen Lichtwellen entsprechen. Ist es ja doch ohnedies noch eine der Diskussion unterworfenene Frage, ob die Lichtwellen, in welche man durch prismatische oder Interferenzzerlegung das weiße Licht sondern kann, als solche in der Gesamtstrahlung ursprünglich vorhanden oder nur ein Produkt des Ordnungsvorganges sind, den die physikalische Beeinflussung an ihr bewerkstelligt hat.

Daß das *Sonnenlicht* die Grundempfindung des gesamten Sehens betätigt, ist wiederum biologisch unmittelbar verständlich. Einerseits aus der Entwicklungsgeschichte des Auges und andererseits auf Grund des Umstandes, daß bis auf den heutigen Tag bei weitem das meiste Sehen unter dem Einfluß und mit Hilfe des Sonnenlichtes erfolgt. Es liegt also nicht nur eine durch unnennbar lange Zeiten bewirkte Anpassung des menschlichen Auges an das Sonnenlicht vor, welche durch Vererbung während ungezählter Generationen befestigt worden ist, sondern die ganz vorwiegende Betätigung des Organes unter dem Einfluß des Sonnenlichts bedingt beständig eine Zurückdrängung aller möglichen Variationen, welche dahin wirken sollten, diesen biologischen Schwerpunkt irgendwie zu verändern.

Somit muß das weiße Sonnenlicht als eine Norm für die gesamte Farbenlehre betrachtet und behandelt werden und alle einzelnen Erscheinungen sind in letzter Instanz auf das Sonnenlicht zu reduzieren, soweit sie überhaupt von der Natur der Beleuchtung sich abhängig erweisen.

69. Veränderlichkeit des Sonnenlichtes. Allerdings muß hier einschränkend alsbald betont werden, daß das Sonnenlicht keineswegs unveränderlich ist. Die photographischen Erscheinungen, welche hauptsächlich durch eine besondere Strahlengruppe im Sonnenlicht bewirkt werden, haben längst zur Erkenntnis geführt, daß nicht die Intensität dieses Teils der Sonnenstrahlung beständig im Laufe des Tages und Jahres wechselt, sondern daß auch das Verhältnis zwischen dem Anteil solcher Wellen und dem Gesamtlicht einer gleichen unaufhörlichen Veränderung unterliegt. Jeder praktische Photograph weiß, daß er es bei scheinbar gleichheller Beleuchtung in den Morgenstunden mit einem viel wirksameren Licht zu tun hat, als in den symmetrisch gelegenen Nachmittags- oder Abendstunden. Ebenso ist die Intensität der photographisch wirksamen Strahlen bei wechselnder geographischer Breite keineswegs der Veränderung des Gesamtlichtes proportional. Ganz dasselbe gilt auch für die anderen Komponenten des Sonnenlichtes, wenn auch die Forschungen noch ausstehen, durch welche die gegenseitige Veränderlichkeit in ihren Einzelheiten festgestellt werden wird. Aber bereits die technischen Erfahrungen bei der Benutzung des Chromoskops, eines Apparates, in welchem Aufnahmen in natürlichen Farben durch die Benutzung dreier schwarz-weißer Diapositive unter Mitwirkung dreier Lichtfilter, welche zusammen weißes Licht ergeben, erzeugt werden, lassen erkennen, daß drei Filter, die unter bestimmten Umständen sich zu farblosem Licht kombinieren, zu anderen Tageszeiten und bei anderen atmosphärischen Bedingungen den einen oder den anderen Bestandteil vorwiegen lassen. Hierdurch wird die notwendige und unvermeidliche Norm des Sonnenlichtes einigermaßen schwankend und unsicher, ohne daß wir in der Lage sind, diesen Umstand auszugleichen, zumal solange wir ihn noch nicht einmal genau kennen.

70. Homogenes Licht. Durch verschiedenartige Beeinflussung, insbesondere Zerstreuung bei der Brechung und Interferenz bei verschiedenen Gangunterschieden, läßt sich das weiße Licht in eine unbegrenzte Anzahl *homogener* Lichtarten zerlegen, d. h. solcher, in denen nur eine einzige Schwingung besteht. Natürlich ist dieses wiederum eine ideale Definition, da wir weder die physikalischen Mittel einer absoluten Trennung noch die einer absoluten Unterscheidung unendlich naher Schwingungsarten besitzen. Demgemäß ist das, was wir durch solche Mittel als „homogenes“ Licht er-

zeugen, immer gekennzeichnet durch einen bestimmten Umfang an Schwingungszahl etwas verschiedener Wellen, wobei der Unterschied der kürzesten und längsten vorhandenen das Maß der *Reinheit* oder *Homogenität* der betreffenden Strahlung abgibt.

Solches *homogenes Licht sieht niemals weiß aus*, wenn man den Fall ausschließt, wo durch Steigerung der Intensität über das physiologisch gebotene Maß hinaus das Auge seinen normalen Dienst zu versagen beginnt. Innerhalb der Grenzen einer störungsfreien Funktion ist dagegen der Satz allgemein gültig, daß jede Art von homogenen Strahlen eine bestimmte nichtweiße oder *bunte* Empfindung erregt. Und zwar ist diese Empfindung, wenn das Auge sie in einem übrigens dunklen Felde erhält, die Farbe also *bezugsfrei* ist, stets die einer *reinen oder gesättigten Farbe*. Wir haben mit anderen Worten bei diesen Farbempfindungen nie den Eindruck, daß neben dem bunten Eindruck, den wir empfangen, noch ein weißer oder grauer Anteil vorhanden sei.

Die entsprechenden homogenen oder Spektralfarben gelten daher als Urtypen der reinen Farbempfindung. So gut wie alle Forschungen, die sich auf die Gesetzmäßigkeiten der farbigen Empfindungen und ihrer Mischungen beziehen, sind mit solchen homogenen Lichtarten angestellt worden. Nun ist aber zu betonen, daß wir es bei den millionenfachen Farbenerfahrungen, die wir im täglichen Leben machen, *niemals mit homogenem Licht zu tun haben*. Die Farben, welche uns von unserer näheren und ferneren Umgebung zugestrahlt werden, bestehen ohne alle Ausnahme aus zusammengesetzten Gemischen der verschiedensten Wellenlängen und die Spektralanalyse auch solcher Farben, die auf uns den Eindruck größter Reinheit oder „Sättigung“ machen, belehrt uns alsbald, daß derartiges farbiges Licht niemals auch nur annähernd das Ideal reiner Strahlung verwirklicht.

Beachten wir, daß theoretisch genommen der homogene Teil irgendwelcher Wellenlänge im weißen Sonnenlicht nur ein unendlich kleiner Bruchteil des Gesamtlichtes sein kann, so erkennen wir, daß irgend eine Oberfläche, welche nur vollkommen homogenes Licht zurückzusenden die Eigenschaft hätte, unabhängig von dessen Wellenlänge von uns nur *schwarz* gesehen werden könnte. Denn der verschwindend kleine Bruchteil des Sonnenlichtes, der von einer solchen Oberfläche in das Auge gelangen würde, könnte die Empfindlichkeitsschwelle überhaupt nicht überschreiten. Und auch ein

Körper, der homogenes Licht im physikalischen Sinne, d. h. von bestimmter Breite aussendet, (die z. B. einem Hundertstel der Gesamtbreite des idealen Spektrums entspricht), würde demgemäß durchschnittlich nur die Helligkeit 0,01 haben, d. h. schwärzer aussehen, als die schwärzesten Pigmente, über welche wir verfügen. Auch wenn wir den Umstand berücksichtigen, daß die verschiedenen Spektralgebiete eine sehr verschiedene psychologische Helligkeit haben, wird sich an dem allgemeinen Ergebnis der Betrachtung nicht viel ändern. Es würden dann nur einzelne Oberflächen, welche homogenes Licht solcher besonders helleren Gebiete zusenden, etwas heller ausschauen, die anderen dagegen noch viel dunkler.

Wir müssen deshalb vollständig davon absehen, die Erfahrungen mit homogenem Licht, auf das wir bei der Zerlegung des weißen Sonnenlichtes stoßen, als maßgebend für die Farbenerlebnisse anzusehen, aus denen unsere optischen Erfahrungen bestehen. Noch viel weniger kann von einer Anpassung unseres Sehapparates an die Wirkungsweise homogener Strahlen die Rede sein. Deren Betrachtung hat somit grundsätzlich zurückzutreten, ja auszuschneiden, solange es sich um Farben im psychologischen Sinne handelt. Dadurch soll der maßgebende Wert der Definition verschiedener Lichtarten durch die zugehörigen Schwingungszahlen und Wellenlängen nicht in Abrede gestellt werden. Aber es muß mit der allergrößten Bestimmtheit betont werden, daß dieser Wert nur ein physikalischer und analytischer ist und daß von den Eigenschaften und Erscheinungsweisen des homogenen Lichtes durchaus keine *unmittelbare* Anwendung auf die Beurteilung der allgemeinen Farbenerlebnisse gemacht werden darf.

71. Der Farbenkreis. Es ist bereits bemerkt worden, daß die Gesamtheit aller Farben, nicht nur der im Spektrum erscheinenden, sondern insbesondere auch der Körperfarben, wie sie uns überall in der Natur entgegentreten, sich bezüglich des Farbtones in eine Reihe ohne Anfang und Ende ordnen läßt, welche in bestimmter Weise fortschreitend immer wieder auf sich selbst zurückführt. Hierbei muß allerdings sofort zugefügt werden, daß die Reihe insofern nicht linear ist, als es für jeden Punkt derselben eine mehrfache Unendlichkeit von Farben gibt, die verschieden aussehen und dennoch sowohl dem unmittelbaren Urteil gemäß, wie auch auf Grund einer alsbald zu besprechenden eindeutigen Kennzeichnung (Gleichheit der Gegenfarbe) an denselben Punkt der

Farbenreihe gehören. Es sind dies alle Farben, welche aus der reinsten Art der gleichnamigen Farbe durch Zumischung von unbunten Anteilen, also Weiß, Schwarz oder Grau, erzeugt werden können. Jeder Ort im Farbkreise wird somit nicht von einer einzelnen individuellen Farbe eingenommen, sondern dahin gehört jedesmal ein ganzes Geschlecht von Farben, die in bezug auf gewisse Eigenschaften (als welche *Reinheit* und *Grau* sich hernach herausstellen werden), verschieden sein können, während sie in bezug auf eine, hier im Vordergrund stehende Eigenschaft übereinstimmen, welche wir nach HELMHOLTZ den *Farbton* nennen wollen. Also nur insofern wir die Farben ausschließlich in bezug auf ihren Farbton ins Auge fassen, können wir sie in die besagte lineare, in sich selbst zurücklaufende Reihe ordnen.

Diese Ordnung ist im übrigen völlig eindeutig und stetig. Demzufolge lassen sich zu jeder gegebenen Farbe aus den vorhandenen zwei andere angeben, welche ihr am ähnlichsten sind, während sie untereinander mehr verschieden sind, als jede von ihnen von der Ausgangsfarbe. So läßt sich beispielsweise zu einem reinen Zitronen- oder Schwefelgelb einerseits ein ähnlichstes Gelb ordnen, welches *grünlich* ist und andererseits wiederum ein ähnlichstes, welches *rötlich* ist. Beide sind voneinander mehr verschieden, als vom dazwischenliegenden reinen Gelb.

Die Farben sind demgemäß um so weniger einander ähnlich, je weiter sie in der Reihe auseinander liegen. Denn an der grüngelben Seite lassen sich nur solche andere Farbtöne anschließen, die noch mehr ins Grüne ziehen, während die rotgelbe Seite sich nur im Sinne einer stärkeren Röte fortsetzen läßt. In gleichem Sinne läßt sich beiderseits die Reihe verlängern, bis die beiden Enden schließlich irgendwo zusammentreffen. Wo sie aber auch zusammentreffen mögen, ist immer ein stetiger Übergang, wie er soeben für das Gelb geschildert worden ist, möglich, und somit vorhanden. Daraus folgt, daß die Verschiedenheit beim Fortschreiten in der Reihe ein *Maximum* erreichen und von dort wieder abnehmen muß, da jedes Fortschreiten wegen der Geschlossenheit der Reihe notwendig auf den Ausgangspunkt zurückführt.

Gemäß diesen fundamentalen Eigenschaften der Farbtonreihe kann man die einzelnen Farben den Punkten irgend einer in sich zurücklaufenden oder geschlossenen Kurve zuordnen, wobei es noch vollkommen willkürlich bleibt, wie dicht man einerseits die Punkte

der Farbtonreihe und andererseits die der zugeordneten Kurve wählt. Da es auf die geometrische Natur der letzteren nicht ankommt, so soll vorläufig der *Kreis* als die einfachste in sich geschlossene Linie zum Typus für die Ordnung der Farbtonreihe gewählt werden. Es sei aber ausdrücklich betont, daß andere geometrische Eigenschaften des Kreises, als daß die Linie in sich selbst zurückläuft, zunächst nicht zu irgend welchen Schlüssen bezüglich der Farbtonreihe benutzt werden dürfen.

72. Die Stetigkeit der Farbtonreihe. Mit der Kreislinie teilt ferner die Farbtonreihe die Eigenschaft der *Stetigkeit*. Stetigkeit im physikalischen Sinne bedeutet, daß es stets experimentell möglich ist, zwischen zwei nahe aneinander liegende, aber unterscheidbare Punkte der fraglichen Funktion so viele Zwischenpunkte einzuschalten, daß die Abstände zwischen ihnen unter das Maß fallen, bei welchem noch eine Möglichkeit für den Nachweis ihrer Verschiedenheit vorhanden ist. Somit ist die Stetigkeit im physikalischen Sinne ein relativer Begriff, der unmittelbar abhängig ist von dem *Meßhilfsmittel*, durch welche die in Frage kommende Verschiedenheit festgestellt und zahlenmäßig ausgedrückt wird.

Um zu zeigen, daß es sich hier nicht um eine bloße Spitzfindigkeit handelt, sei daran erinnert, daß bis vor relativ kurzer Zeit die ponderablen Stoffe nur in bezug auf ihre *stetigen* Eigenschaften bekannt waren und infolgedessen ohne Nachteil für die Wissenschaft als stetig angesehen und behandelt werden konnten. Erst Forschungen der jüngsten Zeit haben Unstetigkeiten der Raumerfüllung und anderer Eigenschaften nachgewiesen und erst damit wurde für die Existenz der längst hypothetisch angenommenen Atome und Molekeln die erfahrungsmäßige Unterlage geliefert. Während also bis zum letzten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts die wägbaren Stoffe im Sinne der eben aufgestellten Definition sich als stetige Gebilde erwiesen hatten, sind sie gegenwärtig zwar als immer noch stetig für die meisten experimentellen Betätigungen zu behandeln, es gibt aber neben diesen stetigen Beziehungen auch eine Anzahl beständig an Mannigfaltigkeit und wohl auch an Wichtigkeit zunehmender Beziehungen, in denen sie sich als unstetig erweisen.

Auch bezüglich der Farbtonreihe ist die Möglichkeit der Unstetigkeit begrifflich aus allgemeinwissenschaftlichen Gründen zuzugeben. Es kann aber gleichzeitig behauptet werden, daß die

experimentelle Forschung auf diesem Gebiet noch ungemein weit von dem Zustande entfernt ist, in welchem die Frage einer möglichen Unstetigkeit der Farbtonreihe experimentelle Bedeutung gewinnt. Es wird also genügen, wenn an dieser Stelle das wissenschaftliche Gewissen mit dem Hinweis auf die vorhandene Möglichkeit salviert wird, während sie für die tatsächlichen Verhältnisse, die weiterhin erörtert werden sollen, bei weitem noch nicht in Frage kommt.

73. Anzahl der Farbtöne. Als Hilfsmittel zur Unterscheidung von Farbtönen haben wir gegenwärtig nur die subjektive Beurteilung. Diese ist, wie die tägliche Erfahrung zeigt, bei verschiedenen Menschen recht verschieden und kann bei denen, welche in dieser Beziehung begabt sind, durch Übung bis zu einem das Gewöhnliche erheblich überschreitenden Grade der Feinheit gebracht werden. Durch Messungen von *König* und seinen Nachfolgern sind im Spektrum etwa 200 unterscheidbare Farbtöne gezählt worden. Abgesehen davon, daß dort eine Anzahl, etwa $\frac{1}{5}$ der im Farbenkreise vertretenen Farbtöne fehlen, darf wohl gesagt werden, daß diese Zahl vermutlich ein sachgemäßer Ausdruck für die fragliche psychologische Eigenschaft ist. Denn die Farbtöne der Spektralfarben sind als bezugsfreie Farben um einen Grad weniger mannigfaltig als die bezogenen Körperfarben. Da außerdem die verglichenen Spektralfarben im Zustande der Reinheit und Sättigung und bei einer Intensität, wo weder Blendung noch Dämmersehen störte, untersucht worden sind, so lagen tatsächlich die Bedingungen vor, unter denen die Unterschiedsempfindlichkeit für Farbtöne sich am ungestörtesten betätigen konnte. Wir werden demgemäß rund 240 als die durchschnittliche Zahl der unterscheidbaren Farbtöne ansehen, vielleicht 300 als das Maximum betrachten dürfen, bis zu dem das Auge eines begabten und geschulten Beobachters unter günstigsten Umständen ansteigen kann.

Daher werden wir praktisch 100 Stufen im Farbenkreise als eine Einteilung ansehen dürfen, durch welche die Unterschiedschwelle überall zweifellos und deutlich überschritten wird, da zwischen je zwei solche Stufen, wenn sie einigermaßen gleichförmig verteilt sind, je nach den oben gekennzeichneten Bedingungen noch einige Zwischenglieder eingeschaltet werden können.

74. Grad der erreichten Ordnung. Für unsere ferneren Betrachtungen denken wir uns demgemäß die Gesamtheit aller Farb-

töne in der beschriebenen Weise auf einem Kreise geordnet. Hierbei sind noch keinerlei Beziehungen ausgesprochen worden, durch welche bestimmten Bogenlängen im Kreise bestimmte Punkte des Farbkreises zugeordnet werden sollen. Vielmehr ist ein Auseinanderrecken oder Zusammendrängen der Farbtonpunkte auf dem Kreise je nach den weiterhin festzustellenden Grundsätzen in unbegrenzter Weise möglich. Dasjenige, was bei solchen Änderungen aber völlig unverändert bleiben muß, ist die Reihenfolge der einzelnen Farbtöne. Dieser erste Zustand der Zuordnung zwischen den Farbtönen und den Kreispunkten läßt sich somit vergleichen mit dem einer Reihe von Perlen auf einer zusammengeknüpften Schnur, welche diese keineswegs geschlossen bedecken. Sie können demgemäß längs der Schnur beliebig hin und her geschoben werden, und an verschiedenen Stellen verschieden eng zusammensitzen. Aber diese Freiheiten ermöglichen niemals, daß die *Reihenfolge* der Perlen eine Veränderung erfährt.

75. Der Anfangspunkt. Obwohl in einer in sich geschlossenen Reihe von einem natürlichen Anfangspunkt nicht die Rede sein kann, verlangt doch unsere wohlbegründete Gewohnheit, auch die Glieder solcher Reihen der nicht geschlossenen, einsinnig verlaufenden *Zahlenreihe* zuzuordnen, erstens die Wahl irgendeines *Anfangpunktes* und zweitens die Wahl eines *Fortschrittsinnes*. Beide Bestimmungen sind *willkürlich*, d. h. man kann nur mehr oder weniger starke Zweckmäßigkeitsgründe für die eine oder andere geltend machen, nicht aber eine eindeutige, aus der Natur der Sache in unwiderlegbarer Weise folgende Bestimmung treffen.

Als *Nullpunkt* für die Bezifferung der Farbtonreihe schlage ich das *reine Gelb* vor. Es ist dieses erstens der *hellste* Farbton im Kreise. Man nennt ihn im gewöhnlichen Leben Zitronen- oder Schwefelgelb und er stellt das Gelb dar, das eben im Begriff ist, ins Grünliche umzuschlagen, ohne es noch zu tun. Ein solches Gelb enthält keine Spur von Rot, ebenso wie das Auge kein Grün darin erkennen kann. Da keine andere Farbe beim Übergang zu den unmittelbar daneben liegenden Nachbarn nach beiden Seiten sich so schnell ändert, wie dieses Gelb, so ist dieses ein zweiter Zweckmäßigkeitsgrund, diese derart am besten definierte Farbe des Farbkreises als Ausgangspunkt der Zählung anzunehmen. Hierzu kommt drittens, daß sich eine Anzahl von chemisch wohldefinierten Substanzen angeben läßt, durch welche man dieses Gelb

verwirklichen kann. Es wurde schon an anderer Stelle betont, daß die *Pikrate*, ferner das pulverförmige *Strontiumchromat* und endlich das *Naphtanthrachinon* oder *Siriusgelb* der Farbwerke Ludwigshafen sämtlich dieses gleiche reine Gelb aufweisen. Daher ist es leicht möglich, den fraglichen Punkt experimentell herzustellen, ohne daß hierzu eine materielle Tradition in Gestalt der Aufbewahrung eines individuellen Objektes erforderlich ist.

Es sei noch hinzugefügt, daß die Lösungen der normalen Chromate das gleiche reine Gelb aufweisen, so daß überreichlich dafür gesorgt ist, diesen Farbton experimentell zu definieren. Sache späterer Forschung wird es sein, nachdem die Hilfsmittel, einen bestimmten Farbton von seinen unmittelbaren Nachbarn zu unterscheiden, sich weiter entwickelt haben werden, unter den genannten Repräsentanten denjenigen auszuwählen, welcher am genauesten der Definition entspricht, daß der fragliche Farbton die Grenze zwischen dem grünlich und dem rötlich getönten Gelb zu bilden hat.

76. Der Drehungssinn. Eine zweite willkürliche Entscheidung ist in bezug auf den *Sinn* zu treffen, in welchem die Farben im Farbkreise den positiv wachsenden Zahlen zugeordnet werden sollen. Wir haben mit anderen Worten zu entscheiden, ob wir von dem eben definierten reinen Gelb nach der grünlichen oder nach der rötlichen Seite fortschreiten wollen. Die Gründe, die mich zur Entscheidung im zweiten Sinne gebracht haben, können an dieser Stelle noch nicht mit dem ihnen zukommenden Gewicht dargelegt werden. Es sei deshalb nur angedeutet, daß bei dieser Wahl der *mannigfaltigere* Teil des Farbkreises, nämlich die Farben Orange, Rot, Violett, das *zunächst* betretene Gebiet bilden, während für den zweiten Teil des Umfanges das viel monotonere Gebiet der blauen und grünen Farben vorbehalten bleibt. Ferner wachsen die Zahlen mit zunehmenden Wellenlängen.

77. Willkürliche Bestimmungen. In beiden Fällen folgt aus dem Umstande, daß es sich um eine willkürliche Wahl handelt, unmittelbar, daß von dieser Wahl nicht viel abhängt, da eben wenn letzteres der Fall wäre, eine Willkür dadurch ausgeschlossen sein würde. Es ergeht deshalb an alle Fachgenossen die Bitte, hier das „Recht des Zuerstgekommenen“ zu achten. Ebenso kommt es nicht viel darauf an, welchen lateinischen Namen man einer neugefundenen Spezies im Pflanzen- oder Tierreich erteilt. Deshalb gilt das allgemeine Prinzip, daß der Entdecker auch das Recht

der Namengebung hat. So sollte in solchen Fällen, wie der hier vorliegende, wo ein bisher unberücksichtigt gebliebenes Bedürfnis zuerst ausgesprochen und erfüllt wird, der *freie* oder willkürliche Anteil in der Form dieser Erfüllung weiterhin der Diskussion entzogen bleiben. Indem also von vornherein zugegeben wird, daß sich für irgendwelche andere willkürliche Entscheidung dieser prinzipiell nicht entscheidbaren Angelegenheit gleichfalls Gründe werden angeben lassen, darf doch die Erwartung ausgedrückt werden, daß solange keine Gesichtspunkte entdeckt werden, welche in *eindeutiger* und willkürfreier Weise die Angelegenheit entscheiden, es bei dieser erstmaligen und nach der gegenwärtigen Sachlage bestbegründeten Wahl sein Bewenden haben wird.

78. Farbenmischung. Durch Vermischung von zwei und mehr Farben verschiedenen Farbtons erlangt man immer nur Farbtöne des Farbkreises und keine anderen. Dieses geht unmittelbar aus dem Umstande hervor, daß der Farbkreis sämtliche überhaupt beobachtbaren Farben dem Tone nach enthält und somit auch die Farben enthalten muß, welche durch Vermischung anderer entstehen.

Ferner besteht folgendes Verhältnis zwischen den Bestandteilen eines Farbgemisches und der Farbe dieses. Entfernt man sich im Farbkreise von irgendeiner Farbe *A* zunächst etwas nach einer zweiten Farbe *B*, so sind die Farben sämtlicher Gemische, die aus *A* und *B* hergestellt werden können, in dem zwischen beiden liegenden Teil des Farbkreises belegen. Der Ort der Mischfarbe zwischen diesen Grenzen hängt von den Mengenverhältnissen der beiden Farben *A* und *B* ab und kann sämtliche Punkte des Farbkreises zwischen *A* und *B* treffen, da durch passende Änderung des Mengenverhältnisses jeder mögliche Farbton zwischen *A* und *B* hergestellt werden kann.

Dieses gilt indessen nicht unbegrenzt. Da wegen der geschlossenen Beschaffenheit der Farbtonreihe eine zunehmende Entfernung des Punktes *B* von *A* nicht beständig einen *zunehmenden* Unterschied zwischen beiden Farben bedeutet, sondern *B* bei weiterem Fortschreiten im gleichen Sinne zuletzt wieder nach *A* zurückgelangt, so würde folgender Widerspruch bestehen, wenn das eben ausgesprochene Gesetz, daß der Farbton aller Gemische aus *A* und *B* zwischen *A* und *B* liegen müsse, unbegrenzte Geltung hätte. Es würde dann zuletzt, wenn sich *B* unter stetigem Fortschreiten in

gleichem Sinne dem A wieder nähert, der Mischton nicht auf der Seite liegen, nach welcher A und B sich näher stehen und ähnlicher sehen, sondern nach der entgegengesetzten Seite, was jenem Grundgesetz der Farbenmischung widerspricht. Gehen wir beispielsweise von unserem Nullpunkt Gelb im roten Sinne fort, so werden alle Mischungen aus Gelb und Rot zwischen beiden im Gebiet des Gelbroten liegen. Aus Gelb und Purpur wird man weiterhin sämtliche Arten des Gelbrot und Hochrot bis zum Purpur herstellen können, aus Mischungen von Gelb mit Violett die genannten Farben mit Einschluß des Purpur und Violett. Aus Mischungen von Gelb mit Blau müßte man die genannten Farben und Blau und aus Mischungen von Gelb und Grün endlich Rot, Purpur, Violett, Blau und Blaugrün herstellen können. Zuletzt müßte Gelb und ein ganz nahe liegendes Gelbgrün das Material hergeben können, um überhaupt den ganzen Farbkreis herzustellen, was gegen alle Erfahrung ist.

Vielmehr liegt die Sache von der anderen Seite ebenso. Beim Fortschreiten von Gelb nach Gelbgrün können zunächst alle zwischen diesen beiden liegenden Farbtöne hergestellt werden, aus Gelb und Grün und schließlich Gelb und Blau sind die dazwischenliegenden Farbtöne mischbar, aber ein weiteres Fortschreiten auf dem Farbkreise läßt ebenso wenig die dazwischenliegenden Farbtöne ermischen, wie das bei der ersten Betrachtung möglich war.

Es muß also beim Fortschreiten in einem oder dem anderen Sinne zuletzt ein Farbton erreicht werden, der die Möglichkeit des Ermischens der auf der einen Seite des Farbkreises liegenden Farbtöne ebenso abschließt, wie die der auf der anderen Seite liegenden. Eine solche Farbe kann, um das Beispiel beizubehalten, mit Gelb weder Orange, Rot und Purpur noch auch Gelbgrün, Grün und Blaugrün geben. Da nun die genannten Farben den ganzen Farbkreis erschöpfen, so bleibt für diesen besonderen Farbton die einzige Möglichkeit übrig, daß der mit Gelb überhaupt keine bunte, sondern eine unbunte d. h. graue Farbe ergibt.

Tatsächlich gibt es eine solche dem Gelb zugeordnete Farbe, nämlich Ultramarinblau. Wir nennen sie dessen *Ergänzungs- oder Gegenfarbe*.

79. Gegenfarben. Da die angestellten Betrachtungen offenbar für jeden beliebigen Farbton in gleichem Sinne wiederholt werden können, so geht daraus hervor, daß sämtliche Farbtöne des Farbkreises sich dergestalt paarweise oder polar einander zu-

ordnen. Zu jedem Farbton gehört ein anderer von ihm maximal verschiedener, der mit ihm gemischt unbuntes Licht ergibt. Es ist gleichzeitig derjenige Farbton, welcher im ganzen Farbkreise die größte Verschiedenheit von der Ausgangsfarbe aufweist. Dieser Umstand rechtfertigt den Namen *Gegenfarbe*, während die Bezeichnung *Ergänzungsfarbe* daher rührt, daß ein solches Farbenpaar beim Vermischen unbuntes Licht ergibt, sich also zu Weiß ergänzt. Letzteres findet indessen nur bei einem bestimmten Verhältnis der Bestandteile statt, während die maximale Verschiedenheit eine rein qualitative Beziehung darstellt.

80. Das Stetigkeitsgesetz der Mischung. Daß dieser Übergang notwendig durch ein unbuntes Gemisch führen muß, in dem kein bestimmter Farbton mehr vorhanden ist, geht daraus hervor, daß jede andere Annahme einen plötzlichen Sprung bei dem Passieren der Gegenfarbe zufolge haben würde. Ein solcher Sprung wird aber niemals beobachtet, so daß man grundsätzlich das allgemeine Gesetz für alle Farbenmischungen nach GRASSMANN'S Vorgänge aussprechen kann; *jede stetige Änderung in der Beschaffenheit der zusammensetzenden Farben hat auch eine stetige Änderung in dem Aussehen des entstehenden Produktes zur Folge.* Nun bleibt, wenn wir Mischungen aus gleichen Teilen betrachten, die Farbe des Mischproduktes stets ungefähr um die Hälfte der Entfernung zwischen *B* und *A* hinter *B* zurück. Das gilt, wenn man von der einen Seite vorschreitet und ebenso für die andere Seite. Das Vorschreiten bis zur Mitte des Farbkreises würde also beiderseits die Mischfarben nur halb so weit fördern. Es würde also zwischen dem letzten Gemisch, das man beim Vorschreiten in einem Sinne erhält und dem letzten Gemisch beim Vorschreiten im anderem Sinne rund die Hälfte des Farbkreises als Sprung übrig bleiben, während doch das Durchschreiten der entferntesten Farbe vollständig stetig geschieht. Man sieht also (wie das zuerst von GRASSMANN¹) dargelegt worden ist), daß die Existenz der Gegenfarben oder Ergänzungsfarben eine notwendige Folge jenes Stetigkeitsgesetzes und des Gesetzes und der in sich zurücklaufenden Beschaffenheit der Farbenreihe ist. Hätte die Farbtonreihe, wie die Reihe der spektralen Wellenlängen einen kleinsten und einen größten Wert, zwischen den ein unmittelbarer Zusammenhang nicht besteht, so würde die ganze vorher angestellte Betrachtung unmöglich sein.

1) Pogg. Ann. 89, 69. 1853.

81. Additive Mischung. Bei den eben angestellten Betrachtungen ist der Ausdruck „Mischung der Farben“ benutzt worden, ohne daß er definiert worden ist. Diese Definition soll hiermit nachgeholt werden, wobei betont werden mag, daß die bisher angestellten Betrachtungen gleicherweise für die verschiedenen Arten der Mischung gültig sind, auf die wir alsbald gelangen werden, daß deshalb auch methodisch die Festlegung der Definition bis jetzt nicht erforderlich war.

Wir unterscheiden seit HELMHOLTZ zwischen additiver und subtraktiver Mischung. Unter additiver Mischung, die zunächst allein in Betracht kommt, verstehen wir die Mischung zweier Farben derart, daß sämtliche Lichtarten, welche der einen Farbe zugehören, nebst sämtlichen Lichtarten, die der anderen zugehören, *gleichzeitig* auf das Auge wirken und den entsprechenden Farbeindruck erzeugen. Eine solche additive Mischung entsteht beispielsweise, wenn man aus zwei Projektionsapparaten, in welche man farbige Gläser gebracht hat, die entsprechend gefärbten Gesichtsfelder übereinander auf einen weißen Schirm fallen läßt. Ebenso, wenn man beliebige Teile von zwei und mehreren Spektren gleichzeitig in das Auge gelangen oder sich auf einem diffus reflektierenden weißen Schirme mischen läßt. Allgemein bedingt jedes beliebige optische Hilfsmittel, welches die aus den zu mischenden Gebieten stammenden Lichtstrahlen gleichzeitig in das Auge leitet, eine derartige additive Mischung.

Damit sind aber die Möglichkeiten der additiven Mischung noch nicht erschöpft. Das Auge bewahrt empfangene Lichteindrücke während einer gewissen kurzen Zeit, so daß es zeitlich unterbrochene Lichteindrücke als stetige empfindet, wenn die Unterbrechungen unterhalb einer bestimmten Zeitdauer liegen. Dreißig oder vierzig Lichtwechsel in der Sekunde verschmelzen zu einem stetigen Farbeindruck, dessen Beschaffenheit gemäß einem von TALBOT entdeckten und von HELMHOLTZ exakter formulierten Gesetz vollkommen mit der übereinkommt, welche dieselbe Lichtmenge bei vollständig stetiger Austeilung in der Zeit auf das Auge hervorbringen würde. Wenn wir also zwei Flächen von verschiedener Farbe mit einer Geschwindigkeit von mehr als vierzig Wechseln in der Sekunde auf das Auge wirken lassen, so empfindet dieses einen stetigen Farbeindruck, welcher der Mischung der beiden Farben nach Verhältnis der jeweiligen Einwirkungsdauer genau

entspricht. Der wohlbekannte Farbkreis ist eine Anwendung dieses Prinzipes.

Endlich gibt es noch ein Mischverfahren, welches dem eben dargelegten, auf der Schwelle der zeitlichen Unterschiedsempfindlichkeit beruhenden analog auf *räumlichen* Verschiedenheiten beruht, die unter der Schwelle bleiben. Das Auge kann nämlich Unstetigkeiten im Gesichtsfelde, deren Sehwinkel unterhalb einer Minute liegt, nicht mehr voneinander unterscheiden. Die Ursache ist wahrscheinlich, daß die nervösen Elemente der Retina, welche die Empfindung vermitteln, notwendig um endliche Distanzen voneinander entfernt sind und die eben angegebene Winkelgröße entspricht im Augenbilde der Entfernung der einzelnen Zäpfchen in der Sehgrube. Man braucht deshalb nur die zu mischenden Farben in solcher Anordnung dem Auge darzubieten, daß die einzelnen Elemente der verschiedenen Farben einen kleineren Sehwinkel als eine Minute haben, um wiederum einen stetigen Eindruck zu erzeugen, welcher genau der additiven Mischung der vorhandenen Farben entspricht.

82. Hauptgesetz der additiven Mischung. Alle diese verschiedenen Methoden der Farbmischung geben, wenn man dieselben Farben in demselben Verhältnis miteinander vereinigt, völlig übereinstimmende Resultate, so daß die additive Mischung als die begrifflich allgemeinste angesehen werden muß. Insbesondere gilt nur für die additive Mischung das von GRASSMANN aufgestellte fundamentale Gesetz, *daß gleichaussehende Farben im gleichen Verhältnis gemischt, auch gleichaussehende Mischfarben ergeben.* Dies Gesetz ist wiederholt geprüft und stets bestätigt worden. Insbesondere ist bewiesen worden (und ich selbst habe mich zum Überfluß noch in einigen besonders kritischen Fällen davon überzeugt), daß auch solche gleich aussehende Farben, welche aus *verschiedenen* Lichtarten bestehen und daher bei der optischen Zerlegung verschiedene Spektren geben, dem Gesetz folgen, während sie sich bei der subtraktiven Mischung sehr verschieden verhalten. Somit soll weiterhin, wenn das Wort Farbmischung ohne weiteren Zusatz gebraucht wird, ausschließlich die additive Mischung gemeint sein.

83. Subtraktive Mischung. Im Gegensatz zu dem völlig allgemeinen Charakter der additiven Mischung wird unter subtraktiver Mischung ein besonderer Fall verstanden, der folgendermaßen zustande kommt. Es gibt eine Anzahl Stoffe, welche auf das auffallende Licht eine selektive Absorption ausüben, d. h. welche be-

stimmte Strahlen aus diesem Licht teils vollständig vernichten, teils in einem bestimmten Verhältnis schwächen. Da diese Wirkung eine Funktion der Wellenlänge des Lichtes ist, so wird weißes Licht, welches auf solche Mittel trifft, nach dem Durchgange nicht mehr weiß sein, sondern sich in irgend einem Sinne gefärbt zeigen. Da je nach der Natur der lichtabsorbierenden Schicht die Absorption der verschiedensten Teile des sichtbaren Spektralgebietes treffen kann, so kann man grundsätzlich gesprochen alle Farbtöne des Farbkreises durch solche absorbierende Schichten erzeugen. Auch kann man mehrere verschiedenen Farben entsprechende „Lichtfilter“, wie derartige Schichten allgemein genannt werden sollen, gleichzeitig auf dieselbe Lichtmenge, die wir der Einfachheit wegen als Weiß voraussetzen, einwirken lassen. Dann wird das eine Filter diejenigen Wellenlängen zerstören und schwächen, auf die er seiner Natur nach diese Wirkung übt und das andere wird es mit den ihm zugeordneten Wellenlängen tun, so daß bei gleichzeitiger Wirkung das durchtretende Licht beide Arten von Wellenlängen verloren haben wird. Nach dem früher ausgesprochenen allgemeinen Gesetz, wonach jede derartige optische Veränderung nach gleichen Verhältnissen unabhängig von der absoluten Lichtintensität erfolgt, ist die Reihenfolge, in welcher die beiden Lichtfilter dieselbe Lichtmenge beeinflussen, ohne Einfluß auf die Gesamtabsorption, welche das Licht erfährt und das Resultat ist bei gegebenen Lichtfiltern eine ganz bestimmte Farbe, die von den übriggelassenen Wellenarten gebildet wird.

Wie man sieht, handelt es sich hier um eine ganz besondere Art der gleichzeitigen Beeinflussung des gegebenen Lichtes, welche nur mit Hilfe von selektiv absorbierenden Schichten erfolgen kann und deren Resultate somit als spezielle Ergebnisse dieser Lichtabsorption gekennzeichnet werden müssen. Sie haben auch entfernt nicht die Allgemeinheit der oben geschilderten Vorgänge bei der additiven Mischung der Farben und nur die Tatsache, daß derartige Vorgänge regelmäßig bei der Mischung der *Pigmente* eintreten, welche ohne Ausnahme auf solcher selektiven Absorption beruhen, hat Anlaß gegeben, daß man überhaupt von einer subtraktiven Farbenmischung als analog der additiven geredet hat.

Der wesentlichste Unterschied dieser Art der Farbenmischung von der additiven ist der, daß das Gesetz über das gleiche Aussehen der Mischprodukte gleichaussehender Bestandteile *für die*

subtraktive Lichtmischung nicht gilt. Es trifft also mit anderen Worten nicht zu, daß bei der Einwirkung des gleichen Lichtfilters, auf gleichaussehende aber optisch verschieden zusammengesetzte Farben gleiche Farben entstehen. Vielmehr können solche „Mischungen“ sehr verschiedenartig aussehen und die Umstände, unter denen solche Verschiedenheiten eintreten, werden später den Gegenstand einer besonderen Untersuchung bilden.

84. Die Symmetrie im Farbenkreise. Wir fragen nunmehr, welchen Einfluß die eben festgestellte Tatsache, daß für jeden beliebigen Farbton eine *Ergänzungsfarbe* existiert, auf die Ordnung der Farbtöne im Farbenkreise hat. Es wird offenbar durch diese Beziehung eine bestimmte und charakteristische Art von *Symmetrie* hervorgerufen, da jeder beliebige Farbton zusammen mit seiner Ergänzungsfarbe den ganzen Farbenkreis in zwei gleichwertige Hälften teilt. Halten wir an der willkürlichen Annahme fest, daß die Farben einem Kreise zugeordnet werden sollen, so müssen wir uns auf die Eigenschaft jedes Durchmessers im Kreise beziehen, daß er den Kreisumfang in zwei gleiche Hälften teilt. Wir werden demgemäß, um der charakteristischen Eigenschaft der Ergänzungsfarben gerecht zu werden, *jedes Paar zusammengehöriger Ergänzungsfarben an den beiden Enden eines Durchmessers anzubringen haben.* Dadurch ist die Willkür in der Zusammendrängung oder Auseinanderziehung der Farbtöne im Farbenkreise insofern eingeschränkt, als sie sich nur noch auf eine Hälfte des Farbenkreises bezieht, da für jeden Punkt der diametral gegenüberliegende Gegenpunkt durch die experimentelle Beziehung gegeben ist, daß die entsprechenden Farben sich zu neutralem Grau vermischen lassen.

Ein derartig geordneter Farbenkreis, in dem im übrigen noch die Dichte der einzelnen Farbtöne willkürlich ist, wenn sie sich auch nur stetig verändern kann, verwirklicht demgemäß zwar eine *notwendige* Bedingung für die endgültige Ordnung der Farbtöne. Diese Bedingung ist aber noch nicht *zureichend*, weil noch eine Freiheit des engeren oder weiteren Zusammenschichtens der Farbtöne besteht. Über diese Freiheit kann erst auf Grund sehr viel weiter gehender Untersuchungen verfügt werden und wir wollen deshalb diese Frage zur Zeit noch unentschieden lassen. Auch mit dieser Unbestimmtheit gestattet der Farbenkreis auf Grund des Prinzips der Ergänzungsfarben eine lange Reihe weitgehender und für

die Farbenlehre grundlegender Schlüsse, zu deren Entwicklung wir nun übergehen wollen.

85. Die spektrale Zusammensetzung gesättigter Farben.

Fragt man einen Fachmann mit guten physikalischen Kenntnissen darnach, wie wohl seiner Meinung nach eine „gesättigte“ Farbe sich bei der spektralen Zerlegung verhalten würde, so erhält man regelmäßig die Antwort, daß eine gesättigte Farbe durch *homogenes* Licht erzeugt werde. Die spektrale Zerlegung einer gesättigten Farbe müßte demnach nur eine Linie oder einen engen Streifen homogenen Lichts im Spektrum ergeben.

Diese Auffassung steht aber mit den Tatsachen in auffallendem Widerspruch. Es gibt beispielsweise eine ganze Anzahl gelber Pigmente, welche so reine oder gesättigte Aufträge herzustellen gestatten, als sich unter den vorhandenen technischen Bedingungen überhaupt ermöglichen läßt, und die chromatische Analyse solcher Aufträge ergibt, daß sie bis zu 90 Prozent reinfarbig sind. Derartige gelbe Schichten sehen ungemein hell aus. Vergleicht man sie unter denselben Beleuchtungsverhältnissen mit normalem Weiß, so überzeugt man sich, daß sie 0,8 bis 0,9 von dessen Helligkeit haben. Hält man hiergegen die wohlbekanntete Tatsache, daß das Gebiet des reinen Gelb im normalen Spektrum äußerst eng ist, indem dieses bei einer ganz geringen Änderung der Schwingungszahl sich einerseits in Orange und andererseits in Grün verfärbt, so sieht man alsbald ein, daß davon nicht die Rede sein kann, daß im weißen Licht 0,8 bis 0,9 der gesamten Helligkeit von homogenem gelbem Licht herrührt; dieses kann vielmehr höchstens einige Prozente betragen.

Diese Betrachtung läßt sich verallgemeinern und ergibt, daß die reinsten Farben, welche uns von den Oberflächen der Objekte entgegen gestrahlt werden, sicherlich nicht aus homogenem Licht von einer bestimmten Wellenlänge, noch auch aus solchem von einem engen Wellenlängengebiet bestehen können, da sie alsdann nicht bunt, sondern schwarz aussehen müßten. Nun existieren zahlreiche Stoffe, welche unter bestimmten Umständen (hauptsächlich in Gestalt von feinem Pulver) Farben aufweisen, welche wir als *rein*, *reich* oder *gesättigt* beurteilen. So können wir uns beispielsweise gegenüber einem Aufstrich von Chromgelb oder hellem Kadmiumgelb nicht vorstellen, daß es noch viel „gelbere“ Flächen geben könnte, d. h. solche, in denen der Charakter der reinen gelben

Farbe erheblich stärker ausgeprägt wäre. Dasselbe gilt beispielsweise in anderen Farbengebieten für Kobaltblau oder Zinnober. Es entsteht also die Frage, welche optischen Bedingungen erfüllt sein müssen, damit dieser von anderen Farbempfindungen charakteristisch verschiedene Eindruck der Reinheit oder Sättigung hervorgerufen wird.

86. Gelbe Farben. Um die Frage experimentell zu beantworten, untersucht man zweckmäßig zunächst rein *gelbe* Pigmente und Aufstriche, weil die gelbe Farbe, wie jeder Maler weiß, am allerempfindlichsten gegen fremde Zusätze ist, die sich alsbald durch eine Trübung der reinen Farbe verraten. Richtet man das Spektroskop auf einen Aufstrich von Chromgelb oder Kadmiumgelb, so zeigt sich folgendes: Die ganze rote, rotgelbe, gelbe, gelbgrüne und reingrüne Seite des Spektrums bis zum Blaugrün wird ebenso vollständig von der gelben Fläche reflektiert, wie von einer weißen. Vom Blaugrün ab ist dagegen alles Blau und Violett vollständig abgeschnitten.

Man kann dieses am bequemsten beobachten, wenn man auf eine größere Fläche von schwarzem Sammet einen schmalen Streifen von solchem gelben Papier und in seine Verlängerung, scharf angrenzend, einen genau gleichbreiten Streifen von Normalweiß legt, und das Ganze aus genügender Entfernung durch ein Zerstreungsprisma, am bequemsten ein gradsichtiges betrachtet. Dann bilden beide Streifen zwei Spektren, die unmittelbar untereinander liegen und man überzeugt sich, daß die langwellige Hälfte des Spektrums beiderseits gleich hell ist, während beim Gelb die andere Hälfte fehlt. Bei genauer Beobachtung wird man im kurzwelligen Teil noch Spuren von Licht im Spektrum des gelben Pigments erkennen. Diese rühren von dem Oberflächenlicht her, welches alle Pigmentaufstriche in wechselndem Betrage (von 2 bis 15 Prozent und mehr) zurückwerfen.

Will man auch dieses Oberflächenlicht vermeiden, so betrachtet man mit dem Spektroskop eine rein gelbe durchsichtige Schicht, etwa die verdünnte Lösung eines Pikrates oder normalen Chromates. Hier macht sich das gleiche Verhalten noch reiner geltend. Die durchgelassenen Wellenlängen hören im Blaugrün etwa bei der Fraunhoferschen Linie F, also zwischen den Wellenlängen 480 bis 490 ziemlich plötzlich auf. Und auch die reinsten und gesättigsten gelben Aufsichts- oder Durchsichtsfarben lassen keinerlei Störung

in dem ganzen durchgelassenen Gebiete erkennen. Erst wenn das Gelb trübe und graugelblich wird, erweist es sich als mit beginnender Absorption in dem langwelligen Gebiete behaftet. Ebenso bedingt eine Änderung des Gelb nach der rötlichen Seite, daß sich die Grenze im Blaugrün mehr nach der gelbgrünen Seite hin verschiebt.

Im übrigen ist aber die Erscheinung *vollkommen unabhängig von der Natur des Pigments*. Ich habe sämtliche mir zugänglichen reingelben Pigmente der Farbstoffindustrie, sowie andere reingelbe Lösungen auf dieses Verhalten untersucht und niemals eine Abweichung davon gefunden. Nachstehende gelbe Lösungen und Aufstriche wurden spektroskopisch geprüft; sie wiesen ohne jede Ausnahme das beschriebene Verhalten auf.

Lösungen: Pikrate von Natrium und Kalzium, neutrales Kalium- und Ammoniumchromat, Goldchlorid, Ferrocyankalium (alte Lösung), Chinolingelb, Auramin II, Saturngelb, Rhodulingelb, Naftolgelb, Brillantgelb, Echtgelb, Azoflavin, Phosphin.

Aufstriche: Chromgelb, Hell Kadmium, Strontiumchromat, Gummigutt, Indischgelb, Arsenstrisulfid, Naphtantrachinon, Helios-Echtgelb.

Es darf also als eine experimentelle Tatsache angesehen werden, daß alle reingelben Farben, sei es in der Aufsicht, sei es in der Durchsicht, identisch dasselbe Spektrum haben. Die gelbe Farbe kommt dadurch zu stande, daß alle längeren Lichtwellenlängen bis etwa zur Wellenlänge 490 ebenso stark vertreten sind, wie im Weiß, während alle weiteren Wellenlängen vollständig fehlen.

Infolge des allgemeinen Charakters der Absorptionsbanden in bunten Pigmenten ist diese Grenze allerdings niemals vollkommen scharf, sondern durch eine stetige, wenn auch schnelle Zunahme der Absorption von 0 bis 1 mit Änderung der Wellenlänge gekennzeichnet. Durch eine Versuchsanordnung, welche gestattet, aus den Strahlen des Spektrums ein ganz bestimmtes Gebiet scharf fortzunehmen und den Rest zu gemeinsamer Wirkung zu vereinigen, wird es möglich sein, bis auf einige Einheiten die Wellenlänge der Grenze zu bestimmen, bis zu welcher sich das langwellige Licht zu reinem gesättigtem Gelb vereinigt.

Wir kommen also zunächst für reingelbes Licht zu dem Resultate, daß eine „gesättigte“ Farbe nicht etwa aus homogenem Licht von einer bestimmten Wellenlänge besteht, sondern daß viel-

mehr an ihrem Zustandekommen die größere Hälfte des Spektrums beteiligt sein muß. Als besonders beachtenswert sei hervorgehoben, daß die Grenzen des Spektralgebietes, welches vermischt reines oder gesättigtes Gelb ergibt, durch zwei *Ergänzungsfarben* gebildet werden. Denn das Blaugrün mit der Wellenlänge 490 ist tatsächlich die Ergänzungsfarbe des äußersten Rot.

87. Störungen der Reinheit. In der Tat konstatieren wir, daß jede Einschränkung des eben angegebenen Gebietes alsbald den Eindruck des reinen Gelb zerstört. Durch sehr verdünnte Schichten von Berliner Blau kann man Teile des Rot von dem äußeren sichtbaren Ende des Spektrums vorschreitend fortnehmen. Kombiniert man eine solche sehr blaßblau aussehende Schicht mit einer reingelben, so erweist sie sich im Spektrum als von der letzteren nur dadurch verschieden, daß ein kleiner Teil des Rot fortgenommen ist. Die Wirkung auf die Gesamtfarbe ist außerordentlich präzise und macht sich in einer unverkennbaren Verschiebung nach Grün geltend. Ebenso kann man durch die Anwendung anderer Pigmente das Spektralgebiet von der grünen Seite her einschränken und den Absorptionsstreifen über die eben gekennzeichnete blaugrüne Gegend nach den längeren Wellen verschieben. Das Resultat ist alsbald eine Verfärbung des reinen Gelb nach Orange, also wiederum eine Störung der farbigen Wirkung des reinen Gelb. Wir müssen daraus schließen, daß die Gesamtheit der eben gekennzeichneten Strahlen für die Wirkung des reinen, gesättigten Gelb *wesentlich* ist, und daß es nicht möglich ist, einen Teil daraus zu entfernen, ohne daß alsbald der Eindruck des reinen und gesättigten Gelb schwindet.

Besonders lehrreich ist der Versuch, das Spektralgebiet gleichzeitig von beiden Seiten einzuschränken, so daß das, was man vorläufig den chromatischen Schwerpunkt der entstehenden Farbe nennen kann, dabei möglichst unverändert bleibt. Es geschieht dieses nach den eben geschilderten Verhältnissen am einfachsten durch die Kombination einer reingelben Schicht mit einer schwachen Schicht von Berlinerblau und einer entsprechend schwachen Schicht eines rotgelben Farbstoffes, beispielsweise Orange II, Mandarin oder Metanilgelb. Bemißt man beide Zusätze derart, daß die Einwirkungen sich annähernd die Wage halten, so ist das Resultat jene charakteristische Farbe, welche durch die Zumischung von Grau zu Gelb entsteht, und gewöhnlich den Namen Olivgrün führt. Hierbei be-

wirken die oben (§ 27) geschilderten Verhältnisse der bezogenen Farben, daß man die durchgelassene Farbe als Olivgrün einschätzt, wenn man sie mit anderen remittierenden Oberflächen vergleicht, also bei der gewöhnlichen Handhabung. Nur wenn man die durchgelassene Farbe völlig bezugsfrei macht, indem man sie allein in einem dunklen Gesichtsfelde erscheinen läßt, sieht sie gelb aus und unterscheidet sich von einer reingelben nur durch die geringere Lichtstärke.

Man kann diese Versuche weiter fortsetzen und gleichzeitig die rote und die grüne Seite des Gesamtgebietes bis zu den in der Mitte gelegenen reingelben Strahlen einschränken, die etwa die Wellenlänge 579 haben. Das Lichtfilter, welches man auf diese Weise erhält, läßt reines Gelb und ein schmales Gebiet von Wellenlängen, die um dieses reine Gelb gelegen sind, hindurch. Es sieht aber keineswegs reingelb, sondern sehr dunkel aus. Seine Farbe ist dasselbe „Olivgrün“ in stärkster Ausprägung, welches schon früher als Ergebnis der Verdunkelung des Gelb geschildert worden ist. Bezugsfrei betrachtet liegt wiederum ein Gelb vor, welches allerdings, um als reines Gelb zu erscheinen, eine sehr scharfe Abgleichung der beiden Komponenten erfordert. Die gleichen Folgen zeigen sich, wenn man aus der *Mitte* des Gebietes Strahlen entfernt. Eine sehr verdünnte Schicht von Bengalrosa in Gelatine, die eben nur einen Schatten zwischen den Wellenlängen 560 bis 570 im Spektrum hervorbrachte, ergab bei der Kombination mit einer reingelben Schicht von Chinolingelb eine sehr deutliche Verschmutzung der Farbe, verbunden mit einem bräunlichen Ton, d. h. eine Verschiebung des Farbtons ins rötliche, entsprechend der Entfernung von etwas Grün. Die Farbe war aber keineswegs ein reines Orange, sondern gehörte zweifellos den *trüben*, d. h. mit Grau gemischten Farben an. Ein *reines* Orange entsteht nur durch Vorschreiten der vollständigen Absorption von Blaugrün nach Gelbgrün, wenn dabei der durchgelassene Teil des Spektrums *ganz intakt* bleibt.

88. Gesättigtes Rot. Die schönstfarbigen roten Pigmente sind die Eosinfarbstoffe, welche sämtlich durch einen mit zunehmender Schichtdicke breiter werdenden, verhältnismäßig scharf begrenzten Absorptionsstreifen gekennzeichnet sind, den man von Blau und Violett in der gelben Muttersubstanz fluorescein durch Einführung von Halogenen stufenweise bis nach Grüngelb im purpurroten Jodeosin wandern lassen kann. Sucht man die Schicht-

dicke, bzw. Konzentration auf, wo die Tiefe der Farbe tunlichst mit der eines Aufstriches größter Sättigung (deren Feststellung weiter unten beschrieben werden wird) übereinkommt, so kann man feststellen, daß die Breite des Absorptionsgebietes rund einem „Farbenhalb“ (s. w. u.) entspricht. Die undeutliche Begrenzung namentlich nach der kurzwelligen Seite läßt allerdings nur eine annähernde Bestimmung zu.

Beispielsweise erstreckt sich bei Bengalrosa in einer Gelatine-schicht, welche 2,5 g des Farbstoffes auf 1 qm Fläche enthält, das absorbierte Gebiet von 480 bis 590.

Auch hier entsprechen diese beiden Grenzen mit genügender Annäherung einem komplementären Farbenpaare, Gelb und Ultramarinblau. Von dem erst erörterten Falle des gesättigten Gelb unterscheidet sich der vorliegende nur dadurch, daß hier durch die mittlere Lage des Absorptionsgebietes der übrigbleibende Teil des Spektrums aus zwei getrennten Teilen zu beiden Seiten der Auslöschung besteht, während bei dem Zustandekommen des gesättigten Gelb die Auslöschung einseitig in der Richtung von den kürzeren nach den längeren Wellen vorgeschritten war und etwa in der Mitte des Spektrums halt machte.

Man erkennt alsbald, daß grundsätzlich eine dritte Möglichkeit vorliegt, nämlich daß die Absorption von beiden Seiten getrennte Teile des Spektrums auslöscht, so daß das übrigbleibende Gebiet wie im Fall des Gelb in sich zusammenhängt, wobei umgekehrt das absorbierte Gebiet aus zwei voneinander getrennten Stücken besteht. Das sind die grünen Farben.

89. Vorläufige Definition der gesättigten Farben. Die eben geschilderten Tatsachen führen zu folgendem Schluß, dessen Richtigkeit zunächst für Gelb vollständig, für Rot annähernd bewiesen, für die anderen Farben wahrscheinlich gemacht ist, für alle anderen Farben aber noch durch weitere Forschungen bestätigt werden muß. Er soll aber allgemein ausgesprochen werden, um für künftige Untersuchungen eine wichtige Leitlinie zu geben. *Damit eine gesättigte Farbe zustandekommt, ist es notwendig und zureichend, daß ein ganzes Gebiet von Wellenlängen gleichzeitig zusammenwirkt. Jedes derartige Gebiet wird begrenzt durch zwei Wellenlängen, deren Farben im Verhältnis der Ergänzungsfarben stehen.*

Denn die Ergänzungsfarbe des äußersten Rot, mit welchem das Spektrum des gesättigten Gelb beginnt, liegt im Blaugrün bei

der Wellenlänge 489 gemäß den unten erwähnten Rechnungen von GRÜNBERG. Dies ist die Stelle, bei welcher das Spektrum des gesättigten Gelb endet. Nimmt man noch weitere Strahlen aus dem Blau dazu, so wird das Gelb weißlich. Davon kann man sich dadurch überzeugen, daß man mit dem Spektroskop hellgelbe Schichten untersucht, die nicht mehr gesättigt aussehen. Die Absorptionsgrenze rückt dann umsomehr nach dem Blau und Violett vor, je blaßgelber die untersuchten Objekte sind. Aus dem Umstande, daß Ergänzungsfarben miteinander Weiß ergeben, folgt ohnedies unmittelbar, daß Strahlengemische, in denen endliche Beträge von Ergänzungsfarben vertreten sind, eine entsprechende Menge Weiß enthalten müssen.

Die umgekehrte Betrachtung, daß die beiden Ergänzungsfarben, welche an den äußersten Grenzen eines solchen zur Entstehung einer gesättigten Farbe notwendigen Gebietes liegen, gleichfalls Weiß ergeben, also die Sättigung der Farbe zerstören müssen, beantwortet sich dahin, daß die Ergänzungsfarben beiderseits nur unendlich wenig betragen, also auch nur unendlich wenig Weiß geben können. Endliche chromatische Wirkungen rühren nur von solchen Lichtarten her, die zunehmend weiter von der Stellung der Ergänzungsfarben sich entfernen und sich demgemäß zunehmend im Farbkreise nähern.

Wir wollen in der Folge, um kurz davon reden zu können, die Gesamtheit aller Lichtarten, die einer vollen Hälfte des Farbkreises entsprechen, d. h. durch ein Paar Ergänzungsfarben begrenzt sind, ein *Farbenhalb* nennen. Das Farbenhalb vom äußersten Rot des Spektrums bis zu seiner Ergänzungsfarbe Blaugrün ist also das Material, aus welchem das reine oder gesättigte Gelb besteht. Die oben ausgesprochene Protothese nimmt dadurch die Form an, daß die Mischung aller Lichtarten eines Farbenhalb die notwendige und zureichende Voraussetzung für die Entstehung einer jeden gesättigten Farbe ist.

Alle im stetigen Spektrum möglichen Farbenhalbe ergeben indessen nur die gesättigten Farben Orange, Gelb, Grün und Eisblau, also etwa einen halben Farbkreis. Das ganze auf der anderen Seite liegende Gebiet der ultramarinblauen, violetten, purpurroten, reinroten bis gelbroten Farben ergibt sich dagegen als Produkt der Zusammenwirkung der Strahlen eines *geschlossenen* Spektralgebietes durch diese Betrachtung nicht. Ihre Farbenhalbe

bestehen demnach aus zwei Stücken des Spektrums, von jedem Ende eines. Es ist dieses natürlich eine Folge des Umstandes, daß die Farben des Spektrums keinen geschlossenen Farbkreis darstellen. Daraus entsteht alsbald die Notwendigkeit, die Beziehungen zwischen den Spektralfarben und denen des geschlossenen Farbkreises genauer festzustellen.

90. Die Ergänzungsfarben im Spektrum. HELMHOLTZ hatte in seiner ersten Untersuchung¹⁾ nur ein einziges Paar von Ergänzungsfarben im Spektrum finden können, nämlich Gelb und rötlich Blau, worauf GRASSMANN in einer grundlegenden mathematischen Arbeit²⁾ alsbald bewies, daß im allgemeinen jede Farbe ihre zugehörige Ergänzungsfarbe besitzen müsse. Er machte hierbei die durch HASSENFRATZ veranlaßte unrichtige Annahme, daß unter günstigen Verhältnissen das äußerste Rot des Spektrums mit dem äußersten Violett farbengleich werden und daß somit das Spektrum einen vollständigen Farbkreis darstellen kann. Verbessert man seine Schlüsse entsprechend der Tatsache, daß die Spektralfarben in dem Farbkreise eine Lücke aufweisen, so lauten sie dahin, daß innerhalb der Grenzen des spektralen Gebietes unendlich viele Paare von Ergänzungsfarben bestehen müssen. Später hat dann auch HELMHOLTZ diesen Schluß bestätigt und eine Anzahl solcher Paare experimentell festgestellt.

Dabei hatte sich ergeben, daß im Spektrum die Änderung der Farbe mit der Wellenlänge einigermaßen unregelmäßig verläuft, indem insbesondere an den beiden Enden im Rot und im Violett große Gebiete von Wellenlängen durchschritten werden können, ohne daß der Farbton sich erheblich ändert. Daraus ergibt sich ein eigentümliches Verhältnis der Wellenlängen zugeordneter Ergänzungsfarben, indem großen Schritten an den beiden Enden des Spektrums kleine Schritte ihrer Ergänzungsfarben entsprechen. Für die Gesamtbeziehung stellte HELMHOLTZ folgende Gesetzmäßigkeit auf. Wenn man die zusammengehörigen Ergänzungsfarben in ein Koordinatennetz ordnet, dessen Abszissen die Wellenlängen der einen und dessen Ordinaten die Wellenlängen der anderen Ergänzungsfarbenreihe sind, so liegen die Punkte, in welchen die Koordinaten der Ergänzungsfarbenpaare zusammentreffen, auf einer rechtwinkligen Hyperbel.

1) Pogg. Ann. 87, 45. 1852.

2) Pogg. Ann. 89, 69. 1853.

Später sind diese Bestimmungen von einer größeren Anzahl anderer Forscher wiederholt worden, die zum Teil dieselben, zum Teil etwas abweichende Resultate erhielten. Insbesondere ergab sich, daß die Beurteilung des äußersten Violett durch das Auftreten von Fluoreszenzerscheinungen im Auge einigermaßen getrübt ist. Eine Verarbeitung aller auf diesem Gebiete erhaltenen Zahlen ist dann von V. GRÜNBERG¹⁾ vorgenommen worden, welcher durch eine entsprechende ausgedehnte Ausgleichrechnung die wahrscheinlichste Lage jener Hyperbel bestimmt hat.

Ich entnehme einer ausgezeichneten Arbeit von L. PFAUNDLER²⁾, auf die ich noch mehrfach zurückzukommen Anlaß haben werde, die nachstehende Tabelle der so berechneten Wellenlängen spektraler Ergänzungsfarben.

Wellenlängen spektraler Gegenfarben					
warm	kalt	warm	kalt	warm	kalt
λ	λ'	λ	λ'	λ	λ'
675	494,4	591,6	485	567	445
665	494	590	484,4	566,4	440
660	493,8	582,5	480	566	437,5
650	493,3	580	477,8	565,4	430
643,8	493	579,6	477,4	565	427,3
640	492,8	575	471,5	564,5	420
635	492,4	574,2	470	564	413,2
629,7	492	570,2	460	563,8	410
620	490,9	570	459,4	563,3	400
619,6	491	569	455,6	563	392
612	490	568	450,9		
610	489,7	567,9	450		

Die Formel, in welcher GRÜNBERG das Resultat seiner Ausgleichsrechnung zusammenfaßt, lautet:

$$(\lambda - 559)(498 - \lambda') = 424,$$

wo λ und λ' die Wellenlängen zweier Ergänzungsfarben sind.

91. Graphische Darstellung. Um den Inhalt dieser Formel anschaulicher darzustellen, als es durch die Zeichnung der entsprechenden rechtwinkligen Hyperbel möglich ist, habe ich folgenden

1) Sitzungsber. d. Wiener Akad. 113, 627. 1904.

2) Eders Jahrb. f. Photogr. 1910.

Weg gewählt. Die Wellenlängen von 608 bis 400 werden auf der Abszissenachse abgetragen und die zusammengehörigen Paare der Gegenfarben werden übereinander dergestalt geordnet, daß der Mittelwert ihrer Wellenlängen jeweils als Ordinate dient. Dadurch kommen die Wellenlängen der verschiedenen Paare regelmäßig übereinander zu liegen und bilden insgesamt, wie Fig. 3 erkennen läßt, zwei Hyperbeln, deren Asymptoten 559 und 498 das Gebiet

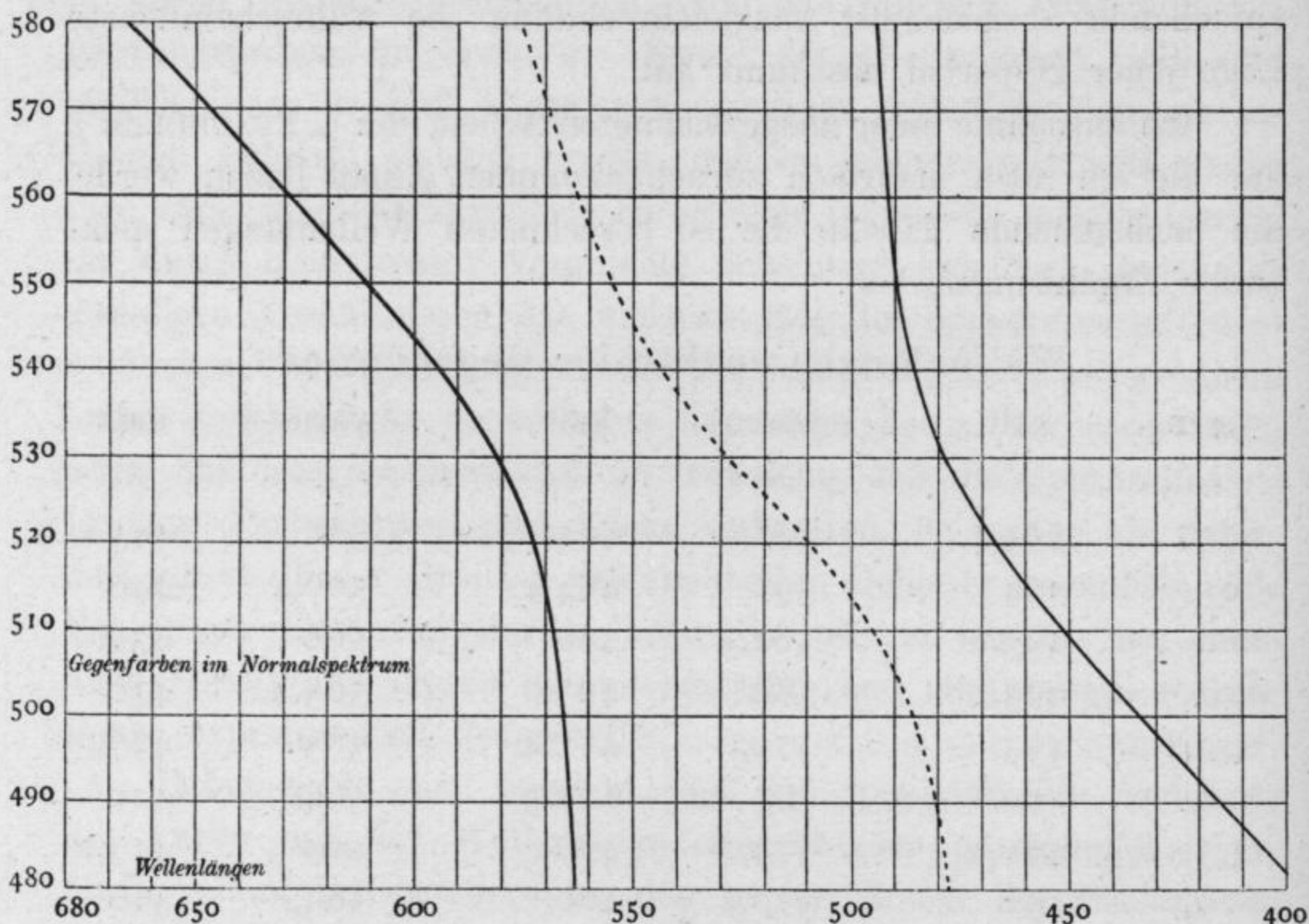


Fig. 3.

der Farben einschließen, für welche es im Spektrum keine Gegenfarben gibt. Betrachtet man zunächst die oberste Horizontale, so hat man dort die Einteilung des Spektrums, welche wir vorher als die Bedingung des gesättigten Gelb kennen gelernt haben, falls der ganze linke Teil des Spektrums mit den größeren Wellenlängen durchgelassen, der rechte etwa von 500 (genau 498) ab dagegen absorbiert wird. Es ist bei der gewählten Darstellung, die dem normalen oder Beugungsspektrum entspricht, ersichtlich, daß der größere Teil des Spektrums durchgeht und sich zum Gelb zusammenschließt, während für die Gegenfarbe des Blau nur ein verhältnismäßig kleiner Teil von 400 bis 498 übrig bleibt. Hiermit hängt offenbar zusammen, daß jenes reine Gelb, das auf solche Weise entsteht, die hellste Farbe im Farbkreis ist, während die Gegenfarbe Ultra-

marinblau ihrerseits als dunkelste erscheint. Das zugehörige Gelb, welches durch die Vermischung aller dieser Farben entsteht, ist nicht etwa durch das arithmetische Mittel der begrenzenden Wellenlängen gekennzeichnet, da diese für den theoretischen Grenzwert einerseits nach $-\infty$ gehen, also kein Mittel zu ziehen ermöglichen. Sondern das zugehörige Gelb in andere Weise definiert, auf die bereits PFAUNDLER (a. a. O.) in anderem Zusammenhange hingewiesen hat, nämlich als der eine *Wendepunkt* im Spektrum oder eine von den beiden Farben, bei welchen die Wellenlängen ihre geringste Differenz zeigen.

Die Fig. 3 gestattet den Verlauf dieses Vorganges genau zu verfolgen. Betrachtet man immer tiefer liegende Horizontalen, so sieht man, wie der von den Gegenfarben eingeschlossene mittlere Teil des Spektrums immer kürzer wird, bis er etwa unterhalb der Ordinate 530 (genau bei 528,5) sein Minimum erreicht, um sich von dort ab wieder zu vergrößern. Die Wellenlängen, welche diesem Minimum der Entfernung der Gegenfarben entsprechen, sind 579,6 und 477,4 und PFAUNDLER hat (a. a. O.) auf die Nähe dieser Punkte zu den von HERING rein empfindungsmäßig bestimmten Punkten für das *Urgelb* und *Urblau* hingewiesen. Tatsächlich spricht viel dafür, daß die so bestimmten Punkte, welche sich, wie PFAUNDLER ausdrücklich hervorhebt, aus den von GRÜNBERG benutzten Durchschnittswerten ziemlich genau bestimmen lassen, tatsächlich diese fundamentale Bedeutung für unsere Farbempfindung haben und daß insbesondere das derart definierte Gelb 579,6 mit den aus ganz anderen Erwägungen begründeten Nullpunkt des empirischen Farbkreises, nämlich dem durch die Pikrate oder Strontiumchromat bestimmten Reingelb auf der Grenze zwischen grünlich und rötlich Gelb übereinkommt.

Auch experimentell bestätigt sich dieser Befund. Denn, wenn man eine an der Grenze zwischen weißlich Gelb und Reingelb liegende durchsichtige Schicht eines derartigen reingelben Farbstoffes z. B. eines Pikrates im Spektroskop untersucht, so erweist sich die Grenze des absorbierten Gebietes als praktisch identisch mit dem eben bestimmten Werte 489 der Wellenlänge. Da keiner der benutzten Farbstoffe an dieser Stelle eine scharfe Begrenzung der Absorption zeigt, so läßt sich allerdings mehr als eine Annäherung nicht herstellen. Eine genauere Kontrolle der eben dargestellten Anschauungen wird sich aber gewinnen lassen, wenn man

die theoretische Voraussetzung, daß nämlich alle Wellenlängen bis zum Punkte 489 vereinigt werden, auf optischem Wege verwirklicht, wozu eine Reihe von Möglichkeiten offen stehen. Mit den begrenzten Mitteln meines Privatlaboratoriums habe ich mich noch nicht im Stande gesehen, derartige Versuche anzuführen, wie denn überhaupt die messende Durcharbeitung all dieser Betrachtungen eine Aufgabe anderer Natur ist, als die Klarstellung der theoretischen Grundlagen.

92. Der resultierende Farbton. Auf die Frage, in welchem Zusammenhang die Wellenlänge der Gegenfarben, welche ein bestimmtes Farbenhalb begrenzen mit der Wellenlänge derjenigen Farbe steht, welche der entstehenden gesättigten Farbe entspricht, läßt sich hier noch keine bestimmte Antwort geben. Bei dem Versuche, die entsprechenden Spektralgebiete durch Farbfilter zu isolieren, macht sich die verwaschene Beschaffenheit der Absorptionsgrenzen so störend geltend, daß von einer einigermaßen zuverlässigen Abgrenzung der wirksamen Gebiete nicht die Rede sein kann. Meine dahin angestellten Versuche haben daher nur die Bedeutung grober Schätzungen. Mehr um das Problem zu bezeichnen, als um es zu lösen, habe ich die Ergebnisse dieser Schätzungen nicht ganz unerwähnt lassen wollen. Sie sind in Gestalt einer punktierten Linie, welche zwischen den beiden Grenzlinien der Gegenfarben verläuft, in Fig. 3 eingetragen. Wie man sieht, stimmen die beobachteten Punkte keineswegs mit dem arithmetischen Mittel aus den beiden begrenzenden Wellenlängen überein, denn diese müßten gemäß der Konstruktion der Fig. 3 eine von links oben nach rechts unten verlaufende gerade Linie ergeben. Statt dessen scheint die Linie in der angedeuteten Weise S-förmig zu verlaufen, indem der Charakter ihrer Bewegungen vorwiegend durch die asymptotisch verlaufenden Teile der beiden Grenzlinien bestimmt wird. Hier reichen die mir verfügbaren Hilfsmittel nicht aus, die Frage einer bestimmteren experimentellen Entscheidung zuzuführen.

93. Vorläufige Ordnung des Farbkreises. Um die nachstehenden Erörterungen bequemer anstellen zu können, soll für den Farbkreis eine vorläufige Ordnung angegeben werden. Seine bisher erörterten Eigenschaften, die Geschlossenheit der Reihe und die Existenz von Ergänzungs- oder Gegenfarben genügen nicht, um die gegenseitige Entfernung der einzelnen Farbtöne voneinander auf der Peripherie oder ihren Winkelabstand festzustellen. Sie

führen nur soweit, daß, wenn für irgend eine Hälfte des Kreises die Ordnung festgestellt ist, alsdann vermöge des Prinzipes der Gegenfarben auch die Ordnung der anderen Hälfte in eindeutiger Weise erfolgen kann. Ein Prinzip, nach welchem die gegenseitige Entfernung der einzelnen Farbtöne bestimmt werden könnte, war bisher nicht bekannt. Ein solches ist inzwischen gefunden und entwickelt worden, doch setzt seine Darlegung eine vollständige Erörterung der Meßmethoden für die Reinheit gegebener Farben voraus und muß deshalb verschoben werden. Von den Ergebnissen können aber die Hauptpunkte vorläufig vorausgenommen werden, da sie die Übersicht der hier erörterten Verhältnisse erleichtern, ohne die erhaltenen Resultate, welche ausschließlich auf dem Begriff der Gegenfarbe beruhen, irgendwie zu präjudizieren.

Die Ergebnisse der in Rede stehenden Messungen kommen mit den auf Grund rein psychologischer Beobachtungen und Erwägungen gewonnenen Ergebnissen von E. HERING im wesentlichen überein. Bekanntlich hat dieser Forscher in bewußtem Anschlusse an GOETHES psychophysische Farbenlehre an Stelle der von YOUNG und HELMHOLTZ angenommenen drei Grundfarben, deren vier angenommen, von denen je zwei durch die Beziehung der Gegen- oder Ergänzungsfarbe miteinander verknüpft sind. Hierdurch wird ebenso wie durch die Annahme dreier (annähernd äquidistanter) Farben bei YOUNG und HELMHOLTZ eine erschöpfende und zureichende Möglichkeit zur Definition sämtlicher Arten von Farbtönen auf Grund der additiven Mischung gegeben.

Insbesondere bedeuten die vier Farben von HERING den dreien von YOUNG gegenüber keine *Überbestimmung*. Eine solche wäre nur vorhanden, wenn die vier Farben willkürlich gewählt worden wären. Die Bedingung, daß sie paarweise Gegenfarben sein müssen, stellt eine Einschränkung dar, die gerade weit genug geht, um die Notwendigkeit der Vierzahl zu begründen.

94. Das Urgelb. Als Urfarben gibt HERING Gelb und Reinblau einerseits, Rot und Grün andererseits an, wobei die genannten Paare im genauen Verhältnis der Ergänzungsfarben stehen, d. h. sich gegenseitig zu neutralem Grau, das keinerlei Farbton zeigt, additiv vermischen müssen. HERINGS Urgelb fällt zusammen mit dem Gelb, welches oben als Anfangspunkt der Zählung im Farbkreise definiert worden ist. Wie bereits hervorgehoben wurde, befindet sich im Spektrum nur ein überaus enges Gebiet,

welches dieses weder grünliche, noch rötliche Gelb aufweist und demgemäß stimmt die von HERING angegebene Wellenlänge 575 für sein Urgelb sehr nahe mit den anderen Bestimmungen eines solchen Gelb durch unabhängige Forscher überein. Ferner besteht eine gleichfalls sehr nahe Übereinstimmung mit einem der „Wendepunkte“ im Spektrum, die PFAUNDLER hervorgehoben hat. Es sind dies diejenigen Punkte, bei denen die gleichzeitige Änderung der Wellenlängen der Gegenfarben gleichen Wert hat. Sie lassen sich auf der Hyperbel, welche sämtliche Gegenfarben im Spektrum vereinigt mit verhältnismäßig großer Genauigkeit als die beiden Koordinaten ihres Scheitels bestimmen.

Die entsprechende Ergänzungsfarbe im Ultramarinblau ist durch die Wellenlänge 477,4 (den PFAUNDLERSCHEN Wendepunkt) oder 472 (das Urblau von HERING) gekennzeichnet. Während das Gelb genügend eindeutig durch seine psychophysische Wirkung im Spektrum bestimmt ist, kann man das Gleiche von dem entsprechenden Blau nicht sagen. Es ist für mein Urteil deutlich *rötlich* gefärbt und steht keineswegs in der Mitte zwischen grünlichem und rötlichem Blau. Da es aber jedenfalls objektiv als Ergänzungsfarbe zu jenem wohldefinierten Urgelb bestimmt werden muß, so kann hier das psychologische Urteil nicht maßgebend sein, sondern man muß die Tatsache registrieren, daß die Ergänzungsfarbe des reinfarbigen Urgelb den eben gekennzeichneten, viel weniger bestimmten Eindruck macht.

95. Das Urrot. Schwieriger ist das andere Paar zu bestimmen. Das Rot kann am besten als die Farbe des äußersten Spektralrot definiert werden, wobei erleichternd die Tatsache zur Geltung kommt, daß im Gegensatz zu Urgelb dieses Rot über ein breites Gebiet von Wellenlängen ausgedehnt ist, in welchem der Farbton sich praktisch konstant erhält. Man kann also das gesamte rote Licht des Spektrums von dem äußersten Rot bis etwa zur Wellenlänge 630 vereinigen, um diesen Farbton (bezugsfrei) als Urrot zu definieren.

Will man ihn experimentell als Aufstrich herstellen, so gelangt man am leichtesten dazu, wenn man ein Gemisch der Farbstoffe Eosin A und Erythrosin im Verhältnis von 3:1 herstellt und davon eine einprozentige Lösung macht. Um etwaige saure Reaktionen des Papierees unschädlich zu machen, ist es gut auch noch $\frac{1}{2}\%$ Natriumkarbonat mit dem Farbstoff aufzulösen. Diese

Lösung läßt man auf gut geleimtes, möglichst weißes Zeichenpapier 3 Minuten lang einwirken, worauf der Überfluß entfernt und das Blatt freihängend getrocknet wird. Man führt diese Operation am einfachsten aus, wenn man sich einen gut lackierten Doppelrahmen in dem Formate des zu behandelnden Papiere herstellen läßt, der an einer Langseite durch Scharniere verbunden ist, während er an der anderen Langseite durch Haken und Stifte geschlossen werden kann. Das Papier wird zwischen die beiden Rahmen geklemmt und man gießt dann in die so gebildete Schale die Farbstofflösung reichlich hinein, wobei man Sorge trägt, mit einem Pinsel alle etwa entstandenen Luftblasen zu beseitigen. Nachdem die Einwirkung unter zeitweiligem Bewegen 3 Minuten lang stattgefunden hat, gießt man die Farbstofflösung ab, nimmt das Papier heraus und läßt es an einer Ecke aufgehängt 1 Minute lang abtropfen. Dann wird ein flacher weicher Pinsel, den man in die Farbstofflösung getan und dann kräftig ausgedrückt hatte, so von unten nach oben über das nasse Blatt geführt, daß die darauf noch befindlichen beweglichen Reste der Farbstofflösung gleichförmig verteilt werden. Ist dies geschehen und hat sich der Rest der Lösung in das Papier hineingezogen, so wird das Trocknen durch freies Aufhängen an einer Ecke beendet. Ein derart hergestellter Aufstrich ist nach meinem Urteil weder gelblich-, noch bläulichrot und hat sich auch bei den oben erwähnten Messungen als genau in der Mitte zwischen Urgelb und Urblau liegend erwiesen.

Das dazu gehörige komplementäre *Grün* ist wiederum nicht das Grün, welches ebenso wenig bläulich wie gelblich ist, sondern es ist ein ausgesprochenes Blaugrün und liegt infolgedessen in gleichem Sinne von dem mittleren Grün entfernt, wie die Gegenfarbe des Urgelb von einem mittleren Blau entfernt liegt.

Diese Tatsachen erfordern anscheinend, da ja die Beziehungen der Ergänzungsfarben objektiv definiert sind, eine Modifikation oder Ergänzung der HERINGSchen Theorie, welche den Umstand erklärt, daß die beiden Ergänzungsfarben des reinen Gelb und des reinen Rot nicht Gleichgewichtsfarben in demselben Sinne wie die beiden ersten sind. Doch kann die Erörterung dieser Angelegenheit hier noch nicht vorgenommen werden.

Auf solche Weise sind vier Punkte im Spektrum bestimmt und es ist nicht schwer mit guter Übereinstimmung seitens ver-

schiedener Beobachter oder zu verschiedener Zeit hergestellter Proben beliebig viele Stufen in jeden Quadranten des Farbkreises einzuschalten. Am zweckmäßigsten geschieht das, indem man 50 Stufen im Gebiet Gelb, Rot, Violett, Blau herstellt, weil hier der Fortschritt im Farbkreise größere psychologische Stufen bedingt, als auf der blauen und grünen Gegenseite.

Dann werden die dazu gehörenden 50 Gegenfarben im Blau und Grün bestimmt, wodurch man einen hundertteiligen Farbtonkreis erhält, dessen Bezifferung von Urgelb = 0 über Urrot = 25, Gegenfarbe des Urgelb (Ultramarinblau) = 50 und Gegenfarbe des Urrot (Blaugrün) = 75 durchgeführt wird.

Diese vorläufige Ordnung des Farbkreises genügt zunächst vollständig für die weiteren Diskussionen, denen im übrigen die Ergebnisse der Reinheitsmessungen und der darauf beruhenden exakten Bestimmung der Farbkreisteilung zu Grunde gelegt worden sind.

96. Die spektrale Lücke im Farbkreis. Ordnet man sämtliche Farben des Spektrums dem Farbton nach im Farbkreis an, so erkennt man, daß dieses, wenn man der gewöhnlichen verkehrten Ordnung abnehmender Wellenlängen, also von Rot bis Violett folgt, im oberen rechten Quadranten an dem Punkte beginnt, wo die Uhr drei zeigt und von dort nach oben links durch Gelb, Grün, Blau und Violett über drei Quadranten weiter geht. Da nun aber das dem Urgelb komplementäre Urblau noch weit innerhalb des Spektrums liegt und das darauf folgende Violett sich im gleichen Sinne darüber hinaus erstreckt, so dringt die Farbenreihe des Spektrums noch in den letzten Quadranten hinein. Es kommt hier nicht darauf an, eine bestimmte Zahlenangabe darüber zu machen, zumal die Beurteilung des Farbtones bei der gewöhnlichen Dunkelheit dieses Spektralgebietes eine einigermaßen schwierige Aufgabe ist. Unter Benutzung des Umstandes, daß nach der Hyperbel von HELMHOLTZ-GRÜNBERG die Gegenfarbe der Wellenlänge $-\infty$ durch die Wellenlänge 559 gekennzeichnet ist, diese aber ungefähr der Nummer 96 des normalen Farbkreises entspricht, kann man den um 50 Einheiten verschiedenen Punkt, das Violett Nummer 46 vorläufig als die äußerste Grenze bezeichnen, bis zu welcher das violette Spektrum vordringt. Das Gebiet zwischen 25 (welches die Nummer des äußersten Spektralrot ist) und dem eben gekennzeichneten Punkt 46

ist demgemäß der Teil des Farbkreises, für welchen eine Vertretung unter den homogenen Farben des Spektrums nicht vorhanden ist. Er ist in Fig. 4 deshalb punktiert gezeichnet.

Nun besteht, wie L. PFAUNDLER in seiner mehrfach erwähnten geistvollen Arbeit¹⁾ nachgewiesen hat, folgender scheinbare Widerspruch zwischen der Definition der Ergänzungsfarben des Farbkreises und der Tatsache, daß das Spektrum sämtliche sichtbaren Wellen enthält. Gemäß der ersten Definition müssen die Farben des Farbkreises alle miteinander vermischt Weiß ergeben. Experimentell aber besteht die Tatsache, daß der *unvollständige* Farbkreis, soweit er den Spektralfarben entspricht, gleichfalls bei der Vermischung Weiß ergibt. Würde man aus einem Farbkreis die im Spektrum fehlenden Farben zwischen 25 und 45, also das gesamte Purpurrot und

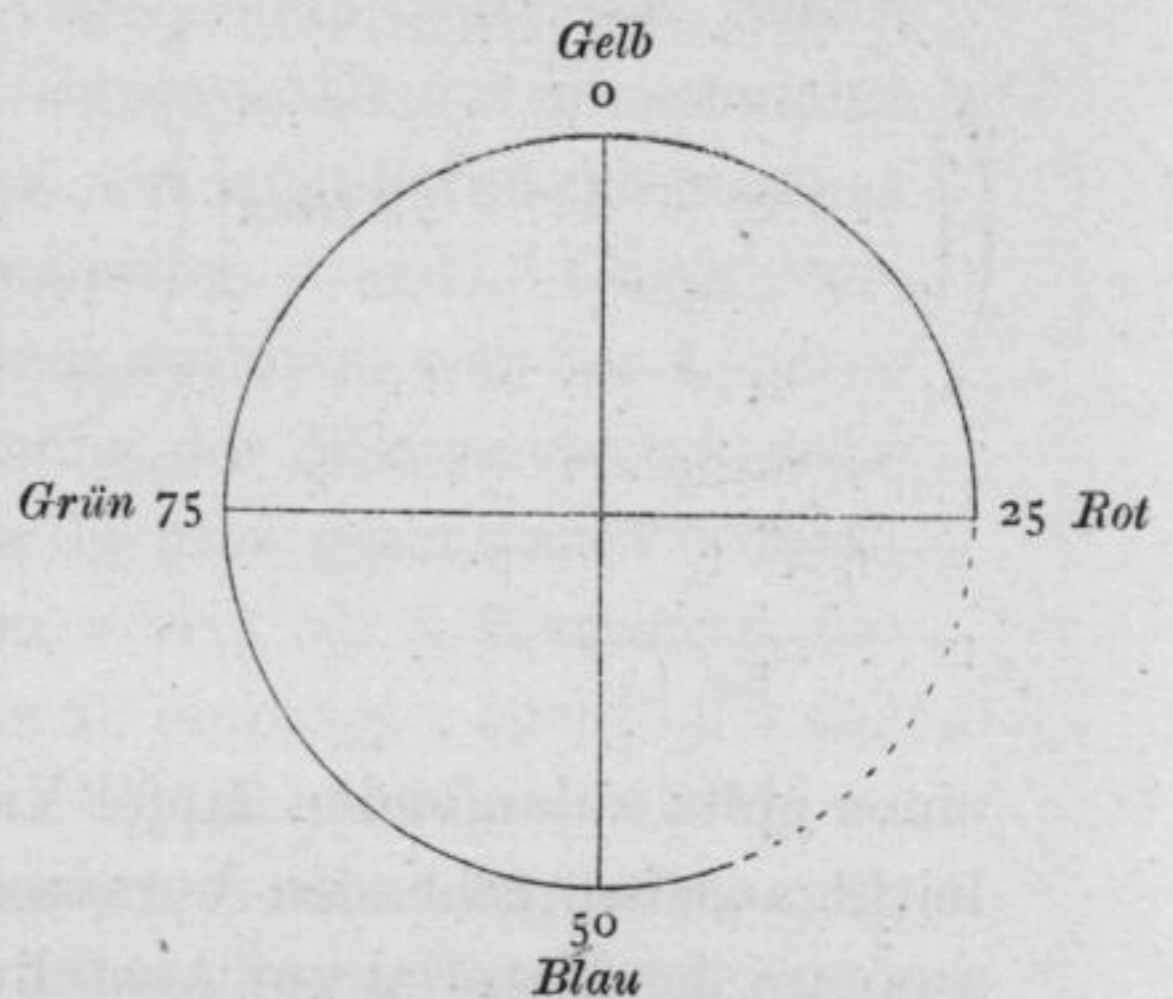


Fig. 4.

Rotviolett entfernen, so würde der übriggebliebene Teil des Kreises beim Vermischen notwendig nicht Weiß, sondern weißliches Grün ergeben.

Hieraus folgt unabweislich der Schluß, daß die Intensität derjenigen Spektralfarben, welche diesem Grün komplementär sind, also mit anderen Worten, der roten Farben am einen und der violetten am anderen Ende des Spektrums *größer* ist, als die der entsprechenden Farben im normalen Spektrum.

Hält man diesen Gesichtspunkt fest, so gelangt man zu einem sachgemäßen Verständnis der Lücke des Spektrums gegenüber dem Farbkreis. Ordnen wir nämlich die Spektralfarben in Gestalt eines kreisförmigen Bandes an, indem wir uns das Spektrum um einen Punkt gebogen denken und drücken wir durch die Breite des Bandes die Intensität der Farben im Spektrum aus, so kann dieses Band nicht überall gleich breit sein (Fig. 5a), sondern muß gemäß dem eben festgestellten Tatbestande, sich an beiden Enden, im Rot und im Violett, stark verbreitern (Fig. 5b). Diese Verbreite-

1) Eders Jahrb. f. Photogr. 1910.

rung muß soviel austragen, daß von ihr das gesamte Gebiet der Lücke gedeckt wird (Fig. 6).

Nun lassen sich bekanntlich die fehlenden Purpurtöne und zwar in gesättigter Form experimentell herstellen, indem man die beiden entgegengesetzten Enden zweier Spektren in geeigneter Weise übereinanderfallen läßt.

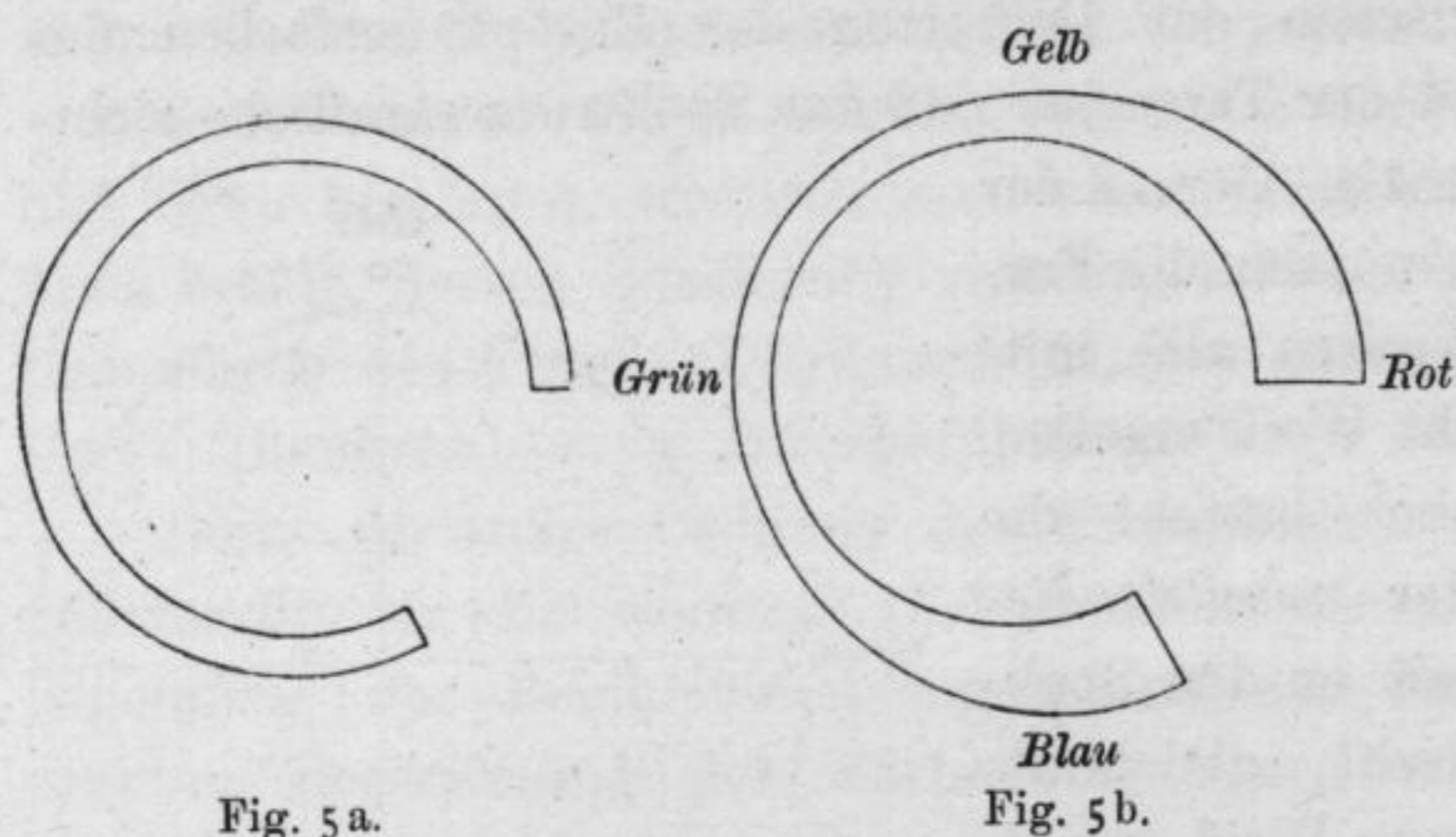


Fig. 5 a.

Fig. 5 b.

Wenn man daher vom roten Ende einen regelmäßig abnehmenden Zipfel Rot in die Lücke hineinklappt und ebenso vom violetten Ende

einen spitz zulaufenden Zipfel Violett bis zum Rot, so reichen unter leicht auszusprechenden Voraussetzungen diese beiden Zipfel gerade aus, um das Material zur Ausfüllung der Lücke im gesamten Farbkreise zu liefern. Denkt man sich demgemäß die beiden Zipfel, wie es in der Zeichnung angedeutet ist, in die Lücke hinüberschlagen, so ist gleichzeitig der Farbkreis vollständig gemacht und die konstante Breite der Farbengebiete, einer konstanten Intensität entsprechend, hergestellt.

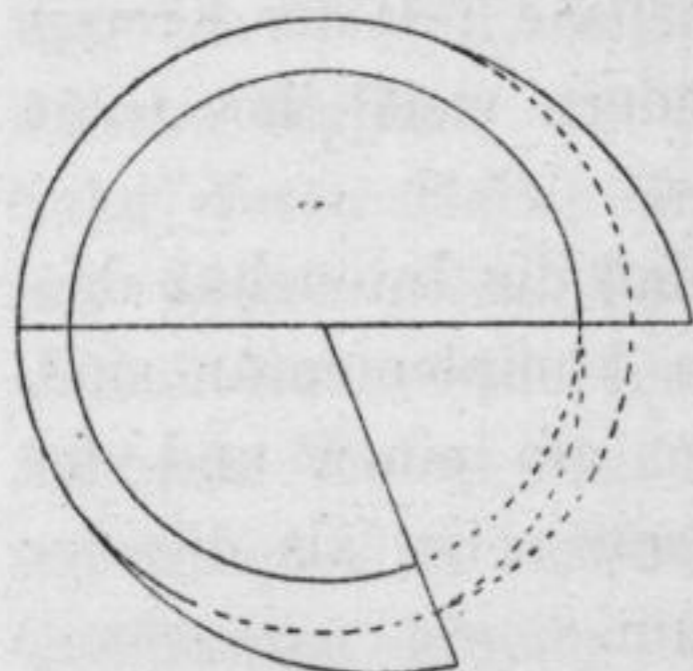


Fig. 6.

Tatsächlich sind die Verhältnisse nicht ganz so einfach, da auch im Grün ein Gebiet überschüssiger Intensität vorhanden ist, doch werden hierdurch diese Erwägungen grundsätzlich nicht geändert und es wird alsbald auf die dadurch bewirkten besonderen Verhältnisse eingegangen werden.

97. Farbkreis und Wellenlängen. Da für homogene Farben, wenigstens im Gebiete mittlerer Helligkeit der Farbton durch die Wellenlänge des entsprechenden Lichtes eindeutig definiert ist, so besteht ein erhebliches Interesse daran, die Beziehung zwischen den Wellenlängen und den gesättigten Farben des Farbkreises festzustellen. Beide sind grundsätzlich nichts weniger als identisch, da, wie oben nachgewiesen worden ist, gesättigte Farben durchaus nicht aus *homogenem* Licht bestehen, sondern aus je einem *Farbenhalb*.

Trotz dieser wesentlichen Verschiedenheit besteht aber für die Empfindung kein Unterschied zwischen homogenem spektralem Licht von genügender Lichtstärke und dem zusammengesetzten Licht der gesättigten Farben und die Ermittlung ihres gegenseitigen Verhältnisses ist demgemäß eine Aufgabe von vielfachem Interesse.

Die Feststellung der Beziehung zwischen den homogenen Strahlen und den Farben des Farbkreises wurde folgendermaßen experimentell ausgeführt. In einem Spektralapparat mit erheblicher Dispersion (RUTHERFORD-Prisma) wurde ein Okular mit schmaler Spaltblende angebracht, durch welche ein annähernd homogenes Stück aus dem Spektrum herausgeschnitten wurde. Durch vorheriges Ausmessen einer Anzahl von Spektrallinien war der Apparat geeicht worden, so daß aus der Ablesung der Mikrometerschraube auf die Wellenlänge des eingestellten Lichtes geschlossen werden konnte. Indem ich mir nun in Stufen von 5 zu 5 Nummern die Farben des Farbkreises möglichst genau einprägte, suchte ich das Gesichtsfeld des Spektralapparates mit gleichfarbigem Licht zu erfüllen, wobei die Einstellung durch wiederholtes Vergleichen mit dem zugehörigen Aufstrich aus dem Farbkreise erleichtert und nötigenfalls verbessert wurde. So konnten außer den Nummern 25 bis 47 (Hochrot bis Blauviolett) alle Farben des Farbkreises eingestellt werden und nach Ermittlung der zugehörigen Wellenlängen konnte man die Beziehung zwischen der Nummer im Farbkreise und der Wellenlänge des gleichaussehenden homogenen Lichtes zeichnerisch veranschaulichen. Fig. 7 stellt das Ergebnis dieser Untersuchung dar. Als Abszissen dienen die Nummern im Farbkreise, die wegen des zusammenhängenden Anschlusses an die Wellenlängen nicht von 0 bis 100 durchbeziffert sind, sondern von 40 über 100 bis 25. Als Ordinaten sind die Wellenlängen in Milliontel Millimeter aufgetragen worden.

Das äußerste Violett mit einer Wellenlänge von rund 400 entspricht ungefähr der Nummer 46 und wie bereits von verschiedenen Beobachtern bemerkt worden ist, ändert sich die Farbe mit zunehmender Wellenlänge zunächst nur sehr wenig, denn Nummer 50 entspricht einer Wellenlänge von 470. Die Linie verläuft also zunächst fast parallel der Ordinatenachse. Von 50 ab geht sie mit kurzer Krümmung in eine fast geradlinig ansteigende Strecke über, in welcher ein annäherndes gleiches Fortschreiten im Spektrum wie im Farbkreise erfolgt. Dieser Zustand besteht

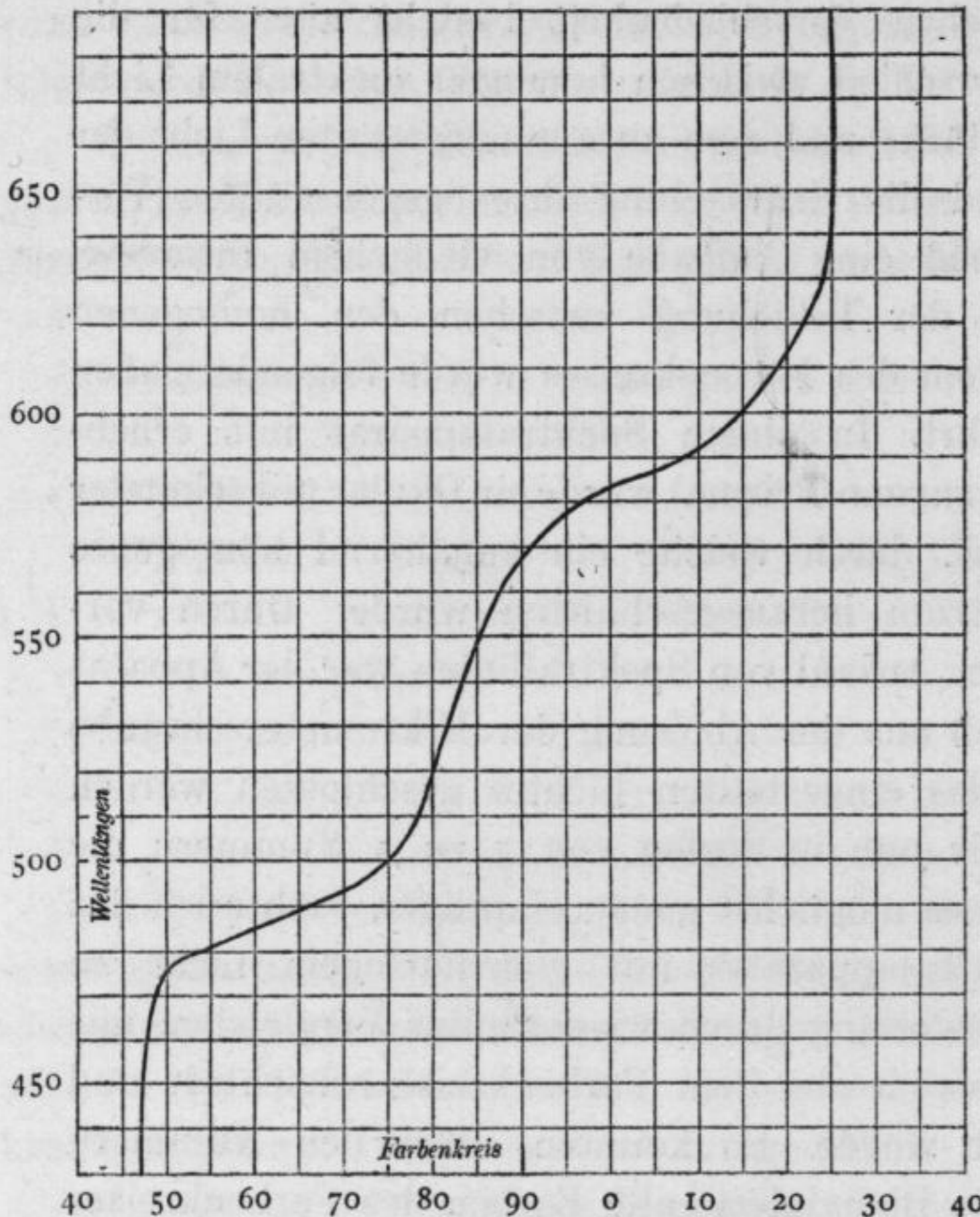


Fig. 7.

geradliniger schräger Anstieg, welcher eine regelmäßige Änderung der Wellenlänge mit der Stellung im Farbenkreise zum Ausdruck bringt. Dieses schreitet bis zur Nummer 20 fort, worauf bei einer Wellenlänge von rund 620 das gleichfalls wiederholt von den Beobachtern gekennzeichnete Gebiet des Spektralrot beginnt, wo eine weitere Änderung der Wellenlänge bis etwa 700 keine merkbare Änderung des Farbtones mehr bedingt.

98. Zusammenfassung. Übersieht man den ganzen Kurvenlauf, so erkennt man, daß zwei Gebiete regelmäßiger und einigermaßen proportionaler Beziehung zwischen Wellenlänge und Nummer im Farbenkreise vorhanden sind, welche drei Gebiete trennen, wo einer sehr starken Änderung der Wellenlänge nur ein geringes Fortschreiten im Farbenkreise entspricht, wo also breite Strecken des Spektrums fast genau in derselben Farbe erscheinen. Während dieser Umstand für die beiden Enden des Spektrums wiederholt bemerkt und hervorgehoben worden ist, tritt hier durch den Vergleich mit dem rationell eingeteilten Farbenkreise

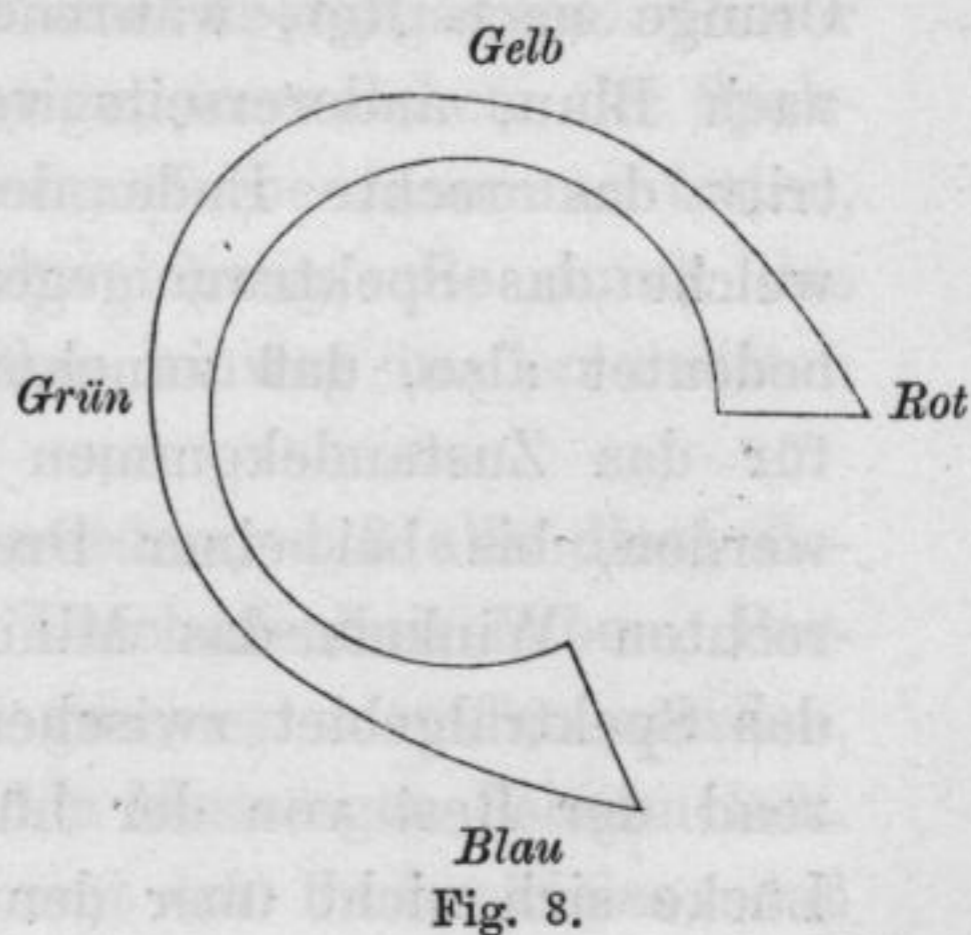
zwischen den Nummern 50 bis 80, d. h. von Ultramarinblau bis zu einem etwas gelblichen Grün. Zwischen 80 und 90, also im Grün, steigt die Kurve wiederum plötzlich aufwärts. Dies ist ein Ausdruck dafür, daß hier ähnlich wie im violetten Gebiete eine erhebliche Änderung der Wellenlänge stattfinden kann, ohne daß der Farbton eine entsprechende Änderung erleidet. Von 90 ab, im ausgeprägten Gelbgrün beginnt ein neuer, wiederum fast

die Tatsache in den Vordergrund, daß noch ein drittes, wenn auch engeres ähnliches Gebiet im Gelbgrün besteht, wo die Farbe fast unabhängig von der Wellenlänge ist.

Betrachtet man in Kenntnis dieser Tatsachen ein kurzes Spektrum, wie es beispielsweise in den üblichen Taschenspektroskopen vollständig innerhalb des Gesichtsfeldes übersehen werden kann, so überzeugt man sich, daß das Ergebnis der vorstehenden Analyse auch unmittelbar in die Erscheinung tritt. Das Spektrum zerfällt praktisch in drei Felder, ein rotes, ein gelbgrünes und ein ultramarinblaues, während die Übergänge zwischen diesen Feldern überaus schnell erfolgen und bei mäßiger Dispersion fast gar nicht in Gestalt besonderer Farbtöne empfunden werden.

Der Umstand drängt sich auf, daß diese drei ausgezeichneten Gebiete des Ultramarinblau, Gelbgrün und Hochrot einigermaßen den Grundfarben entsprechen, welche HELMHOLTZ in seiner Ausbildung der Theorie von YOUNG als die primären Farbempfindungen angesehen hat. Es scheint daher, daß die angegebenen Tatsachen eine bequeme und unmittelbare Deutung im Sinne dieser Farbentheorie gestatten. Denn es leuchtet unmittelbar ein, daß bei stetiger Änderung der Wellenlängen die beschriebenen Schwankungen der zugeordneten Farbempfindungen am einfachsten durch die Annahme gedeutet werden können, daß die so stark vorwiegenden Empfindungen Rot, Grün und Blau auf grund von Reizen fundamentaler oder primärer Natur erfolgen, während die zurücktretenden Zwischenfarben sekundäre Ergebnisse gemischter Reize sind.

99. Die drei Verdickungen. Im Anschluß an die Betrachtungen von § 96 werden wir nunmehr die Beziehung zwischen Spektrum und Farbkreis noch dahin ergänzen, daß auch im Gebiete des Gelbgrünen ein Übermaß an Intensität im Spektrum vorliegt und daher das Band der Fig. 5 a an dieser Stelle gleichfalls zu verbreitern ist. Daraus folgt, daß die Verbreiterung an den beiden Enden des Spektrums noch mehr austragen muß, als das Doppelte der normalen Breite, da von diesen Stellen aus das fehlende Gebiet nicht



nur in normaler Breite zu decken ist, sondern in übernormaler, damit der Verbreiterung im Gelbgrün das entsprechende Äquivalent geboten wird. In Fig. 8 ist dieses Verhältnis schematisch zur Darstellung gebracht, wobei die quantitativen Beziehungen nur grob angedeutet, nicht aber genau dargestellt worden sind, weil für die letzte Aufgabe hier die Voraussetzungen noch fehlen.

100. Der Farbenweiser. Um nun mit einem Blick die Verhältnisse sämtlicher möglicher Farbenhalbe und damit die Zusammensetzung sämtlicher gesättigter Farben im Farbkreise zu überblicken, stellt man sich zweckmäßig einen normalen Farbkreis durch Ausführung der erforderlichen Farbtöne experimentell her und ordnet die einzelnen Farben gemäß den wiederholt dargelegten Grundsätzen, indem oben Urgelb, im rechten Winkel dazu rechts Urrot, unten Blau und links Grün angebracht ist. Um den Mittelpunkt drehbar ist ein Stab angeordnet, welcher einen beweglichen Durchmesser darstellt und senkrecht zu ihm ein Radius, der *Zeiger*, welcher jeweils auf die Mitte desjenigen Farbenhalbes hinweist, das durch den beweglichen Durchmesser begrenzt wird.

Dann bezeichnet der Halbkreis, welcher durch die Enden dieses Durchmessers und die Spitze des Zeigers bestimmt wird, dasjenige Farbenhalb, durch dessen Gesamtwirkung die gesättigte Farbe zustande kommt, auf welche der Zeiger hinweist. Wird beispielsweise der Durchmesser horizontal gestellt, so daß der Zeiger nach oben weist, so erkennt man, daß alle Farben von Urrot über Gelb bis Blaugrün zusammenwirken, das Urgelb zu erzeugen, auf welches bei dieser Lage der Zeiger weist. Bewegen wir nun das System im Sinne des Uhrzeigers, so geht die Zeigerspitze von Gelb durch Orange nach Rot, während der Durchmesser einerseits von Rot nach Blau, andererseits von Grün nach Gelb wandert. Hierbei tritt das rechte Ende des Durchmessers in die Lücke hinein, welche das Spektrum gegenüber dem Farbkreise aufweist. Das bedeutet also, daß zunehmend kleinere Teile der Spektralfarben für das Zustandekommen der gesättigten Gesamtfarbe wirksam werden, bis bei einer Drehung des Systems um etwa $\frac{2}{3}$ eines rechten Winkels das Minimum erreicht ist. Hier ist nur noch das Spektralgebiet zwischen Gelb und Rot übrig geblieben, während der Rest von der Lücke eingenommen ist. Da indessen die Lücke sich nicht über den ganzen Quadranten erstreckt, sondern

dessen letztes Gebiet in der Nähe des Blau vom spektralen Violett gedeckt wird, so besteht das Urrot bereits aus zwei getrennten Farbanteilen, nämlich dem ersten Quadranten zwischen Gelb und Rot und andererseits demjenigen Teil des Violetts, welcher im Spektrum noch bis zum Punkte des Urblau vorhanden ist. Durch den letzten Umstand verliert das Urrot den gelblichen Schein, den es sonst wegen seiner Zusammensetzung aus Gelb, Orange und Rot haben müßte und es entsteht jenes charakteristische neutrale Rot, welches weder nach Orange noch nach Violett neigt. Dreht man das System weiter, so weist der Zeiger in das Gebiet der im Spektrum nicht vertretenen blauroten und violetten Farben, deren Bestandteile, wie schon das Urrot aus zwei im Spektrum voneinander getrennten Teilen zusammengesetzt sind. Indem der rote Teil immer mehr Gelb und Orange verliert, während der blaue Teil immer mehr ins blaugrüne hinübergeht, wendet sich die resultierende Farbe vom reinen Rot durch Violett bis zum Urblau. In diesem ganzen Teil von Rot bis in die Nähe des Urblau blieb die spektrale Lücke vollständig in dem Strahlengemisch, welches zur gesättigten Gesamtfarbe sich vereinigt, während im ersten Quadranten zwischen Gelb und Rot nur ein Teil der Lücke wirksam war. Wird der Zeiger weiter gedreht, so daß er das Gebiet vom Urblau bis zum Grün durchwandert, so wird die Lücke in den zusammensetzenden Farben des gesättigten Farbtones wieder geringer, bis schließlich der Zeiger auf Grün weist und die Lücke vollständig aus dem Farbenhalb verschwunden ist.

In dem nun folgenden vierten Quadranten bewegt sich das Farbenhalb ausschließlich durch Gebiete, die auch im Spektrum vertreten sind, die Lücke ist also aus dem Farbenhalb verschwunden und in das Gebiet der absorbierten Farbe übergegangen. Dieser vierte Quadrant ist demgemäß der einzige, in welchem die Spektralfarben lückenfrei zur gesättigten Gesamtfarbe zusammentreten, immer abgesehen von der kleinen Abweichung, die durch das Hineinragen der Spektralfarben über Blau hinweg in den zweiten Quadranten verursacht wird.

Es soll nochmals hervorgehoben werden, daß alle diese Betrachtungen zunächst nur annähernde Beschaffenheit haben. Persönlich bin ich der Meinung, daß sie genauer zutreffen werden, als sich aus den gegenwärtig vorliegenden Messungen belegen läßt. Doch bedingt das physiologische Element im Farbenkreise, daß

eine letzte Genauigkeit dieser Beziehung nicht zu erwarten ist. Denn da die individuellen Augen etwas verschiedenartige Farbkreise besitzen, bleibt demgemäß eine entsprechende Variationsbreite gegenüber den unverrückbaren Wellenlängen der Spektralfarben unvermeidlich. Wohl aber gestatten diese Betrachtungen die Hoffnung, ein normales Auge als ein solches definieren zu können, für welches die eben dargelegten Beziehungen in aller Strenge gelten. Daraus würde sich ein allgemein gültiger Maßstab für die Abweichungen eines jeden individuellen Auges von dieser objektiv definierten Norm ergeben.

Fünftes Stück.

Reinheit und Grau.

101. Allgemeine Begriffsbestimmung. Um jeden Farbton ordnet sich eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit von Abkömmlingen, die sämtlich verschieden aussehen, also nach unserer allgemeinen Begriffsbestimmung *verschiedene Farben* darstellen. Ihre Zugehörigkeit zu ein und demselben *Farbton* ist dadurch gekennzeichnet, daß sie sämtlich mit einer einzigen entgegengesetzten oder polaren Farbe vermischt neutrales Grau ergeben. Dieses Grau kann verschiedene Helligkeit haben und es können verschiedene Anteile der gemeinsamen Gegenfarbe erforderlich sein, um es zu erzeugen.

Hierdurch sind die zwei Arten der möglichen Mannigfaltigkeiten derartiger Abwandlungen gekennzeichnet. Erstens nämlich kann die *Reinheit* verschieden sein. Wir werden eine Farbe als umso reiner anerkennen, je mehr von ihrer Gegenfarbe erforderlich ist, um aus ihr neutrales Grau zu erzeugen. Hierbei ist es nicht maßgebend, wie hell oder dunkel das entstehende Grau ist, sondern maßgebend ist nur das Verhältnis zwischen der vorgelegten Farbe und der Menge der Gegenfarbe, die zur Neutralisation erforderlich ist.

Aber der Umstand, daß das entstehende Grau unabhängig von dem derart festgestellten relativen Reinheitsgrad variieren kann, läßt erkennen, daß hier noch eine zweite Mannigfaltigkeit besteht, indem nämlich bei ein und demselben Reinheitsgrad das zugesetzte *Grau* alle Stufen zwischen Weiß und Schwarz aufweisen kann.

102. Die drei Veränderlichen. Daraus ergibt sich der erste und allgemeinste Grundsatz der Lehre von der Zusammensetzung der Farben und demgemäß auch der Farbenanalyse, daß jede (bezogene) Farbe *drei* Mannigfaltigkeiten besitzt. Zunächst den *Farbton*, dem sie angehört, sodann die *Reinheit*, d. h. das Verhältnis zwischen reiner Farbe und zugesetztem Grau und drittens die Zusammensetzung

oder Helligkeit eben dieses *Grau*. Jede von den drei Veränderlichen kann sich unabhängig von den beiden anderen in dem ganzen Gebiete ihrer Möglichkeit bewegen. Dieses Gebiet der Möglichkeit ist für die Farbtöne der Farbenkreis, für die Reinheit das Gebiet zwischen reiner oder gesättigter Farbe, wie sie im vierten Stück definiert worden ist und der vollständig unbunten oder grauen Farbe, die durch ganz gleichförmige Vertretung aller sichtbaren Lichtarten gemäß der Zusammensetzung des weißen Sonnenlichtes gekennzeichnet ist. Für das *Grau* endlich liegt das Gebiet zwischen absolutem Schwarz und Weiß, wie diese im dritten Stück definiert worden sind.

Es hängt im übrigen von der gewählten Ausdrucksform ab, zwischen welchen Grenzen man die Reinheit zahlenmäßig variieren läßt. Definiert man sie als den Quotienten des bunten Anteils, geteilt durch den grauen Anteil, so kann die Reinheit offenbar zwischen Null und Unendlich variieren. Eine Farbe von der Reinheit Null ist irgend ein Grau, d. h. in dem Bruch $\frac{\text{Bunt}}{\text{Grau}}$ ist der Zähler gleich Null. Läßt man umgekehrt den Nenner gleich Null werden, d. h. soll der graue Anteil verschwinden, dann nimmt der Bruch den Wert Unendlich an. Zwischen diesen beiden Grenzen kann dann jede tatsächliche Zusammensetzung einer Farbe liegen.

Da aber eine derartige Rechnungsweise namentlich für die graphische Darstellung Unbequemlichkeiten mit sich bringt, so kann man an ihrer Stelle auch das Verhältnis der reinen Farbe zur Gesamtfarbe, die als Einheit dient, also den Quotienten $\frac{\text{Bunt}}{\text{Bunt} + \text{Grau}}$ zum Maße der Reinheit machen. Alsdann erscheint die Reinheit als ein echter Bruch, dessen äußerste Grenzen 0 und 1 sind. In dieser Form soll die Reinheit definiert und der Begriff weiterhin benutzt werden.

Ganz dieselben Betrachtungen gelten für das *Grau*. Dieses ist bestimmt durch das Verhältnis des weißen Lichtes, das von der fraglichen Fläche zurückgeworfen wird, zu dem weißen Licht, welches unter gleichen Beleuchtungsbedingungen von einer ideal weißen Fläche zurückgeworfen werden würde. Bei dieser Definition sind die äußersten Grenzen wiederum 0 und 1, indem 0 dem absoluten Schwarz, 1 dem absoluten Weiß zukommt und jedes Grau durch einen echten Bruch angedrückt wird.

Auch die andere Ausdrucksweise, welche eine Abstufung zwischen 0 und ∞ ergibt, kann für das Grau gegebenenfalls benutzt werden, indem man nämlich den weißen Anteil durch den nichtweißen Anteil, also den Bruchteil des remittierten Lichtes durch den Bruchteil des absorbierten Lichtes dividiert. Alsdann erhält reines Weiß den Zahlenwert Unendlich, während für reines Schwarz der Zahlenwert gleich Null wird.

Für das Grau gelten dieselben Erwägungen rechnen- und zeichnentechnischer Art, wie sie soeben für die Reinheit angestellt worden sind, und demgemäß wird die erstgegebene Definition weiterhin allgemein benutzt werden. Dies ist umso mehr geboten, als sie mit der Bezeichnungs- und Berechnungsweise übereinkommt, die im III. Stück bereits als aus der Natur der Sache sich ergebend angewendet worden ist. Zur Anwendung der geometrischen Reihe entsprechend dem FECHNERSchen Gesetz wird gleichfalls gelegentlich Anlaß sein, namentlich wenn es sich um die Verteilung der Farben in psychophysisch gleichen Abständen handelt, wie sie praktisch für den Farbatlas maßgebend sein muß.

103. Die Farbenmischung. Der LAMBERTSche Spiegel.

An früherer Stelle sind bereits die allgemeinen Grundsätze dargelegt worden, nach denen man additive Farbenmischungen ausführen kann. Die experimentelle Durchführung dieser Prinzipien hat bisher im wesentlichen drei verschiedene Apparate ergeben, die von verschiedener Bequemlichkeit und Tragweite sind und am zweckmäßigsten nebeneinander benutzt werden.

Der einfachste dieser Apparate ist der von LAMBERT bereits vor zwei Jahrhunderten angegebene durchsichtige Spiegel. Stellt man vertikal eine ebene Glasplatte auf und schaut von oben schräg auf diese nieder, so erblickt man im Gesichtsfelde einerseits den Teil der Unterlage, von dem das Licht durch die Glasplatte in das Auge gelangt, zweitens aber einen vorn liegenden Teil, dessen Bild hauptsächlich von der Vorderfläche, zum Teil aber auch von der Hinterfläche des Glases gespiegelt wird. Beide Orte sind symmetrisch um die Durchschnittslinie gestellt, welche die Verlängerung der Spiegelebene mit der Unterlage bildet. Bringt man nun an diese beiden Orte zwei gleichgeformte farbige Gegenstände, so werden die von beiden ausgehenden Strahlen gleichzeitig in das Auge befördert. Dieses erblickt in dem Gesichtsfelde der Glasplatte eine Mischung aus beiden Lichtern in einem Ver-

hältnis, welches im wesentlichen von dem Sehwinkel abhängt. Je größer dieser ist, umso stärker wiegt der reflektierte Anteil vor und umso geringer wird er durchgelassen. Dadurch also, daß man entweder die Entfernung der beiden Gegenstände von jener Symmetrielinie ändert oder, indem man die Gegenstände ruhen läßt, die Glasplatte dagegen in ihrer eigenen Ebene hebt und senkt und das Bild mit dem Auge verfolgt, kann man das Mischungsverhältnis der beiden Anteile innerhalb weiter Grenzen verändern. Da im allgemeinen der reflektierte Anteil des Lichtes bei bequemen Seh winkeln zu klein ist, so erweist es sich als eine Verbesserung, wenn man an Stelle des einzelnen Glases ein Paket von etwa 5 dünnen Gläsern nimmt, als welche ganz wohl starke mikroskopische Deckgläser von genügender Ausdehnung benutzt werden können. Ebensogut dienen natürlich Gläser anderer Art, wobei es im allgemeinen nicht viel darauf ankommt, daß sie exakt spiegeln, wohl aber sehr viel darauf, daß sie aus möglichst farblosem Glase bestehen, da natürlich die Eigenfarbe des Glases sich in der Durchsicht gesehenen Farbe vollständig zufügt, während sie für das reflektierte Licht nur zu einem Bruchteil zur Wirkung kommt und somit die Resultate einseitig beeinflußt. Der Apparat ist ungemein einfach und wohlfeil herzustellen.

Eine Form, welche ich praktisch gefunden habe, ist die folgende: Es wird aus fünf Glasplatten von 8×16 cm ein eng zusammenliegendes Paket gebildet und dieses senkrecht auf einem Grundbrett befestigt, welches am besten tiefschwarz angestrichen wird. Die zu vermischenden Farben werden in Gestalt von rund 3 cm breiten und 6 cm langen Abschnitten senkrecht zu den Glasplatten auf das Grundbrett gelegt und man kann nun, indem man das Auge höher oder tiefer stellt, ein ganzes Gebiet von Reflexionswinkeln vermöge der Länge der Glasstreifen übersehen. Will man die entstehende Farbe mit der anderer Aufstriche vergleichen, so benutzt man zwei gleiche Karten, indem man je eine neben beide Blätter legt, so daß die Farbe sowohl in der Durchsicht wie in der Spiegelung zur Wirkung kommt. Dadurch wird der von einer etwaigen Färbung des Glases verursachte Fehler ausgeglichen und ein genauerer Vergleich ermöglicht. Fig. 9 zeigt den einfachen Apparat; man wird zweckmäßig die Glastafeln länger wählen, als die Zeichnung angibt.

Wie man alsbald erkennt, ist der Winkel für das ganze so überschaute Gesichtsfeld nicht konstant, sondern wächst von oben nach unten, und zwar umso mehr, je näher das Auge steht. Demgemäß ist auch das Ergebnis der Mischung oder die erscheinende Summenfarbe nicht ganz konstant, sondern ändert sich um ein geringes in der Längserstreckung. Der Betrag ist indessen nicht groß und läßt sich noch weiter einschränken, wenn man durch eine einfache Blendvorrichtung dafür sorgt, daß nur ein kleiner mittlerer Teil des Gesichtsfeldes zur Betrachtung gelangt.

Um eine bestimmte Stellung, entsprechend einem bestimmten Mischungsverhältnis, leicht wiederzufinden, kann der Apparat ferner durch einen um die Symmetrieachse drehbaren Stab vervollkommen werden, an dem sich eine Augenblende mit ziemlich enger Öffnung und jene Blende

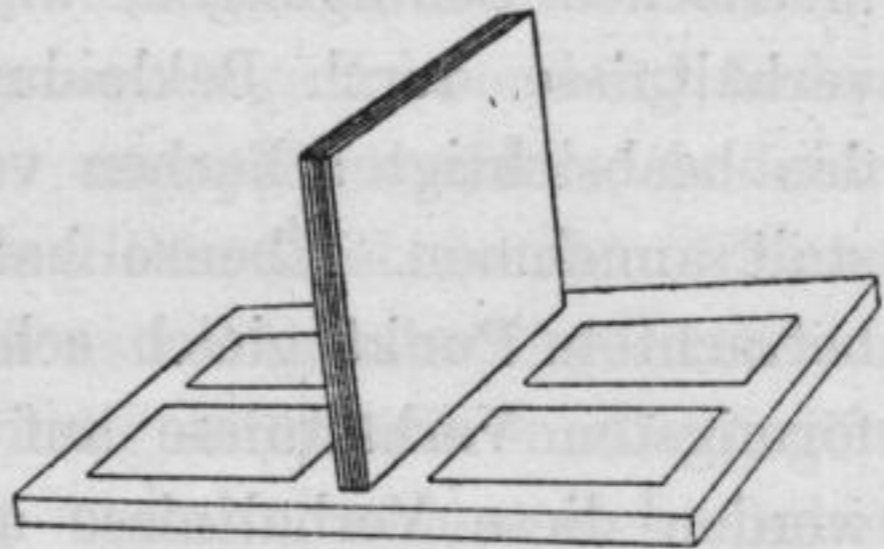


Fig. 9.

als Visiervorrichtung befindet. Der Stab dreht sich längs einer Gradteilung, an der er in beliebiger Stellung festgeklemmt werden kann.

Um die Winkeleinstellung zu quantitativen Messungen zu benutzen, ist die Anwendung der Reflexformel von FRESNEL für durchsichtige Mittel schwerlich genau genug, zumal bei der Verwendung mehrerer Glasplatten die Ausrechnung sehr unbequem wird. Empirisch kann man die Gradteilung dagegen auswerten, wenn man an die Stellen a und a' Normalweiß und ein Schwarz von bekannter Remission bringt und die Einstellungen notiert, bei welchen ein bestimmtes Grau entsteht, zu dessen Identifizierung man einen entsprechenden Aufstrich (vgl. S. 424) daneben nach b legt. Dadurch, daß man die Orte des schwarzen und weißen Blattes wechselt, erhält man zwei unabhängige Messungsreihen, die behufs Steigerung der Genauigkeit zur Mittelbildung verwendet werden können.

Der Apparat ist trotz seiner Einfachheit einer ausgedehnten Anwendung fähig und empfiehlt sich wegen der Wohlfeilheit seiner Herstellung und Leichtigkeit der Handhabung für die annähernden Messungen, welche in der Praxis bei weitem den größten Teil der vorkommenden Aufgaben zu lösen gestatten.

104. Der Farbenkreisel. Ein auf dem Prinzip der zeitlichen Vermischung beruhender Apparat ist seit bald zwei Jahrhunderten

als der Farbenkreisel bekannt. Grundsätzlich kann jede Rotationsfläche dazu benutzt werden, um auf ihr die zu mischenden Farben anzubringen; durch Drehung um die Rotationsachse wird dann jedesmal eine scheinbar ruhende Figur erzeugt, auf deren Oberfläche die Farben nach Maßgabe ihres Winkelumfanges zur Mischung gelangen. Praktisch kommen von allen möglichen Flächen nur zwei in Betracht, nämlich die *Zylinderfläche* und die *Kreisfläche*.

Die erste hat den Vorteil, daß die abgewickelte Zylinderfläche sich als ebenes Rechteck darstellt, und daß demgemäß die geometrischen Bedingungen, unter denen vorgeschriebene Mischungsverhältnisse durch Bekleidung der bestimmten Flächenteile mit den beabsichtigten Farben verwirklicht werden, die einfachste Gestalt annehmen. Ebenso hat der Zylinder den Vorzug, daß jeder betrachtete Punkt gleich schnell rotiert und daß somit die gleichförmigsten Verhältnisse auf der Oberfläche herrschen. Im Auge werden diese Verhältnisse allerdings andere, weil sich dort das Bild des Zylinders auf dem Augenhintergrund als Rechteck darstellt, wodurch die Bewegungsgeschwindigkeit eines Punktes durch dieses Bild nicht mehr konstant ist, sondern ein Geschwindigkeitsmaximum in der Mitte hat. Das LAMBERTSche Kosinusetz bewirkt ferner, daß bei einigermaßen normaler Beleuchtung das Bild der gedrehten Zylinderfläche als eine gleich helleuchtende Ebene erscheint und somit günstige Verhältnisse für die Beobachtung und den Vergleich darbietet. Die zu vermischenden Farben können in einfachster Weise auf ein Blatt Papier aufgetragen werden, das auf dem Zylinderumfang befestigt wird, wobei die durch die zum Festhalten dienende Einrichtung etwa bedingte optische Störung leicht unterhalb eines Prozents, also unterhalb der Fehlergrenze gehalten werden kann.

105. Die Drehscheibe. Trotz dieser mehrfachen Vorzüge ist die Ausführung des Farbenkreisels in der Form des Zylinders nur ausnahmsweise einmal praktisch geworden. Bei weitem die meisten derartigen Apparate beruhen auf der Rotation einer *ebenen* Kreisscheibe, auf welcher die zu mischenden Farben nicht nach Parallelkoordinaten wie auf der abgerollten Zylinderfläche, sondern nach Polarkoordinaten geordnet sind. Für die häufigste Aufgabe, nämlich zwei oder mehr Farben gleichförmig miteinander zu mischen, gestattet auch die Kreisscheibe eine einfachste Lösung, da man diese Farben nur als Sektoren anzuordnen braucht, deren Winkel

proportional dem beabsichtigten Anteil an der Gesamtwirkung gemacht wird. So benutzt man seit MAXWELL Kreisscheiben, die einen radialen Schlitz haben und so ineinander gesteckt werden, daß die beabsichtigten Sektoren einander zur vollständigen Ausfüllung des Kreises ergänzen.¹⁾

Was die technische Ausführung der Drehscheibe anlangt, so ist sie gegenwärtig leicht geworden, seitdem man zwei mit sehr schneller Rotation ausgestattete Apparate für andere Zwecke in größeren Mengen herstellt. Einerseits können die vielfältigen Formen von *Zentrifugen*, welche zur Trennung verschieden dichter Gemenge in der chemisch-technischen Analyse ausgiebige Anwendung finden, ohne Schwierigkeit für unsere Zwecke angepaßt werden. Andererseits hat man ein noch bequemerer Hilfsmittel in den kleinen elektrischen Motoren, bei denen die Konstruktionsbedingungen von selbst auf erhebliche Drehungsgeschwindigkeiten führen. Da gegenwärtig fast überall die Möglichkeit besteht, einen elektrischen Motor in Betrieb zu setzen, so sei auf die Form hingewiesen, in welcher man den Apparat als Farbenkreisel benutzen kann. Ein solcher Motor hat meist eine zylindrische Achse von 5 bis 10 mm Durchmesser und auf dieser eine Schnurscheibe oder ein Zahnrad. Es genügt nun die Kreisscheiben, welche man in Drehung versetzen will, mit einem Loche zu versehen, das genau auf die Achse paßt und sie mit Hilfe eines ausgebohrten Korkstopfens gegen die ebene Hinterlage zu drücken. Ist diese nicht groß oder eben genug, so wird zunächst noch eine ebene Metallplatte oder Pappscheibe von 5 bis 10 cm Durchmesser auf der Achse befestigt. Diese braucht nicht mehr als 1 cm vorzustehen. Die Reibung des aufgeschobenen Korkstopfens hält die farbigen Papierscheiben fest genug. Will man ein übriges tun, so kann man die Platte mit einem Überzug von Kautschuk versehen. Gegenüber der üblichen Schraubenmutter zum Festdrücken der Papiere hat der Kork den Vorzug, daß er sehr viel schneller entfernt, aufgesetzt und gelockert werden kann.

Die Drehscheibe hat nämlich den besonderen Nachteil, daß wenn irgend eine Änderung in der Einstellung der Farbscheiben

1) Ich habe die gleiche Erfindung als Knabe 1868 oder 1869 gemacht, als mir der Physiklehrer des Rigaer Realgymnasiums, G. SCHWEDER, erlaubte, mit der der Schule angehörigen Drehscheibe zu experimentieren. Es war meine erste selbständige Idee auf experimentellem Gebiete.

beabsichtigt ist, der Apparat jedesmal stillgesetzt und der Mechanismus zum Festhalten der Scheiben gelockert werden muß. Dann muß erst wiederum das Maximum der Geschwindigkeit hergestellt werden, bevor man beobachten kann, denn die Erfahrung hat gezeigt, daß wenn inzwischen das Auge die Farbscheiben im Gesichtsfelde hat, erhebliche Störungen in der Beurteilung hervorgerufen werden.

Dadurch verliert die Drehscheibe an Brauchbarkeit sehr erheblich. Es gibt deshalb Konstruktionen, welche gestatten, das Winkelverhältnis der Sektoren auch während der Drehung zu verändern. Doch machen diese den Apparat so verwickelt, daß sie keine allgemeine Anwendung gefunden zu haben scheinen.

Ein besonderer Vorzug der Drehscheibe, der von keinem der anderen beschriebenen Apparate geteilt wird, ist die Möglichkeit, mehr als zwei Farben in willkürlichen Verhältnissen zur Mischung zu bringen. Sowohl der LAMBERTSche Spiegel, wie der gleich zu beschreibende Polarisations-Farbenmischapparat sind darauf beschränkt, das nur je *zwei* Farben vermischt werden können. Allerdings ist dafür bei beiden Apparaten die Möglichkeit vorhanden, das Verhältnis dieser beiden Bestandteile stetig und unter fortlaufender Beobachtung zu ändern. Hieraus ergeben sich alsbald die Fälle, in welchen die Drehscheibe zu bevorzugen ist, nämlich wenn jedenfalls mehr als zwei Komponenten gegeneinander verändert werden sollen.

Die Anzahl solcher Komponenten ist bei der Drehscheibe grundsätzlich unbegrenzt, wenn man auch praktisch über vier kaum jemals hinauszugehen Anlaß hat. Dadurch, daß man zwei Gruppen von geschlitzten Kreisblättern, deren Radien etwa in einem Verhältnis 2 : 3 stehen, gleichzeitig anwendet, hat man die Möglichkeit, zwei unabhängige Mischungen mit beiderseits veränderlichen Komponenten in bezug auf die resultierende Farbe miteinander zu vergleichen. Derartige Aufgaben lassen sich bei den anderen Apparaten nur dadurch lösen, daß man an Stelle der stetig veränderlichen zweiten Mischung eine feste Farbe anwendet, die man nach Bedarf gegen in kleinen Sprüngen abgestufte andere vertauscht.

106. Der Polarisationsfarbenmischer. Der Polarisationsfarbenmischer oder abgekürzt *Pomi* ist derjenige Apparat, welchen ich bei vergleichender Untersuchung der verschiedenen Formen als den förderlichsten und bequemsten befunden habe. Seine Genauig-

keit ist für rein photometrische Aufgaben geringer als die des Halbschattenphotometers, für chromometrische dagegen übertrifft er die Drehscheibe hauptsächlich durch die Stetigkeit der Einstellungen und die bequeme Möglichkeit, die Messungen beliebig zur Erhöhung der Genauigkeit zu vervielfältigen. Der Apparat, dessen Prinzip vielfältig angewendet worden ist¹⁾, besteht aus einer Kombination eines Wollastonprismas mit einem Nikolschen Prisma. Die zu vermischenden Farben werden in Gestalt von Aufstrichen oder auch durchsichtigen Objekten, die man von unten beleuchtet, nebeneinander angebracht und durch ein Wollastonprisma betrachtet, welches wie bekannt von jedem Objekt zwei Bilder entwirft, deren Winkelentfernung durch die Konstruktion des Prismas bedingt wird und rund 3 bis 5° beträgt. Man ist also immer in der Lage, die Größe der Objekte, ihre gegenseitige Entfernung und die Entfernung des Prismas von ihnen so anzuordnen, daß die zu vermischenden Farbfelder, welche kongruente Begrenzung haben, genau übereinanderfallen.

Eine nicht zu behebende Unbequemlichkeit des Wollastonprismas ist die, daß es nicht achromatisch gemacht werden kann, so daß die zu vermischenden Farbfelder an den seitlichen Grenzen Zerstreuungsfarben aufweisen. Da man aber stets die Anordnung so treffen kann, daß die zu vergleichenden Felder nicht nebeneinander liegen, wo sie in Zerstreuungsfarben zwischen ihnen erscheinen, sondern rechtwinklig dazu, wo keinerlei chromatische Abweichung eintritt, so hat dieser Nachteil nicht viel zu sagen.

Das Wollastonprisma allein ermöglicht die Vermischung zweier Felder zu gleichen Anteilen, da es jedes einzelne Feld in zwei Bilder von gleicher Lichtstärke verwandelt. Bereits in dieser einfachen Form kann man eine Anzahl Aufgaben unmittelbar lösen und es gibt Mittel, durch geeignete Variationen der Felder fast alle Probleme mit diesem feststehenden Mischungsverhältnis von 1:1 zu erledigen. Indessen kommt man doch in den meisten Fällen schneller zum Ziel, wenn man durch Anbringung eines Nikolschen Prismas, durch welches man das Mischfeld betrachtet, die Variationsmöglichkeiten dahin erweitert, daß die beiden Felder in jedem beliebigen Lichtstärkeverhältnis zwischen 0 und 1 zusammenwirken.²⁾ Allerdings

1) Pogg. Ann. 110, 265.

2) Der Apparat ist, wie ich nachträglich finde, für den Zweck der Farbmischung in unvollkommener Form, nämlich ohne Nikol, von BEZOLD, Pogg. Ann. 158,

wird dadurch die Gesamtlichtstärke auf die Hälfte herabgesetzt, da das Nikolsche Prisma insgesamt die Hälfte des eintretenden Lichtes durch die totale Reflexion an der Trennungsschicht beseitigt. Doch hat sich dieser Nachteil als nicht hinderlich erwiesen, da er gar keine Schwierigkeit macht, dem Objekt eine genügend starke Beleuchtung zukommen zu lassen.

Das Verhältnis, nach welchem das Nikolprisma die Bilder des Wollastonprismas abschwächt, hängt von dem Winkel zwischen den beiderseitigen Hauptstücken ab; daher ist jenes drehbar über einem Teilkreise angebracht, dessen Teilung in ganze Grade und Ablesung mit Hilfe einer Lupe, so daß man Zehntelgrade schätzen kann, bei weitem ausreichen, um Ablesefehler erheblich unter den Einstellungsfehler zu bringen. Dieser beträgt je nach den Objekten 0,5 bis 1° und läßt sich, vermöge der leichten und schnellen Wiederholung einer Einstellung nach Bedarf vermindern.

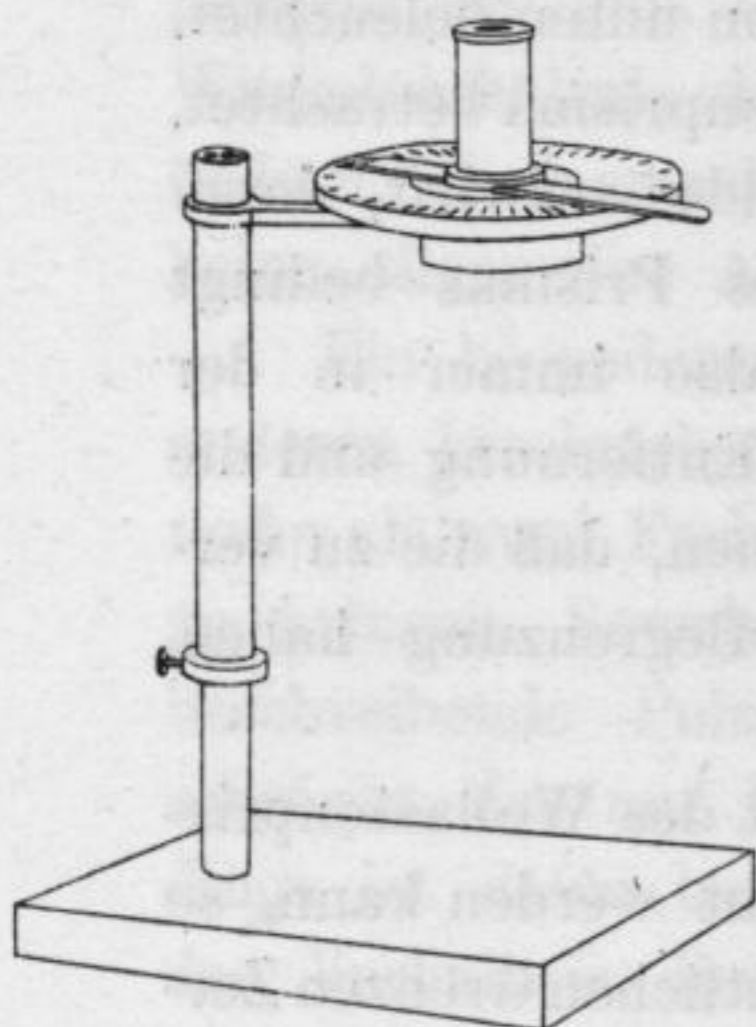


Fig. 10.

Fig. 10 stellt den Apparat dar, wie ich ihn seit Jahr und Tag benutze.¹⁾ Der Teilkreis mit den beiden Prismen ist auf einem Träger

angebracht, vermöge dessen er sich in größerer oder geringerer Entfernung von dem Grundbrett des Apparates, auf welches die Objekte gewöhnlich zu liegen kommen, befestigen läßt. Im oberen Stück befindet sich das drehbare Nikol; die Kreisscheibe trägt das feststehende Wollastonprisma und darunter ist noch eine aufgeschobene Kappe angebracht, durch welches sich ein Brillenglas zur Herstellung eines scharfen Gesichtsfeldes befestigen läßt. Haben die zu vergleichenden Felder etwa 3 cm Breite und liegen sie dicht nebeneinander, so bedingt eine mittlere Höhenlage des Prismen-

606. 1876, angegeben worden, der sachgemäß seine Vorzüge gegen die Drehscheibe hervorhob. An die Anbringung des Nikol hat er zwar gedacht (S. 610), sie aber nicht erprobt, sondern Methoden angegeben, um für gewisse Zwecke dies Hilfsmittel entbehrlich zu machen. Auch ich hatte anfangs mit dem Wollastonprisma allein gearbeitet, mich aber bald überzeugt, daß die stetige Veränderlichkeit des Mischungsverhältnisses durch das Nikol zur Lösung vieler Aufgaben unentbehrlich ist. Dies gilt z. B. für die fundamentale Bestimmung des Farbtones durch Aufsuchen der Ergänzungsfarbe, da nur in einem bestimmten, von Fall zu Fall verschiedenen Mischungsverhältnis neutrales Grau entsteht.

1) Er ist von SCHMIDT und HAENSCH, Berlin angefertigt worden.

systems das Zusammenfallen der beiden Felder. Der Nullpunkt des Kreises, welcher mit derjenigen Lage der Prismen zusammenfallen muß, bei welcher das eine der beiden Bilder des Wollastonprismas vollständig ausgelöscht wird, läßt sich am bequemsten dadurch kontrollieren, daß man ein schwarzes Blatt auf weißer Unterlage durch den Apparat betrachtet und das Nikol so einstellt, daß die beiden Bilder gleich hell werden. Alsdann muß der Zeiger, wenn die Einstellung richtig war, auf 45° zeigen. Man wiederholt die Einstellung zehn- oder zwanzigmal, nimmt das Mittel und verbessert dann um die Abweichung des Mittelwertes von 45° alle Ablesungen, die man mit dem Apparat macht. Noch bequemer ist es, wenn man den Zeiger verstellbar einrichten läßt, um ihn so festzustellen, daß die Mittelstellung genau auf 45° fällt.

Die Theorie der Kombination, welche beispielsweise in ganz derselben Weise beim Königschen Photometer Anwendung findet, ist so bekannt, daß ich sie nicht hier zu wiederholen brauche. So sei nur folgendes kurz bemerkt. Ist a der Bruchteil des Lichtes, welches von dem linken und b der Bruchteil, welcher von dem rechten Objekt zu dem gemeinsamen mittleren Bilde beigetragen wird, so ist der Quotient $a : b = \operatorname{tg}^2 w$, wo w der Winkel ist, um den der Nikol aus der Nullage gedreht worden ist. Handelt es sich, was im allgemeinen seltener vorkommt, um das Verhältnis $\frac{a}{a+b}$, also um den Bruchteil des linken Anteils in dem Gesamtlicht, so ist dieser Bruchteil gleich $\sin^2 w$.

Was die möglichen Fehler anlangt, so ist zu bemerken, daß die beiden Bilder des Wollastonprismas nicht vollkommen gleichlichtstark sind, so daß kleine Abweichungen von dieser theoretischen Beziehung bestehen. Sie lassen sich genügend ausgleichen, wenn man die Beobachtung dadurch vervollständigt, daß man die beiden Objekte, deren Farbe gemischt werden, nach rechts und links vertauscht. Die alsdann abgelesenen Winkel müssen von 90° abgezogen werden, um die obenstehende Formel anzuwenden. Da die optischen Erscheinungen, welche der Apparat bedingt, sich im Kreise viermal wiederholen, da mit anderen Worten die Mannigfaltigkeit der möglichen Einstellungen sich in einem einzigen Quadranten abspielt, so kann man, wenn man ein übriges tun will, die Beobachtung durch alle vier Quadranten fortsetzen. Im allgemeinen pflegen aber die anderen Versuchsfehler der hier in Betracht kommen-

den Messungen so groß zu sein, daß eine derartige Vervielfachung der Arbeit sich nur in Ausnahmefällen lohnen würde.

Die mittels des Apparates zu bearbeitenden Farben, die wohl in den meisten Fällen in Gestalt von Papierblättern vorliegen werden, schneidet man, wie erwähnt auf das Format von 3 : 6 cm. Handelt es darum, das Resultat einer Farbmischung nicht nur zu betrachten, sondern auch zu vergleichen, so legt man den zu vergleichenden

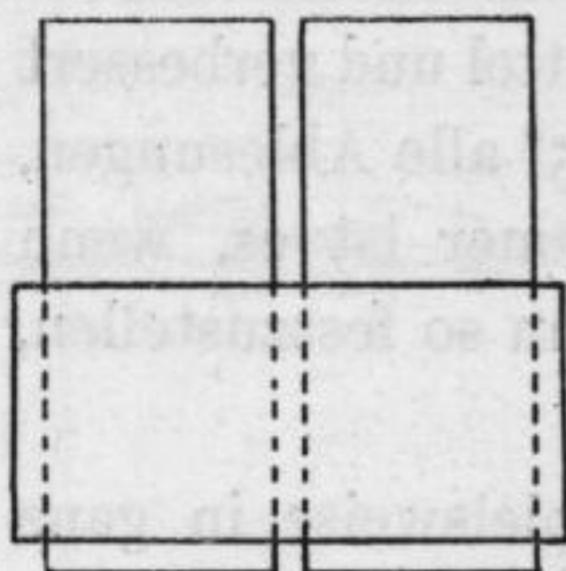


Fig. 11.

Aufstrich, der sich auf einem Blatte gleiches Formates befindet, quer über die beiden nebeneinanderliegenden Blätter, deren Farben vermisch werden sollen (Fig. 11). Dadurch entstehen von diesem Querblatt zwei nebeneinanderliegende Bilder, die sich in der Mitte zur Hälfte überdecken und an dieser Stelle deshalb bei jeder Lage des Nikols unveränderte Helligkeit und unverändertes Aussehen bewahren. Dieses konstante Feld grenzt nach oben ohne Farbensaum an das veränderliche, in welchem die beiden Farben sich mischen und durch Bewegung des Nikols zur Übereinstimmung mit dem Querblatt gebracht werden.

107. Die isochrome Gruppe. Von allen Fällen der Farbmischung ist der einfachste der, daß nur der eine Bestandteil der Mischung dem Farbkreise angehört, der andere aber schwarz, grau oder weiß, mit einem Worte *unbunt* ist. Es entsteht auf diese Weise jene Gruppe von Abkömmlingen eines bestimmten Farbtons, welche so verschiedenartig sie auch aussehen mögen, das gemeinsame Kennzeichen haben, mit einer und derselben Farbe (ihrer Ergänzungsfarbe) gemischt neutrales Grau zu ergeben. Wir wollen die Gesamtheit derartiger Farben die *isochrome Gruppe* des betreffenden Farbtones nennen und uns mit ihren hauptsächlichsten Eigenschaften und Beziehungen bekannt machen.

Experimentell läßt sich eine isochrome Gruppe dadurch herstellen, daß man zunächst ein möglichst reinfärbiges Pigment als Ausgangspunkt benutzt und damit einen Aufstrich herstellt. Dieser wird in einem der eben geschilderten Farbmischapparate (am einfachsten im Pomi) mit einem unbunten Bestandteil in allen Verhältnissen gemischt. Was dabei als Mischprodukt zu tage tritt, ist unter allen Umständen ein Glied der isochromen Gruppe. Denn da dieses Produkt aus der betreffenden Farbe und Grau additiv gemischt ist, so kann der Anteil der Farbe, welcher noch darin

enthalten ist, unter allen Umständen durch einen entsprechenden Betrag ihrer Ergänzungsfarbe zu Grau neutralisiert werden und an diesem Grau kann der im übrigen vorhandene Betrag von Grau zwar die Helligkeit, nicht aber die Freiheit von jeder bunten Farbe, also die Reinheit des Grau ändern.

Man erkennt alsbald, daß eine *zweifache* Mannigfaltigkeit solcher Mischungsverhältnisse möglich ist. Nehmen wir zunächst als Ausgangsfall die Aufgabe, aus den farbigen Aufstrich und normalem Weiß alle möglichen Mischungen herzustellen, so wird man die beiden Blätter von 3×6 cm nebeneinander auf das Grundbrett des Pomi legen und das Nikolprisma durch alle Stellungen von 0 bis 90 Grad bewegen. In dem mittleren Felde wird sich dann die Farbe des Aufstriches mit zunehmenden Mengen Weiß mischen und indem man die Winkel einstellt, für welche $\sin^2 w$ die Werte 0,1, 0,2, 0,3 bis 0,9 hat, kann man das Aussehen aller Abkömmlinge der fraglichen Farbe studieren, welche aus 0,1 Weiß mit 0,9 Farbe, und 0,2 Weiß mit 0,8 Farbe usw. zusammengesetzt sind. Um die Ausführung dieser Versuche bequemer zu machen, sind in der nachfolgenden Tabelle die betreffenden Winkel gegeben.

w	$\sin^2 w$	w	$\sin^2 w$	w	$\sin^2 w$
18,4°	0,100	39,2	0,400	56,8	0,700
26,6	0,200	45,0	0,500	63,4	0,800
33,2	0,300	50,8	0,600	71,6	0,900

Was man hierbei sieht, erinnert im Großen und Ganzen denjenigen, der Malerfarben zu handhaben gewöhnt ist, an die Erscheinungen, welche man bei zunehmend dünnerem Auftrage des farbigen Pigments erhält. Nur wird der erfahrene Maler konstatieren, daß die Produkte der optischen Mischung von denen des dünnen Auftrages im allgemeinen doch etwas verschieden ausfallen. Der Farbton ist in den meisten Fällen nicht genau derselbe, sondern neigt je nach der Art des benutzten Farbstoffes zu benachbarten Farbtönen. Und außerdem ist unverkennbar, daß die Produkte der optischen Mischung viel weniger *rein* aussehen, als die bei der maltechnischen Behandlung erhaltenen.

Um sich hiervon zu überzeugen, stellt man beispielsweise einen Versuch mit Karmin an, indem man einerseits einen kräftigen Auftrag dieses lebhaften Farbstoffes optisch mit Normalweiß mischt und andererseits dünnere Aufträge herstellt, die man in der durch

Fig. 10 gekennzeichneten Weise quer über die beiden zu mischenden Blätter legt, um sie mit dem Mischprodukt zu vergleichen. Dreht man dann das Nikol so weit, daß ungefähr die gleiche Helligkeit hergestellt wird, so erweist sich das Produkt der optischen Mischung unverkennbar trüber und grauer, als der dünne Auftrag ist.

Dasselbe wird beobachtet, wenn man nicht Wasser-, sondern Öltünchen benutzt und die Aufhellung entsprechend dieser Technik durch Vermischung mit weißem Pigment herstellt. Immer sind die Produkte der unmittelbaren Mischung viel reiner im Farbton, als die möglichst ähnlich hergestellten Ergebnisse der optischen Mischung.

108. Das Schwarz in der „reinen“ Farbe. Dies führt zu folgendem Schluß. Da die optischen Mischungen zu der vorgelegten Farbe nichts hinzufügen, als reines Weiß, während doch das Mischprodukt augenscheinlich reichlich Grau enthält, so kann dieses Grau nirgendwo herkommen, als aus einem *Schwarz, welches in dem ursprünglichen Auftrag enthalten ist* und durch die optische Mischung mit Weiß Grau ergibt. Dies bestätigt sich, wenn man statt eines starken Auftrages einen halbwegs verdünnten von hellerer Farbe herstellt. Eine solche Farbe gibt dann bei optischer Mischung mit Weiß deutlich *reinere* aufgehellte Farben, zum Zeichen, daß er weniger Schwarz enthält.

109. Mischungen mit Schwarz. Diese sind die hauptsächlichsten Erscheinungen, welche man beim Vermischen einer dunklen Farbe mit Weiß beobachtet. Stellt man entsprechende Versuche an, indem man die „gesättigte“ Farbe mit möglichst tiefem *Schwarz* vermischt, so beobachtet man wesentlich verschiedene Erscheinungen. Das erforderliche Schwarz stellt man am einfachsten her, indem man eine dünne Pappe mit bestem Seidensammet überzieht und daraus Täfelchen von den gewohnten Dimensionen schneidet. Noch idealer kann man das Schwarz mit einem innen geschwärzten Kasten herstellen, in den man eine Öffnung von 3×6 cm schneidet. Entsprechend der Kleinheit dieser Öffnung braucht der Kasten auch nicht besonders groß zu sein; 5 cm Höhe bei 10×10 cm Grundfläche sind vollkommen ausreichend, wenn man den Boden mit schwarzen Seidensammet bedeckt. Man kann einen solchen Kasten bequem auf dem Grundbrett des Pomi handhaben.

Die Mischprodukte nun, welche man aus einem kräftigen Farbauftrag und absolutem Schwarz erhält, erweisen sich als eine Reihe

von tiefen und „satt“ aussehenden Farbtönen¹⁾, welche nicht den Eindruck machen, als wären sie unrein. Sie sehen vielmehr reichfarbig aus bis fast bis zu dem Punkte, wo die Erkennbarkeit der bunten Farbe neben dem überwiegenden Schwarz verschwindet.

Wiederholt man die Versuche mit dünneren Aufträgen, so erhält man weniger schön aussehende oder „stumpfe“ Schwarzmischungen.

Die Gesamtheit der Erscheinungen erweist sich als spiegelbildlich symmetrisch zu den Weißmischungen, d. h. die Mischungen mit Schwarz sehen umso schönfarbiger aus, je kräftiger der ursprüngliche Farbauftrag war und umso stumpfer oder grauer, je dünner er war oder je mehr Weiß die Farbe enthält.

Die Erklärung ist offenbar genau dieselbe, wie im ersten Falle. Diejenigen durch starke Aufträge erzeugten Farben, welche wir gewöhnlich rein oder gesättigt nennen, enthalten neben der reinen Farbe mehr oder weniger bedeutende Anteile von Schwarz, dagegen kein oder wenig Weiß. Denn die matte oder trübe Farbe, die durch optische Vermischung heller Aufträge mit Schwarz entsteht, kann ihre Ursache nur in dem Weiß haben, das in diesen vorhanden ist. Je reiner und tiefer die Mischfarben mit Schwarz erscheinen, umso weniger Weiß ist in der Farbe enthalten.

110. Namen gemischter Farben. Ähnliche trübe Farben erhält man aus allen mehr oder weniger rein aussehenden Farben, wenn man sie mit *Grau* mischt. Demgemäß wollen wir alle Farben, welche erkennbare Mengen Grau enthalten, grundsätzlich *trübe Farben* nennen. *Klare* Farben sind dagegen solche, welche neben der reinen bunten Farbe entweder nur reines Schwarz oder nur reines Weiß enthalten. Erstere sollen *dunkelklare*, letztere *hellklare* Farben heißen.

111. Reinste Farben. Diese Tatsachen zwingen uns, unsere Vorstellungen von dem Aussehen einer möglichst *reinen* Farbe einer starken Revision zu unterziehen. Von der technischen Handhabung der Pigmente her sind wir gewohnt mit dem Aussehen des unvermischten Pigmentes den Begriff der „reinen“ Farbe, dieses Wort auch im psychophysischen Sinne genommen, zu verbinden. Während dies in einzelnen Fällen (nämlich bei gelben und roten deckenden Pigmenten) annähernd zutrifft, ist es sicherlich falsch in solchen Fällen wie Karmin oder Preußischblau, wo der Charak-

1) Vgl. ROSENSTIEHL, Journ. de Physique 7, 12. 1876.

ter des Pigmentes der eines durchsichtigen Stoffes, einer sogenannten *Lasurfarbe* ist. Die Farbe des reinen Pigments läßt sich ja an den Farbentäfelchen der Wasserfarbe oder aus einem herausgedrückten Tropfen der Ölfarbe beobachten. Solche reine Pigmente sehen nahezu schwarz aus; ihre Farbe enthält, optisch genommen, viel mehr Schwarz, als Rot oder Blau. Tatsächlich geben stärkste Aufstriche bei ihrer optischen Vermischung mit Weiß kaum eine Spur des bunten Farbtones zu erkennen, sie erzeugen graue Mischungen mit leisen Anwandlungen im Sinne der Pigmentfarbe.

Denkt man sich diese Tatsachen bis zu den äußersten Möglichkeiten entwickelt, so ergibt sich folgendes: Das ganz konzentrierte Pigment sieht schwarz aus oder ist diesem äußersten Punkt nahe. Je verdünnter der Aufstrich wird, umso mehr tritt zunächst die Farbe hervor; sie wird *reiner*. Dieses geht bei zunehmender Verdünnung aber offenbar nicht bis ins unbegrenzte weiter, denn das letzte Ende des Verdünnens ist das reine Weiß, d. h. eine Farbe, in welcher der bunte Anteil nicht mehr meßbar und erkennbar ist. Daraus geht hervor, daß bei irgend einer *mittleren* Verdünnung die Farbe des Aufstriches am reinsten sein wird, und daß die Reinheit nach beiden Seiten, sowohl bei tief wie bei blaß gefärbten Aufstrichen abnimmt.

112. Konzentration und Farbreinheit. Um diese Überlegung alsbald in eine experimentelle Form zu bringen, stellt man sich eine Lösung irgend eines Farbstoffes her, der im konzentrierten Zustande dunkel ist, im verdünnteren aber eine möglichst reine Farbe zeigt. Als Beispiel diene *Malachitgrün*, das in vierprozentiger Lösung wie früher beschrieben auf Zeichenpapier aufgetragen, einen sehr dunklen, fast schwarzen Überzug gibt. In einer Reihe von Bechergläsern verteilt man je 50 cbcm reines Wasser und mischt in dem ersten 50 cbcm der zweiprozentigen Farbstofflösung mit dem Wasser. Dann werden von der gleichförmig gemachten Lösung 50 cbcm herausgenommen und mit der nächsten Wassermenge vermischt. In dieser Weise fährt man fort bis etwa zur zwölften Verdünnung, wodurch man eine Reihe von Lösungen erhält, in denen der Gehalt nach aufsteigenden Potenzen von $1/2$ oder negativen Potenzen von 2 abnimmt. Eine derartige Stufenleiter hat die Eigenschaft, annähernd gleichabständige Farben zu ergeben. Man stellt mit all diesen Lösungen grüengefärbte Papiere her und hat nun die Möglichkeit, den Einfluß der Verdünnung

auf die Farbe des Pigments mit den vorhandenen Hilfsmitteln zu studieren.

Legt man zunächst kleine Blätter der Aufstriche voneinander etwas getrennt auf einen schwarzen Grund und betrachtet aufmerksam den Charakter der Farben, so wird man sich ohne Schwierigkeit überzeugen, daß die stärksten Aufstriche tatsächlich sehr viel Schwarz enthalten und die verdünnteren zunächst zunehmend reinfarbiger werden. Ebenso kann man von dem weißen Ende beginnend das allmähliche Verschwinden des weißen Anteils durch bloße Schätzung erkennen. Die beiden Betrachtungsreihen führen dann mehr oder weniger bestimmt auf einige Mittelglieder hinaus, denen man die kräftigste Farbenentwicklung zuzuschreiben geneigt sein wird. Diese Schätzung wird allerdings in hohem Maße beeinträchtigt durch die Kenntnisse, welche man von der Beziehung zwischen Konzentration und Farbstärke hat und führt daher fast mit Notwendigkeit dahin, einen zu konzentrierten Aufstrich als den farbenreinsten anzusehen.

Die Frage, ob es ein objektives Meßhilfsmittel gibt, um die Reinheit festzustellen, ist bisher kaum jemals gestellt und wenn gestellt, wohl meist zweifelhaft oder negativ beantwortet worden. Hie und da finden sich zerstreut in der Literatur einzelne Andeutungen, welche in dem Lichte der alsbald darzulegenden Betrachtungen als eine Vorausnahme der quantitativen Messungen der Reinheit oder Sättigung angesehen werden können.

113. Quantitative Neutralisation. Ein erster Weg, diese Aufgabe lösen, läßt sich mit Hilfe des Pomi finden. Es ist nicht schwer zu irgend einem mittleren Grün aus der beschriebenen Reihe das Purpurrot zu ermitteln, welches es zu reinem Grau neutralisiert. Man legt beide Farben auf dem Pomi nebeneinander und unten quer dazu einen Streifen von mittlerem Grau, etwa dem Buchstaben *G* entsprechend. Durch die passende Einstellung des Nikols sucht man die gemischte Farbe dem Grau möglichst nahe zu bringen und beurteilt nach dem danebenliegenden Normalgrau, ob man das Purpurrot röter oder blauer nehmen muß, um jede Spur einer einseitigen Färbung aufzuheben. Diese Arbeit gelingt am schnellsten, wenn man sich von vornherein über den ganzen Farbenkreis mit etwa 100 nach zunächst willkürlichen aber nahe nebeneinandergrenzenden Stufen abgetönten Farbaufträgen versehen hat. Ist das komplementäre Purpurrot gefunden, so kann man für jeden

grünen Aufstrich den Winkel feststellen, bei welchem das neutrale Grau erscheint. Man muß hierbei das Blatt mit dem Normalgrau häufig wechseln, da die Farbe der konzentrierten Aufträge natürlich ein viel dunkleres Grau gibt, als die der verdünnteren. In jedem Fall aber kann man feststellen, welcher Bruchteil des Purpurrot erforderlich ist, um das vorliegende Grün zu neutralisieren.

Stellt man eine solche Reihe von Messungen an, so findet man entsprechend dem, was vorher grundsätzlich dargelegt worden war, daß nur kleine Beträge Purpur zur Neutralisierung von konzentriertem Grün erforderlich sind. Der Anteil Purpur und demgemäß der Winkel, unter dem das Nikol eingestellt werden muß, wächst dann anfangs schnell, später langsamer und erreicht einen Maximalwert, indem bei noch weiter gehender Verdünnung wiederum weniger Purpur erforderlich ist, um das neutrale Grau zu erzeugen.

Diese Versuche werden ein wenig dadurch gestört, daß der Farbton des Grün innerhalb des ganzen Gebietes nicht ganz konstant bleibt und daß demgemäß das resultierende Grau bei den stärkeren Aufträgen etwas gelblich, bei den schwächeren etwas bläulich ausfällt. Indessen sind die Unterschiede der Einstellung bei wechselnder Konzentration so groß, daß jene Unsicherheit weit überdeckt wird und die Grundtatsache ohne jeden Zweifel zur Anschauung kommt.

Indem man die erhaltenen Anteile Purpur (die tg^2 der Winkel), welche zur Neutralisation erforderlich waren, in ein Koordinatensystem einträgt, dessen Abszissen durch die Stufen der Verdünnungen, also die Exponenten von $1/2$ gegeben sind, erhält man die Unterlagen, um eine stetige Kurve für die ganze Erscheinung zu zeichnen und aus ihr den Maximalpunkt noch etwas sicherer zu bestimmen, als aus der bloßen Betrachtung der Winkelwerte oder ihrer Tangentenquadrate.

114. Charakter der reinsten Farben. Die auffallendste Tatsache, welche dem Anfänger auf dem Gebiete bei derartigen Untersuchungen entgegentritt, ist die, daß der Farbton, welchen derartige Messungen als den reinsten ergeben, durchaus nicht überall den entsprechenden subjektiven Eindruck macht. Vielmehr wird jeder Maler oder Kolorist, dem solche Aufstriche zum ersten Male als der reinste bezeichnet werden, dagegen protestieren und erklären, daß sie viel zu blaß und farblos seien. Dies gilt für alle Farben mehr oder weniger, wenn auch der Widerspruch im blauen und

grünen Gebiet sehr viel auffallender ist, als im warmen Teil des Farbenkreises.

Die Lösung dieses Widerspruches zwischen Gefühlsurteil und objektiver Messung liegt in folgendem Umstand. Es ist bereits bei der schwarz-weißen Reihe betont und erklärt worden, daß und warum erhebliche Anteile Schwarz, die man dem idealen Weiß zufügt, kaum eine erkennbare Änderung in der Wirkung dieses Weiß als Farbe ausüben, während umgekehrt die kleinsten Spuren Weiß, die man dem idealen Schwarz (so weit es sich verwirklichen läßt), hinzufügt, alsbald ein überaus deutliches Vergrauen und eine leichte Erkennbarkeit der Gegenwart dieses Weiß beim Vergleich mit dem idealen Schwarz eines Dunkelkastens bewirken. In ganz ähnlicher Weise, wenn auch weniger stark (und zwar umso schwächer, je mehr sich die betreffende Farbe der gelben nähert) wirken Beimischungen von Weiß und Schwarz auf irgend eine reine Farbe. Während ziemlich erhebliche Mengen von Schwarz das Aussehen der reinen Farbe nicht wesentlich ändern und Beträge, welche 50 Prozent und mehr übersteigen, nur (wenn die Gegenwart von Weiß ausgeschaltet ist) die resultierende Farbe „tiefer“ oder „satter“, wie sie die Maler nennen, machen, wirken bereits verhältnismäßig geringe Mengen Weiß sehr deutlich auf das Aussehen der Farbe, indem sie diese heller und „leerer“, weniger farbig erscheinen lassen. Gleiche Prozente Schwarz oder Weiß haben also weit verschiedene psychologische Wirkungen und dadurch wird bewirkt, daß gemischte oder unreine Farben, welche in gleichem Maße einerseits durch Schwarz, andererseits durch Weiß verunreinigt oder gebrochen sind, bei weitem nicht den Eindruck gleicher Reinheit machen.

Es handelt sich hier also um ganz ähnliche grundlegende Verschiedenheiten, wie wir sie an den beiden Enden der Grauleiter kennen gelernt haben und wir müssen den Einfluß, welchen Schwarz, Grau oder Weiß auf das Aussehen einer Farbe bei gegebenem Reinheitsgrade ausüben, erst vielfach durch Erfahrung kennen gelernt haben, um mit dem Anblick der betreffenden Mischfarbe richtige Vorstellungen über ihre Zusammensetzung und über ihren Reinheitsgrad zu verbinden. Eine Übung in solchem Urteil kann umso weniger vorhanden sein, als ja bisher überhaupt keine zahlenmäßige Kenntnis weder eines relativen (wie ihn die eben beschriebenen Versuche ergeben) noch eines absoluten Reinheitsgrades (zu dessen Messung wir weiter unten übergehen werden) bestand.

115. **Herstellung reiner Farben.** Die bisherig geführten Betrachtungen geben offenbar eine Möglichkeit, aus unvermischten Pigmenten durch Verdünnung mit Weiß solche Mischungen herzustellen, deren Farbe unter allen, die sich aus dem Pigment erzielen lassen, die reinste ist oder die wenigste Beimischung von Schwarz, Weiß oder Grau enthält. In der Reihe der stufenweise verdünnten

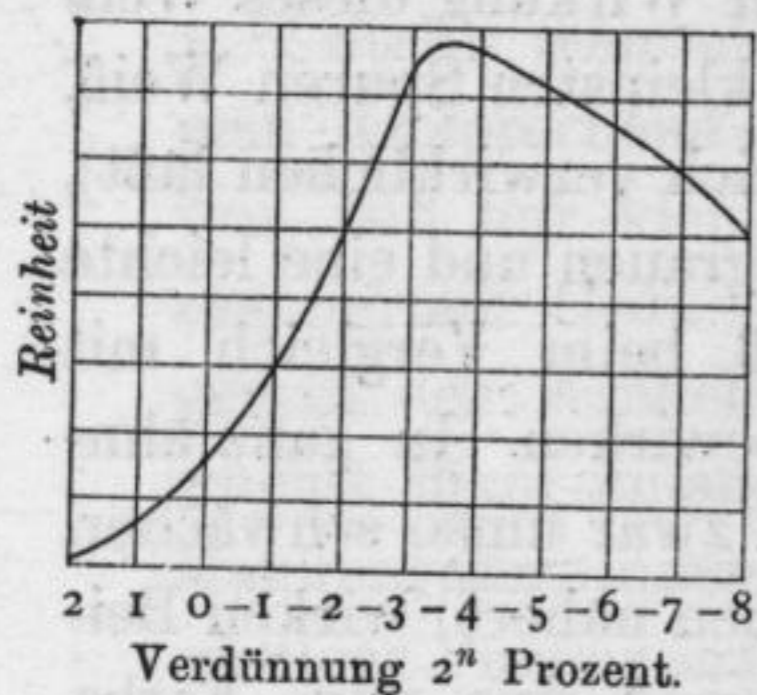


Fig. 12.

Aufträge von Malachitgrün ist es 2^{-3} bis 2^{-4} , der durch die beschriebene Methode mit dem Pomi sich als die reinste erweist. Fig. 12 stellt die graphische Zusammenfassung der Beobachtungen dar und läßt erkennen, daß die wahrscheinlichste Zusammensetzung für den reinsten Auftrag zwischen der 3. und 4. Potenz von $1/2$ liegt. Stellt man demgemäß eine Lösung von 0,1 Prozent Malachitgrün her, so gewährt diese das Mittel, in

beliebigen Mengen grüne Aufträge anzufertigen, welche das reinste Grün zeigen, das man mit diesem Pigment herstellen kann.

Ähnliche Versuche lassen sich mit allen anderen Pigmenten durchführen. Indem man die reinsten Aufträge, die man aus verschiedenen Farbstoffen gleichen Farbtons erhält, miteinander vergleicht, kann man alsdann mit großer Sicherheit denjenigen Farbstoff ausfindig machen, der unter allen die reinste Farbe gibt. So erweist sich z. B. Äthylgrün dem Malachitgrün gegenüber als deutlich reiner.

Allerdings läßt sich hier das Verfahren der Kompensation mit der Gegenfarbe nur sehr beschränkt anwenden, da jede Abweichung des Farbtones auch eine neue Gegenfarbe bedingt, deren Reinheit als neue Unbekannte erscheint. Somit ist das Verfahren streng genommen auf die jeweilige isochrome Gruppe beschränkt. Indessen hat das Auge desjenigen, der mit der Mischung und Wirkung der Farben aus der malerischen Technik bekannt ist, ein genügend scharfes Urteil um größere und geringere Reinheit an verschiedenen, nicht zu entfernten Farbtönen zu unterscheiden.

In dieser Weise habe ich aus der Fülle der von der gegenwärtigen Farbstoffindustrie in unabsehbarer Mannigfaltigkeit hergestellter Pigmente dank der freundlichen Hilfe der Firmen: *Farbwerke vormals Bayer, Aktiengesellschaft für Anilinfabrikation und Badische Anilin- und Sodafabrik*, die mir die farbschönsten aus ihren Pigmenten z. T. in reicher Auswahl zur Verfügung stellten,

eine Anzahl von Farbstoffen ausgewählt, die das Maximum an Farbreinheit darstellen, das sich mit den bisherigen Mitteln erreichen läßt. Hierbei habe ich bewußt auf andere wünschenswerte Eigenschaften, insbesondere Lichtehtheit verzichtet, weil es sich zunächst nur um die Frage handelte, wie weit man mit den gegenwärtigen Hilfsmitteln in der Reinheit gelangen kann. Die Entscheidung dieser Frage wird bei der kurzen Belichtungsdauer, welche die beschriebenen Arbeiten erfordern, durch Mangel an Lichtehtheit der Pigmente nicht gestört.

116. Basische und saure Farbstoffe. Für die Herstellung der Aufstriche, welche oben geschildert worden ist, nämlich die Behandlung von Zeichenpapier mit gelösten Pigmenten, war noch folgende Schwierigkeit zu überwinden. Die organischen Farbstoffe zerfallen bekanntlich in die beiden Gruppen der basischen und der sauren Farbstoffe, welche die leicht erklärliche Eigentümlichkeit haben, daß zwar die Glieder jeder einzelnen Gruppe untereinander in beliebigen Verhältnissen mischbar sind, ohne daß besondere chemische Vorgänge eintreten, daß aber die Pigmente beider Gruppen miteinander häufig einen unlöslichen Niederschlag erzeugen, durch welchen die Farbenwirkung nahezu aufgehoben wird, da er infolge der ungemein starken Lichtabsorption gewöhnlich fast schwarz aussieht. Es ist also notwendig, da nicht für jeden Farbton im ganzen Farbkreise ein eigener Farbstoff gewählt werden kann, also die Zwischenstufen durch physische Mischung hergestellt werden müssen, den ganzen Farbkreis entweder aus lauter basischen oder aus lauter sauren Farbstoffen zusammenzustellen. Dies ist zwar im allgemeinen tunlich, sogar in mehrfacher Weise; es zeigt sich aber, daß unter den gelbroten und roten Farbstoffen die sauren die farbschönsten sind, während für Violett und Blau das umgekehrte gilt. Im Grün kann man etwa gleichwertige Vertreter beider Gruppen finden.

Die gleiche Schwierigkeit kommt auch für die andere Technik in Betracht, daß man die fraglichen Pigmente in Wasser gelöst und unter Zusatz eines kolloiden Stoffes wie Stärkezucker oder Dextrin von weißem Saugpapier aufnehmen läßt, wodurch Aufträge erhalten werden, deren Herstellung erheblich einfacher und daher schneller ist, als die auf Zeichenpapier.

117. Farblacke. Von diesen Einwänden frei ist eine dritte technische Möglichkeit, welche auf der Herstellung von Farblacken und entsprechenden Pigmenten beruht. Unter Farblacken versteht

man unlösliche chemische Verbindungen von kolloider Beschaffenheit zwischen den organischen Farbstoffen und gewissen farblosen (unter Umständen auch bunten) Bestandteilen, welche man auf weißen Pigmenten niederschlägt, so daß eine feste Lösung aus beiden entsteht. Derartige „Lacke“ aus künstlichen Farbstoffen werden in größtem Umfange hergestellt, um in der Tapeten- und Buntpapierfabrikation verwendet zu werden und die Farbindustrie hat seit längerer Zeit darauf acht gegeben, ihre Produkte auch auf ihre Eignung für die Herstellung der Lacke zu untersuchen.

Grundsätzlich läßt sich angeben, daß die sauren Farbstoffe im allgemeinen durch Verbindung mit mehrwertigen Metallhydroxyden in dem unlöslichen kolloiden Zustand übergeführt werden können. Als solche Hydroxyde sind seit langem die dreiwertigen des Aluminiums, Antimons und Eisens, das vierwertige des Zinns und einige andere für die natürlichen organischen Farbstoffe benutzt worden. An diese schließen sich für die künstlichen noch die Hydroxyde von Blei und Zink an. Für die basischen Farbstoffe dienen gleichfalls mehrfach hydroxydierte Substanzen, die aber vorwiegend dem organischen Gebiet entnommen sind. Am längsten dient für diesen Zweck das *Tannin*, welches das Kondensationsprodukt einer dreifach hydroxylierten Benzoesäure ist und die Eigenschaft hat, mit den meisten basischen Farbstoffen unlösliche Niederschläge zu bilden. Erhöht wird diese Eigenschaft noch durch die Mitwirkung des Antimonoxyds, welches meist in Gestalt von Brechweinstein zur Reaktion gebracht wird. Beide Stoffe verbinden sich zu einem in Wasser unlöslichen farblosen kolloiden Niederschlage, der die Fähigkeit der Bindung basischer Farbstoffe in erheblich erhöhtem Grade besitzt. Demgemäß hört in vielen Fällen, wo Tannin nur unvollständig fällt, durch Zusatz von Brechweinstein alsbald das „Bluten“ auf. Die Wirkung läßt sich noch dadurch steigern, daß ein letzter kleiner Zusatz von Tannin nach dem Brechweinstein vorgenommen wird.

An die Stelle des Tannins ist in neuerer Zeit die *Harzseife* getreten, d. h. eine Auflösung des Gemisches hochmolekularer Säuren, welche in dem Kolophonium des Tannenhharzes vorliegen, in einem Alkali. Diese Harzseife erscheint als ein zäher sirupartiger Stoff von schwach bräunlicher Farbe, der von vielem Wasser hydrolytisch gespalten wird und dabei einen Niederschlag der Harzsäure gibt, während er sich mit mäßigen Wassermengen homogen verdünnen läßt. Die Harzseife läßt sich teils allein, teils unter Zu-

satz von Chlorbariumlösung zur Fällung fast aller basischer Farbstoffe benutzen und liefert dabei im allgemeinen farbreinere Produkte als Tannin und Brechweinstein.

Eine besondere Rolle unter den sauren Farbstoffen spielen die zahllosen sulfonierten Pigmente, welche ursprünglich basischer Natur waren und durch die Einführung einer oder mehrerer Schwefelsäurereste einen vorwiegend sauren Charakter erhalten. Diese werden meist als schwerlösliche Bariumsalze verlackt, zeigen aber oft die Eigenschaft, daß die nicht komplexen Bariumsalze doch noch merklich löslich sind. Auch hier kann man die Fällung in vielen Fällen durch einen Zusatz von Tannin vervollständigen, welches sich mit den intakt gebliebenen basischen Resten des Farbstoffes verbindet. In gleichem Sinne und vielfach noch besser und vollständiger wirkt die Harzseife, welche mit dem Bariumsalz für sich einen kolloiden unlöslichen Niederschlag in ganz ähnlicher Weise erzeugt, wie dieses bei Tannin und Antimonoxyd der Fall ist.

118. Theorie der Füllfarben. Vollständig kann die Theorie der Pigmente, welche man mit derartigen unlöslichen kolloiden und starkgefärbten Niederschlägen herstellt, erst an späterer Stellen auseinander gesetzt werden. Hier muß die Hindeutung genügen, daß man vor allen Dingen die Funktionen dieses Niederschlages selbst und die des weißen (oder bunten) *Trägers*, auf welchem er aufgelagert ist, sorgfältig unterscheiden und trennen muß. Der Niederschlag allein würde eine Lasurfarbe ähnlich wie Berlinerblau oder Karmin sein und daher für sich selbst kein lebhaft gefärbtes, sondern ein dunkles, in vielen Fällen völlig schwarz aussehendes Pigment darstellen. Eine reine Färbung tritt erst auf, wenn dieser Stoff in entsprechend dünner Schicht auf einem möglichst vollständig remittierenden weißen Grunde, also auf Körnern von idealem Weiß ausgebreitet ist.

Hierbei kommt alles auf die Dicke der Schicht an. Ist sie zu groß, so verliert das sowohl beim Durchgehen bis zum weißen Träger, wie beim Zurückgehen von diesem Träger bis zum Auge zweimal der Absorption ausgesetzte weiße Licht zu viel von seinem Bestande. Dann bleibt erheblich weniger als ein Farbenhalb übrig und die entstehende Farbe ist demgemäß reichlich mit Schwarz gemischt. Wird der Überzug dünner, so tritt das Schwarz zugunsten der reinen Farbe zurück und es gibt offenbar für jeden kolloiden Pigmentniederschlag eine optimale Schichtdicke, bei welcher der

schwarze Anteil in der entstehenden Farbe fast verschwunden ist, während ein weißer Anteil sich noch nicht zu erheblichem Betrage betätigt. Wenn die Absorptionsgebiete der verschiedenen Farbstoffe vollständig scharf begrenzt wären, so würde es auch eine ganz bestimmte Schichtdicke geben, die weder vermehrt noch vermindert werden dürfte. Da dies aber nicht der Fall ist, so treten bereits weiße Anteile in der zurückgeworfenen Farbe auf, bevor der schwarze Anteil verschwunden ist. An die Stelle des scharfdefinierten Punktes der größten Reinheit tritt ein mehr oder weniger in die Breite gezogener Übergang, in welchem zwar die Helligkeit der Farbe ziemlich starke, ihre Reinheit aber nur geringfügige Änderungen erleidet. Dies ist eine getreue Wiederholung der Verhältnisse, wie sie uns bereits bei dem Auftrage durchsichtiger Pigmentschichten auf weißem Papier (§ 115) entgegengetreten waren, nur daß in dem hier vorliegenden Falle an Stelle des weißen Papiers der weiße Träger der Farblacke tritt.

Es sind deshalb bei der Herstellung derartiger Pigmente zwei Funktionen technisch zu trennen. Diesen Gesichtspunkt hat man bisher bei der Herstellung der Lackfarben nicht beachtet und daher auch nicht in seiner technischen Bedeutung verwertet. Die eine Funktion ist die Überführung des Farbstoffes in eine kolloide und daher gleichförmig durchsichtige unlösliche Verbindung, die ganz wie ein Lasurpigment als farbiger Überzug auf den weißen Körnern des „Trägers“ wirken soll. Die zweite Funktion ist die des *Trägers*, nämlich des weißen Pigmentes, dessen Körner den fraglichen Überzug erhalten sollen. Dieser muß daher ganz andere optische Eigenschaften haben, das Verlackungsmittel, durch welches das lösliche Pigment unlöslich und kolloid gemacht wird. Während nämlich das Verlackungsmittel die Aufgabe hat, aus dem Pigment einen amorphen durchsichtigen Überzug von *geringem* Brechungsvermögen zu machen, der das Licht behufs bester Absorption ungespiegelt durchtreten läßt, hat der Träger umgekehrt die Funktion, das Licht so vollständig wie möglich zurückzuwerfen, muß also mit *starker* Lichtbrechung ausgestattet sein.

Bisher hatte man meist die beiden Funktionen miteinander vermischt. Die ältesten derartigen Pigmente, Karminlack, Krapplack, Florentinerlack usw. enthalten beispielsweise das Fällungsmittel Aluminiumhydroxyd und als Träger dient eine weitere, zur Fällung nicht erforderliche Menge desselben Aluminiumhydroxyds,

indem man für die Herstellung weit mehr Alaun verwendet, als zur vollständigen Fällung des Pigments erforderlich ist. Nun besitzt Aluminiumhydroxyd keineswegs die Eigenschaften, die eben für den Träger als maßgebend erkannt wurden, denn sein Brechungskoeffizient ist niedrig und es reflektiert deshalb das weiße Licht nur unvollkommen.

Demgemäß sind auch die entsprechenden Lacke kaum brauchbare Pigmente, außer zu Lasurzwecken. Sie müssen erst mit irgendeinem weißen Farbstoff gemischt werden, wenn sie als deckende Pigmente dienen sollen. Hierbei lassen sich aber die oben angegebenen günstigsten Verhältnisse nicht erzielen, da durch die mechanische Mischung natürlich keine regelmäßige Bekleidung der weißen Körnchen mit Pigment bewerkstelligt werden kann, diese vielmehr an vielen Stellen ungedeckt sich an der Zusammensetzung der resultierenden Farbe beteiligen, und somit der Farbe eine weiße Beimischung geben und sie weniger gesättigt machen, als anderweit erreichbar ist.

119. Lithopon als Träger. Diese Unzulänglichkeiten verschwinden und man erhält Pigmente, die unmittelbar als Deckfarben verwendet werden können, wenn man die Verlackung der organischen Farbstoffe bei Gegenwart eines weißen Trägers bewirkt, der gut „deckt“ oder das Licht gut reflektiert, und auf dessen Körnchen sich der kolloide Farblack regelmäßig ausbreiten kann. Die Technik benutzt aus bestimmten, hier nicht zu erörternden Gründen hauptsächlich gemahlene Schwerspat und daneben gefälltes Bariumsulfat. Für die hier vorliegenden Zwecke haben sich beide nicht bewährt. Der gemahlene Schwerspat verlangt verhältnismäßig dicke Schichten, um einen deckenden Auftrag zu erlangen, während die Korngröße des gefällten Bariumsulfates so gering ist, daß man mit seiner Hilfe überhaupt nur schwierig deckende Aufträge erlangt. Ich habe deshalb als Träger für die kolloiden Lacke einen anderen weißen Farbstoff gewählt, der gleichfalls zum größeren Teil aus Bariumsulfat besteht, aber wesentlich bessere deckende Eigenschaften als die genannten Formen desselben durch die besondere Art der Herstellung und durch die Beimischung des mit einem hohen Brechungskoeffizienten ausgestatteten Zinksulfids besitzt. Der Farbstoff führt den Namen *Lithopon*. Er wird durch die gemeinsame Fällung von Bariumsulfat und Zinksulfid aus Lösungen von Zinksulfat und Bariumsulfid (welches letztere

durch Reduktion von Schwerspat mit Kohle gewonnen wird) hergestellt. Der ursprüngliche Niederschlag ist halbdurchsichtig und gallertartig, erlangt aber durch Trocknen, Glühen, Abschrecken und Mahlen eine Beschaffenheit, die an die des geschätztesten weißen Pigments, Bleiweiß, erinnert. Dieser Stoff hat sich als eine sehr geeignete Unterlage für die Lackbildung dadurch erwiesen, daß die daraus mit wäßrigen Bindemitteln hergestellten Tünchen bereits in verhältnismäßig dünner Schicht eine vollständige Deckung ergeben, so daß sich mit ihrer Hilfe auf das leichteste recht gleichförmige und bezüglich des Farbtons genau reproduzierbare Aufstriche ergeben.

120. Die Fällung. Die Technik der Herstellung solcher *Füllfarben*, wie ich diese bewußt aus weißem Träger und kolloidem Pigmentniederschlage kombinierten Farbstoffe nennen will, kommt demgemäß darauf hinaus, daß man bei Gegenwart von Lithopon die fraglichen kolloiden Niederschläge erzeugt, wobei man durch kräftiges Rühren dafür Sorge trägt, daß der Lack sich möglichst gleichförmig auf den Körnchen des Trägers verteilt. Die Bildung der geeignetsten und gleichförmigsten Schicht auf den Körnchen wird erleichtert, wenn man die Menge des Verlackungsmittels nicht zu gering bemißt.

Bei basischen Farbstoffen wird zu einer Ausschlemmung von Lithopon in einer lauwarmen nicht konzentrierten Lösung des geeigneten Pigmentes (1 Prozent ist etwa der zweckmäßigste Gehalt) unter beständigem Umrühren das gleiche Gewicht von in Wasser (zu etwa 10%) gelöster Harzseife hinzugefügt. Die Fällung erfolgt augenblicklich und man kann in kurzer Frist das entstandene Produkt von dem überschüssigen Wasser und den bei der Wechselwirkung entstehenden Salzen durch Absaugen im Buchnerschen Trichter befreien. Ein Auswaschen hat sich im allgemeinen als unnötig erwiesen. Vielmehr genügt es, den abgesogenen Brei auf Saugpappe zu bringen und dem freiwilligen Trocknen an der Luft zu überlassen. Dabei zieht sich noch ein erheblicher Teil der Mutterlauge in die Pappe hinein und nimmt die vorhandenen Reste der Salze so vollständig mit, daß der getrocknete Niederschlag als leicht zerdrückbare Masse zurückbleibt. Der Rückstand wird fein gerieben und durch ein Sieb von Müllergaze getrieben. Diese Maßnahme erspart völlig das Feinreiben beim Anmachen der Tünche und ist deshalb sehr wesentlich.

Ganz ähnlich verfährt man bei sauren Farbstoffen. Hierbei setzt man dem Brei aus Lithopon und Farbstofflösung zunächst das gleiche Gewicht des Farbstoffes Harzseife zu, wodurch keine Fällung entsteht. Dann wird das durch die Natur des Farbstoffes gebotene Metallsalz hinzugefügt, welches gleichzeitig mit der Harzsäure und der Farbsäure den kolloiden Niederschlag bildet, der sich auf den Körnchen des Lithopons ablagert. Als Metallsalz dient bei den Sulfonsäuren Chlorbarium, bei den Farbstoffen von Eosintypus bewirkt dagegen Bleinitrat eine sehr vollständige Fällung dieser Pigmente. Es ist nicht zweckmäßig, das zu diesen Fällungen zumeist benutzte Bleiazetat zu verwenden, da dessen Lösung einen großen Anteil von komplexen Bleiverbindungen enthält, wodurch eine viel größere Konzentration des Bleisalzes zur vollständigen Fällung erfordert wird. Die Menge kann hier etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ vom Gewicht des Farbstoffes sein. Beim Chlorbarium wird man, um die häufig etwas unvollständige Fällung zu verbessern, lieber einen Überschuß verwenden und das zwei- bis dreifache Gewicht des Farbstoffes ansetzen. Die weitere Behandlung ist die gleiche wie bei basischen Farbstoffen.

121. Die Konzentration reinsten Farbe. Derartige Füllfarben können natürlich über die gesamte Farbenreihe von nahezu Schwarz bis zum Verschwinden der Buntfarbigkeit hergestellt werden, welche das benutzte Pigment vermöge seiner Lichtabsorption ermöglicht, da das Resultat ausschließlich von dem Gewichtsverhältnis zwischen dem Farbstoff und dem weißen Träger abhängt. Man wird deshalb für den Zweck, das Pigment reinsten Farbe zu finden, ähnlich wie bei der Färbung des weißen Zeichenpapiers, eine Reihe von Abstufungen des Verhältnisses zwischen Pigment und Träger herstellen und durch Neutralisieren mit der Ergänzungsfarbe am Pomi die Konzentration feststellen, bei welcher die reinste Färbung erzielt wird. Diese Konzentration hängt natürlich von dem Farbstoff ab und zwar von einer Eigenschaft, die bisher der exakten Messung nicht zugänglich war, die man aber als „Ergiebigkeit“ von jeher technisch beachtet hat, da von ihr die Menge des Pigments abhängt, die man zur Herstellung einer bestimmten Farbe gebraucht. Im allgemeinen läßt sich angeben, daß die Konzentration für die Gewinnung der reinsten Farbe zwischen einigen Prozenten und einigen Zehntel Prozenten schwankt. Hat man sich aus den lasierenden Aufträgen auf Zeichenpapier einigermaßen

Übung dafür verschafft, mit dem Auge das Gebiet der reinsten Färbung zu erkennen, so wird man, nachdem man beispielsweise einen einprozentigen Farbstoff hergestellt hat, leicht beurteilen können, ob das Gebiet der reinsten Farbe bei höheren oder bei minderen Konzentrationen zu suchen ist.

Weiterhin werde ich mit der Angabe der von mir benutzten organischen Farbstoffe gleichzeitig die Angabe des Farbstoffgehaltes für das farbreinste Pigment verbinden. Hierbei muß allerdings die Bemerkung gemacht werden, daß die technischen organischen Pigmente im allgemeinen keine chemisch reinen Substanzen sind und daß demgemäß die Angaben über die Konzentrationen keine allgemeine Bedeutung haben. Indessen hat sich erfahrungsmäßig herausgestellt, daß selbst die von verschiedenen Fabriken gelieferten bekannten Pigmente gleicher Natur in bezug auf ihren Gehalt ziemlich gut übereinstimmen, so daß diese Angaben wenigstens als erster Anhalt wohl benutzbar sind.

Die Änderung der Farbe eines Füllfarbstoffes mit der Konzentration erfolgt verhältnismäßig langsam, und Produkte, deren Gehalt an Farbstoff sich wie 1 zu 2 verhält, stellen ziemlich nahestehende Stufen in der Sättigungsreihe dar. Im Großen und Ganzen kann man rund zehn Potenzen von $1/2$ zwischen dem dunkelsten und dem hellsten Füllfarbstoffe einschalten, was einer Änderung des Farbstoffgehaltes von rund 1000 : 1 entspricht. Daraus geht hervor, daß ein Gehaltsunterschied von 5 bis 10 Prozent etwa die äußerste Grenze des überhaupt Erkennbaren darstellt. Eine größere Genauigkeit bei der Dosierung der Farbstoffgehalte in den Füllfarbstoffen hat somit keinen Sinn.

122. Mischen mit Weiß. Es sei noch bemerkt, daß man nicht etwa die Füllfarbstoffe größter Reinheit dadurch erlangen kann, daß man zunächst einen sehr konzentrierten Füllfarbstoff herstellt und das dunkelfarbige Pigmentpulver mit Lithopon vermischt. Hierdurch bringt man nur weiße Körner neben die dunkel gefärbten, deren Farbe viel Schwarz enthält, während doch für das farbreinste Produkt die Forderung besteht, daß der Farblack alle weißen Körnchen gleichförmig überzieht. Es ist deshalb nötig, die zur Bestimmung des Optimus erforderlichen Füllfarbstoffe verschiedener Konzentration einzeln herzustellen und aus den so erhaltenen Ergebnissen die optimale Konzentration durch Interpolation abzuleiten. Da man Pigmentmengen von 5 oder 10 Gramm

ohne Schwierigkeit in wenigen Minuten mischen, fällen, absaugen und zum Trocknen bereit machen kann, so lassen sich diese scheinbar umständlichen Arbeiten tatsächlich in kurzer Zeit erledigen. Natürlich stellt man die erforderlichen Farbstofflösungen von bestimmtem Gehalt zunächst in größeren Mengen her, so daß man für jede einzelne Fällung die zugehörigen Mengen durch einfaches Abmessen bestimmen kann.

123. Rezepte. Für diejenigen, welche die beschriebenen und weiterhin zu beschreibenden Experimente wiederholen wollen, seien nachstehend die Vorschriften mitgeteilt, nach denen ich meine Pigmente hergestellt habe, durch deren Mischung die zwischenliegenden Farben erhalten wurden.

1. Gelb. Naphtanthrachinon oder Siriusgelb der Badischen Anilin- und Sodafabrik kommt als Schlamm mit 20% Trockensubstanz in den Handel. Man nimmt auf 100 Teile des Schlammes 60 Teile Lithopon, verreibt den Brei sorgfältig, saugt das überschüssige Wasser ab, trocknet und pulvert.

2. Dunkelgelb. Auramin o wird im warmen Wasser gelöst und mit dem gleichen Gewicht Tannin und dem halben Gewicht Brechweinstein auf Lithopon gefällt. Der optimale Gehalt ist 1,9 Prozent.

3. Orange. Orange IIP wird zu 3,3 Prozent mit dem doppelten Gewicht Chlorbarium auf Lithopon gefällt.

4. Hochrot. Eosin A mit dem gleichen Gewicht Bleinitrat zu 0,6 Prozent auf Lithopon gefällt.

5. Purpurrot. Rhodamin 3 B, 1,3 Prozent mit dem gleichen Gewicht Tannin und dem halben Gewicht Brechweinstein gefällt.

6. Ultramarinblau. Brillantwollblau FFR (Baeyer) 2,4 Prozent mit dem gleichen Gewicht Chlorbarium, darauf ebensoviel Tannin und das halbe Gewicht Brechweinstein gefällt. Ist sehr lichtempfindlich.

7. Cyanblau. Brillant Säureblau FG (Baeyer) 1,4 Prozent mit gleichen Mengen Chlorbarium, Tannin und Brechweinstein gefällt.

8. Grün. Brillant Säuregrün GG (Baeyer) 0,9 Prozent mit dem gleichen Gewicht Chlorbarium, Tannin und dem halben Gewicht Brechweinstein gefällt.

Wie man sieht, ist in diesen Vorschriften die Harzseife nicht enthalten. Mir ist dieser Stoff erst später bekannt geworden, nachdem ich die Versuche zur Herstellung der Füllfarbstoffe und des

Farbenkreises bereits beendet hatte. Ich habe mich durch einzelne ausgewählte Darstellungen überzeugt, daß man mit Hilfe dieses Stoffes gelegentlich um ein nicht unerhebliches Stück in bezug auf die Reinheit vorschreiten kann. Doch ist die sekundäre Aufgabe, mit dem neuen Material die günstigsten Verhältnisse zu ermitteln, mir nicht wichtig genug erschienen, um sie vor Erledigung bedeutenderer Fragen vorzunehmen, zumal der Weg, der zum Ziele führt, genau bekannt ist und keiner irgendwie wesentlichen Abänderung bedarf.

Stellt man sich von jedem Pigment einige Hektogramm her, so hat man Material genug, um durch Vermischung je zweier nächst liegender Farbstoffe in geeigneten Verhältnissen die Zwischenfarben in jeder beliebigen Abstufung herzustellen. Es sei daher erwähnt, daß gemäß meiner vorläufigen Bestimmungen die Pigmente im Farbenkreise folgende Nummern haben: Siriusgelb 0, Auramin 6, Orange 17, Eosin 28, Rhodamin 40, Wollblau 54, Säureblau 68, Säuregrün 76. Die Angabe dieser Zahlen hat zunächst nur den Zweck, einen Anhaltspunkt für die Anzahl der Stufen anzugeben, welche zwischen den einzelnen Füllfarben durch geeignete Variation der Mischungsverhältnisse einzuschalten sind, um den Farbenkreis einigermaßen gleichabständig zu besetzen. Praktisch wird man die Zahl eher erhöhen, als verkleinern, da die Herstellung einer Mischfarbe aus abgewogenen Mengen der Bestandteile eine überaus einfache Operation ist, die bei der Wiederholung mit Sicherheit die gleichen Resultate gibt, wenn man nur für Sauberkeit der Geräte, insbesondere des Pinsels, Sorge trägt.

124. Bindemittel. Als Bindemittel dient eine Tempera, welche folgendermaßen hergestellt wird: Man läßt möglichst hellfarbigen Tischlerleim 24 bis 48 Stunden in Wasser quellen, schmilzt die entstandene Gallerte und setzt $\frac{1}{3}$ von dem Gewicht des trocknen Leim Chloralhydrat zu. Hierdurch verliert der Leim die Eigenschaft, bei gewöhnlicher Temperatur zu erstarren. Es wird nun eine Menge Mohnöl, die dem Gewicht des trocknen Leims gleich ist, mit einigen Tropfen Kalilauge versetzt und durch andauerndes Rühren mit einer kleinen Menge der dickflüssigen Leimlösung verarbeitet. Ist eine vollständige Emulsionierung nach etwa 5 bis 10 Minuten eingetreten, so setzt man neue Mengen des Leimes zu, worauf das gleichförmige Verarbeiten schneller vor sich geht. Man gelangt, wenn etwa ein Drittel oder die Hälfte des Leimes

zugesetzt ist, bei richtiger Arbeit zu einer dicken salbenartigen Masse, die erst bei Zufügung der letzten Anteile Leim wieder halbflüssig wird. Der Durchgang durch das halbfeste Stadium ist ein Anzeichen dafür, daß die Emulsionierung gelungen war. Man setzt dann soviel Wasser zu, daß die Flüssigkeit 8 Prozent Leim und 8 Prozent Öl enthält¹⁾ und benutzt das schwach bräunlich gefärbte milchähnliche Bindemittel zur Herstellung der Tünche, indem man ungefähr gleiche Gewichte des trocknen Pigments und des Bindemittels miteinander verreibt. Ist das Pigment vorher sorgfältig aus seinen Bestandteilen gemischt gewesen, so genügt eine Durcharbeitung mit dem Pinsel. Unter allen Umständen aber bedarf es nur einer kurzen Verreibung in der Reibschale, um eine vollständig gleichförmige Tünche zu gewinnen, die sich ausgezeichnet leicht auftragen läßt.

Diese Tempera hat vermöge des Öles die Eigenschaft, den Pigmenten eine etwas tiefere Färbung zu erteilen, als rein wässrige Bindemittel. Ferner bleibt die recht unbequeme Zusammenziehung aus, welche bei der Anwendung von reinem Leim oder Gelatine sich in der angestrichenen Fläche betätigt und es fast unmöglich macht, ebene Blätter, die mit solcher Tünche bedeckt sind, herzustellen.

Gegenwärtig, wo die Beschaffung von Mohnöl schwierig ist, kann man sich auch eines anderen Bindemittels bedienen, welches aus weißem Dextrin und Stärkesirup besteht. Der Gehalt an ersterem in dem fertigen Bindemittel beträgt 15 Prozent, der des zweiten 5 Prozent. Man löst das mit dem Wasser angeriebene Dextrin durch Sieden zu einer vollständig klaren Flüssigkeit auf, fügt den Stärkezucker hinzu und ferner etwa 10 Prozent Alkohol behufs besserer Benetzung sowohl der Pigmente, wie der Unterlagenpapiere. Die letzte Eigenschaft läßt sich noch weiter dadurch verbessern, daß man etwa 1 Prozent Amylazetat zu der Masse fügt. Dieses erleichtert durch die starke Herabsetzung der Oberflächenspannung in noch viel kräftigerer Weise als der Alkohol die Benetzung und sichert die Gleichförmigkeit des Auftrages. Die Flüssigkeit ist unmittelbar nach der Herstellung klar, es scheidet sich aber im Laufe einiger Tage ein Teil des Dextrins in Gestalt eines weißen kolloiden Schleimes aus, den man bei der Benutzung des

1) Ein Antiseptikum ist nicht nötig, da das Chloralhydrat als solches wirkt.

Bindemittels durch Umschütteln gleichförmig dem Rest verteilt. Gegen Schimmel und Bakterien hilft eine Kleinigkeit Formaldehyd.

Mit der aus gebeuteltem Farbstoff und Bindemittel angeriebenen Tünche wird geeignetes Papier mittels eines breiten, weichen Pinsels bestrichen und nach dem Ausgleichen durch parallele Kreuzlagen mit dem Pinsel zum Trocknen aufgehängt. Die gestrichenen Papiere werden auf der Rückseite entsprechend bezeichnet und unter Druck aufbewahrt. Zum Zuschneiden der Proben bedient man sich eines Schneidemaschinchens, wie sie zu photographischen Zwecken hergestellt werden.

125. Relative Sättigung der Ergänzungsfarben. Die Neutralisation einer jeden Farbe durch ihre Ergänzungsfarbe unter quantitativer Bestimmung des dazu erforderlichen Mengenverhältnisses mittels des Pomi hatte zunächst das Ziel, aus den zusammengehörigen Farben einer isochromen Gruppe die reinste ausfindig zu machen. Man kann, nachdem man dergestalt für eine hinreichende Anzahl von Farbtönen die Repräsentanten gewonnen hat, die weitere Aufgabe lösen, das *Reinheitsverhältnis der Ergänzungsfarben* im ganzen Farbenkreise quantitativ festzustellen. Sind beide Farben in der eben beschriebenen Weise im Zustande der größten Reinheit, die die gegenwärtigen Hilfsmittel zu erreichen gestatten, hergestellt, so hat es sicherlich ein erhebliches Interesse zu bestimmen, ob diese Reinheiten gleich oder in welchem Sinne sie verschieden sind.

Wenn beispielsweise zwei Ergänzungsfarben, wie Reingelb und Ultramarinblau in bezug auf ihre Reinheit übereinstimmen, so steht zu erwarten, daß sie einander zu gleichen Mengen neutralisieren, daß also am Pomi das Nikol auf 45° gestellt werden muß, damit aus beiden neutrales Grau entsteht. Macht man den Versuch, so stellt sich heraus, daß dieses nicht der Fall ist. Vielmehr muß man verhältnismäßig viel mehr Blau als Gelb zur Wirkung bringen, damit neutrales Grau entsteht, woraus zu schließen wäre, daß reinstes Gelb anscheinend erheblich reiner ist, als reinstes Blau. Diese Beobachtung führte alsbald dazu, ähnliche Messungen durch den ganzen Farbenkreis anzustellen, da nur die Gesamtübersicht der vorhandenen Verhältnisse eine sachgemäße Beurteilung jedes einzelnen Falles sichern konnte. Das Ergebnis dieser Messungen ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt, deren Zahlen jeweils das Mittel von drei Einstellungen und einer Vertauschung sind.

Tabelle II.
Neutralisationsverhältnisse im Farbenkreis.

Nummer	Winkel (1)	Winkel (2)	Mittel	tg^2	$1/\text{tg}^2$
0 50	38,6	37,4	38,0	0,61	1,64
1 51	37,9	36,2	36,7	0,56	1,79
2 52	36,6	37,1	36,9	0,56	1,79
3 53	36,9	38,2	37,6	0,59	1,70
4 54	37,2	38,5	37,9	0,61	1,64
5 55	36,7	37,5	37,1	0,57	1,75
6 56	37,1	36,7	36,9	0,56	1,79
7 57	36,0	36,8	36,4	0,54	1,85
8 58	36,4	36,9	36,7	0,56	1,79
9 59	35,8	36,5	36,2	0,54	1,85
10 60	36,3	37,5	36,9	0,56	1,79
11 61	37,0	38,0	37,5	0,59	1,70
12 62	37,5	37,9	37,7	0,60	1,67
13 63	38,0	38,8	38,4	0,63	1,59
14 64	37,7	38,6	38,2	0,63	1,59
15 65	37,3	37,6	37,5	0,59	1,70
16 66	37,9	38,1	38,0	0,61	1,64
17 67	38,0	38,9	38,5	0,63	1,59
18 68	38,2	38,5	38,4	0,62	1,61
19 69	37,7	38,2	38,0	0,61	1,64
20 70	37,7	38,9	38,3	0,62	1,61
21 71	37,4	38,7	38,1	0,61	1,64
22 72	37,7	38,8	38,3	0,62	1,61
23 73	37,2	39,2	38,2	0,62	1,61
24 74	37,0	37,6	37,3	0,58	1,72
25 75	37,1	37,4	37,3	0,58	1,72
26 76	37,2	37,7	37,5	0,59	1,70
27 77	37,1	38,1	37,6	0,59	1,70
28 78	37,2	37,5	37,4	0,58	1,72
29 79	37,8	38,8	38,3	0,62	1,61
30 80	38,3	38,0	38,2	0,62	1,61
31 81	38,5	39,4	39,0	0,66	1,52

Nummer	Winkel (1)	Winkel (2)	Mittel	tg^2	$1/\text{tg}^2$
32 82	40,0	40,3	40,2	0,71	1,41
33 83	39,8	41,5	40,7	0,74	1,35
34 84	40,0	42,2	41,1	0,76	1,32
35 85	40,2	42,3	41,3	0,77	1,30
36 86	41,4	42,4	41,9	0,81	1,24
37 87	41,7	43,6	42,7	0,85	1,18
38 88	43,0	42,5	42,8	0,86	1,16
39 89	44,6	45,0	44,8	0,98	1,02
40 90	45,4	46,7	46,1	1,08	0,93
41 91	46,8	47,7	47,3	1,17	0,85
42 92	47,5	48,7	48,1	1,24	0,81
43 93	48,1	49,8	49,0	1,32	0,76
44 94	48,7	50,8	49,8	1,40	0,71
45 95	49,6	51,4	50,5	1,47	0,68
46 96	50,4	51,8	51,1	1,54	0,65
47 97	51,6	53,4	52,5	1,70	0,59
48 98	51,5	53,5	52,5	1,70	0,59
49 99	52,0	53,8	52,9	1,74	0,57

Da wegen der großen Anzahl der zu beobachtenden Paare die Arbeit ziemlich anstrengend für das Auge ausfällt, so habe ich mich mit der dergestalt erreichbaren Genauigkeit begnügt. Diese Selbstbeschränkung hat späterhin sich als völlig sachgemäß erwiesen, nachdem ein anderes Verfahren ermittelt worden war, welches an Stelle der hier vorliegenden relativen Reinheitsbestimmungen absolute auszuführen gestattet.

Die beiden ersten Spalten enthalten die Nummern der sich neutralisierenden Farben im 100-teiligen Kreise. Die drei folgenden Spalten geben die Mittelwerte der Einstellungen des Nikol, und zwar die erste bei der Anordnung $N^\circ n : N^\circ n + 50$, die zweite bei der umgekehrten $N^\circ n + 50 : N^\circ n$, wobei im zweiten Falle zum Zweck des unmittelbaren Vergleichs nicht die beobachteten Winkel w , sondern deren Ergänzung $90^\circ - w$ mitgeteilt worden sind. Die dritte Reihe bringt die Mittelwerte. Unter tg^2 sind die Werte $\text{tg}^2 w$ gegeben, welche das Verhältnis beider Anteile ausdrücken, die zur optischen Mischung auf neutrales Grau erforderlich waren.

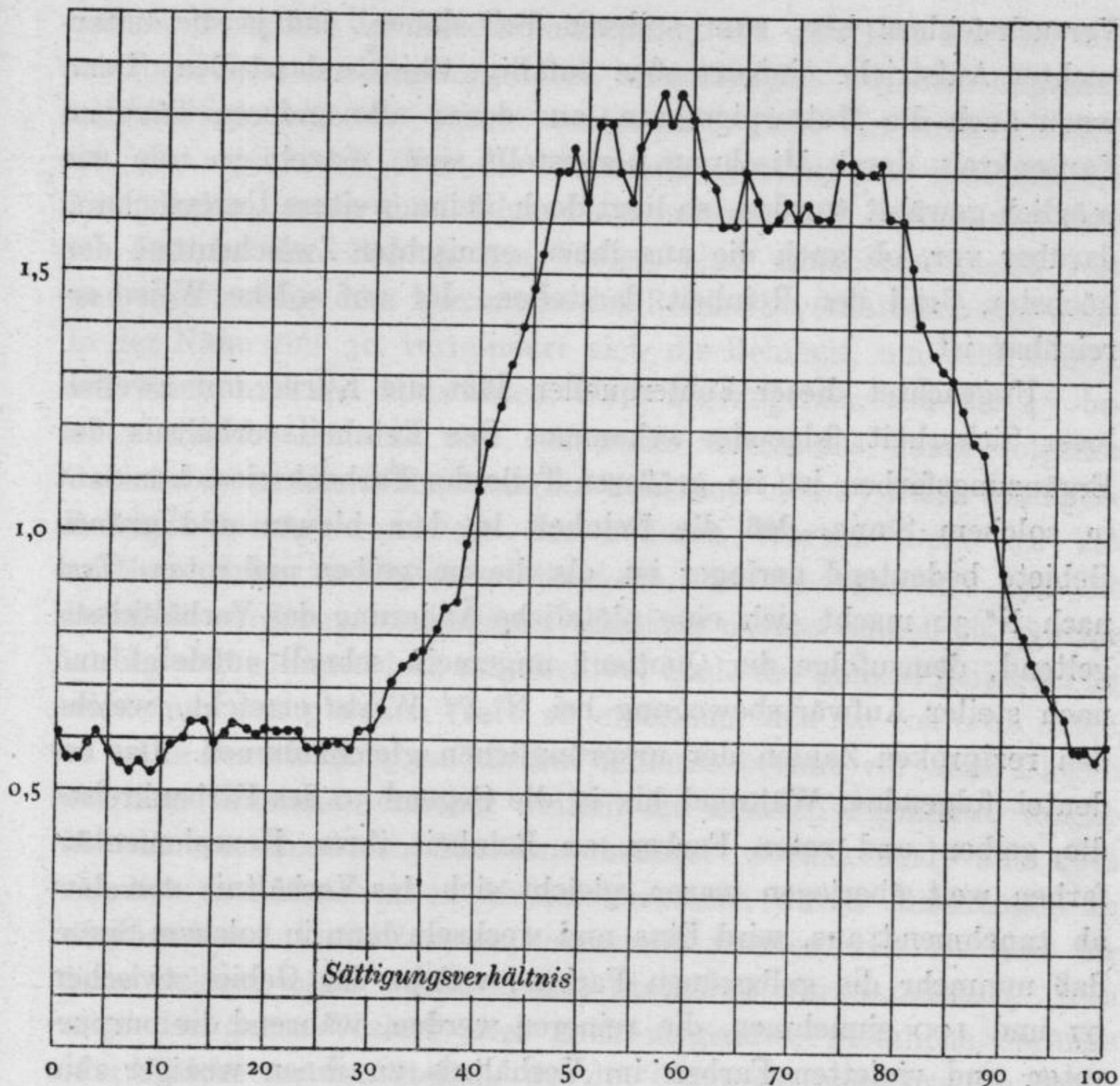


Fig. 13.

Die letzte Spalte mit $1/\text{tg}^2$ enthält die reziproken Werte der vorigen, also die Sättigungsverhältnisse $\frac{\text{N}^\circ n}{\text{N}^\circ n + 50}$.

Um die Zahlen der Tabelle mit einem Blick überschauen zu können, ist in Fig. 13 der Inhalt graphisch dargestellt. Als Abszissen dienen zunächst die Nummern 0 bis 50 des Farbkreises, als Ordinaten die Reinheitsverhältnisse, wobei die größere Nummer im Farbkreise immer als Zähler, die kleinere als Nenner benutzt worden ist. Demgemäß sind die Zahlen von 0 bis in die Gegend von 30 sämtlich kleiner als 1, weil die Reinheit der blauen und grünen Farben von 50 ab viel geringer ist als die der gelben und roten von 0 ab. Das Verhältnis ist etwa 0,6 und bleibt über den größeren Teil des Farbkreises im wesentlichen konstant. Das unregelmäßige Auf und Ab der Linie rührt nur zum Teil von

Versuchsfehlern her, zum anderen Teil daher, daß ja die untersuchten Aufstriche einigermaßen zufällige Objekte darstellen. Denn wenn auch die Mutterpigmente, aus denen alle anderen Töne im Farbkreis durch Mischung hergestellt sind, einzeln so rein wie möglich gewählt wurden, so liegt doch keine weitere Untersuchung darüber vor, ob auch die aus ihnen ermischten Zwischentöne den höchsten Grad der Reinheit darstellen, der auf solche Weise erreichbar ist.

Ungeachtet dieser Fehlerquellen läßt die Kurve mit zweifelloser Sicherheit folgendes erkennen: Das Reinheitsverhältnis der Ergänzungsfarben ist im größeren Teile des Farbkreises konstant in solchem Sinne, daß die Reinheit in dem blauen und grünen Gebiete bedeutend geringer ist, als die im gelben und roten. Erst nach N° 30 macht sich eine plötzliche Änderung des Verhältnisses geltend, demzufolge der Quotient ungemein schnell aufsteigt und nach steiler Aufwärtsbewegung bei N° 47 Werte erreicht, welche den reziproken Zahlen der ursprünglichen gleichkommen. Das bedeutet folgendes: Während bis in die Gegend 30 des Farbkreises die gelben und roten Farben an Reinheit ihren Komplementärfarben weit überlegen waren, gleicht sich das Verhältnis von dort ab zunehmend aus, wird Eins und wechselt dann in solchem Sinne, daß nunmehr die gelbgrünen Farben, welche das Gebiet zwischen 97 und 100 einnehmen, die reineren werden, während die purpurroten und violetten Farben im Verhältnis zu ihnen weniger rein ausfallen. Daß tatsächlich ein völliger Anschluß an der Nullstelle des Farbkreises besteht, ist am einfachsten daraus erkennbar, daß man die Verhältniszahl von N° 50 ab im umgekehrten Sinne berechnet, d. h. die Reinheit der höheren Nummer im Farbkreise zum Zähler, die der niederen zum Nenner nimmt. Alsdann setzt sich die Kurve auf der Höhe, die sie bei N° 47 erreicht hatte, horizontal fort (was nichts als die reziproke Übersetzung des horizontalen Teiles zwischen 0 und 30 ist), und in der Gegend von 80 tritt der plötzliche Abfall ein, welcher das zahlenmäßige Spiegelbild des plötzlichen Aufstieges zwischen 30 und 47 ist. Die viel stärkeren Schwankungen dieses oberen Teiles rühren natürlich daher, daß der Maßstab der Ordinaten mehr als verdreifacht ist, die Abweichungen also im gleichen Verhältnis vergrößert sind.

126. Vermutung über die Reinheit der Einzelfarben. Die Gesamtheit dieser Tatsachen führt zu folgendem wahrscheinlichen

Schluß bezüglich der absoluten Reinheit der einzelnen Farben, der, wie besonders hervorgehoben sei, ausschließlich auf dem allgemeinen Stetigkeitsgesetz beruht und somit nicht eindeutig bindend ist. Es ergibt sich aber die einfachste Deutung der beobachteten Verhältnisse, wenn man folgendes annimmt. Die Farben von Gelb bis Rot in den Beginn des Violett sind annähernd gleich rein und gleichzeitig dem Maximum der Reinheit verhältnismäßig nahe. In der Nähe von 30 vermindert sich die Reinheit, um sehr schnell auf einen anderen konstanten Wert überzugehen, der bei 47 bereits erreicht ist und nun seinerseits durch das ganze folgende Gebiet bis in die Nähe von 80 konstant bleibt. Diese geringere Reinheit beträgt rund 0,6 des höheren Wertes. Dort wo das mittlere Grün in Gelbgrün übergeht, bei 80 vermehrt sich die Reinheit wiederum und nimmt ungefähr ebenso schnell zu, wie sie vorher abgenommen hat, um noch vor Ende der ganzen Reihe bei 97 wiederum den gleichen Wert zu erreichen, den sie von 0 ab hatte.

Die Berechtigung zu diesem Schlusse beruht vor allen Dingen auf dem Umstand, daß bei weitem die meisten Pigmente, welche für die verschiedenen Farbtöne benutzt worden sind, aus zwei ziemlich weitabstehenden Muttersubstanzen durch Mischungen in verschiedenen Verhältnissen hergestellt wurden. Es ist also für diese Gebiete ohne weiteres eine Stetigkeit vorauszusetzen. Nun zeigt der ganze Verlauf aber auch nirgendwo plötzliche Sprünge oder Knicke an den Stellen, wo die Pigmente gewechselt wurden. Ebenso ergibt sich aus hier nicht mitgeteilten Versuchen, daß man ganz ähnliche Zahlen erhält, wenn man auch ganz andere schönfarbige Pigmente zur Herstellung des Farbkreises verwendet. Hieraus folgt, daß die beobachteten Werte einen ziemlich allgemeinen Charakter haben und daß die individuellen Beeinflussungen, die zweifellos vorhanden sind, nur einen Bruchteil der maßgebenden Größen ausmachen.

Es wird sich später herausstellen, daß diese Schlüsse tatsächlich berechtigt sind. Da aber das Material vorliegt, die gleichen Fragen auf Grund absoluter Reinheitsmessungen eindeutig zu entscheiden, so ist es zweckmäßiger, die Diskussion an dieser Stelle abubrechen und sie dort wieder aufzunehmen, wo jene absoluten Daten vorliegen.

127. Anwendungen. Nachdem die eben beschriebenen relativen Reinheitsbeziehungen festgestellt worden waren, benutze ich

sie zunächst, um mit ihrer Hilfe und unter den eben gekennzeichneten Voraussetzungen einen rationell geteilten Farbkreis herzustellen. Dessen Abstufung sollte auf dem *Prinzip der inneren Symmetrie* beruhen, demzufolge, wenn zwischen zwei beliebigen Farben A und C eine dritte B symmetrisch eingeschaltet wird, diese Farbe dem Farbton nach identisch sein soll mit der Mischfarbe, die man aus A und B zu gleichen Anteilen erhält. Da diese Anteile ihrerseits durch die Reinheitsgrade der für diesen Zweck benutzten zufälligen Farbaufstriche bestimmt werden, so setzt die Anwendung jenes Symmetrieprinzips die Kenntnis des Reinheitsverhältnisses der beiden zusammensetzenden Farben voraus.

Nun ermöglicht das eben beschriebene Verfahren zwar das Reinheitsverhältnis zweier *Ergänzungsfarben* zu bestimmen, gestattet aber keinerlei Übergang von einer Farbe zu einer anderen, die nicht ihre Ergänzungsfarbe ist. Es mußte deshalb die eben gekennzeichnete wahrscheinliche Voraussetzung gemacht werden, um wenigstens eine vorläufige Führung zur Feststellung dieser Zwischenstufen zu gewinnen. Man erkennt, daß unter diesen Voraussetzungen die Farben von 97 bis 100 und von 0 bis 30 als gleich rein angesehen werden dürfen, daß demgemäß die Kenntnis des absoluten Reinheitsgrades für die Herstellung der Mischungen aus ihnen nicht erforderlich ist. Nur das kleinere Gebiet zwischen 30 und 47 unterliegt der Unsicherheit, daß man nicht weiß, welcher Teil der dort vorhandenen Veränderungen auf das violette und welcher Teil auf das gelbgrüne Gebiet zu setzen ist. Unter diesen Umständen ist es das wahrscheinlichste, beide Veränderungen als gleich groß anzunehmen. Mit einer solchen Annahme läßt sich denn auch der letzte Teil des halben Farbkreises von 0 bis 50 teilen. Ist dieses geschehen, so bringt die andere Hälfte keine Schwierigkeiten mehr, weil man jeden Punkt zwischen 50 und 100 als Ergänzungsfarbe des entsprechenden Punktes zwischen 0 und 50 bestimmen kann, also weiter gar keine Sorge um den Vergleich der nebeneinanderliegenden Farben hat.

Die technische Durchführung dieses Gedankens ist natürlich nicht so glatt vor sich gegangen, wie die nachträgliche Darstellung des Prinzipes. Wie in allen Fällen, wo es sich um die erste Reise in einem Neuland handelt, sind anfangs Umwege gemacht und Schwierigkeiten in mühseliger Arbeit bekämpft worden, die man

durch kleine Änderungen des Ausgangspunktes hätte umgehen können. Es hat keinen Zweck diese einzelnen Stufen geschichtlich festzuhalten, und es mag die Nachricht genügen, daß schließlich ein Farbenkreis nach diesen Grundsätzen in reproduzierbarer Weise hergestellt wurde. Er ist durch die S. 527 gegebenen Tabellen hinreichend gekennzeichnet.

128. Der Weg zum absoluten Maße. Die große Arbeit, welche mit dieser Herstellung verbunden war, gab einen auf die Dauer immer stärker wirkenden Anreiz ab, das mit so viel Energieaufwand hergestellte Gebäude wenn irgend tunlich sicherer zu fundamentieren, als es bis dahin möglich gewesen war. Daraus entstand dann immer dringender die Frage, ob sich nicht ein Weg finden ließe, um den Reinheitsgrad einer jeden vorgelegten Farbe unabhängig von ihrer Ergänzungsfarbe für sich zu bestimmen.

Der nächste Gedanke, der sich hier anbot, ist der einer spektrophotometrischen Durchmessung des gesamten Lichtes, welches von einem gegebenen Aufstrich ausgeht und die Vergleichung der so erhaltenen Intensitätskurve mit der idealen Intensitätskurve einer gesättigten Farbe. Die Lösung der Aufgabe auf diesem Wege scheiterte daran, daß in jenem Stadium meiner Arbeit die Definition einer reinen oder gesättigten Farbe noch nicht vorhanden war, also die Bezugseinheit fehlte. Ich unterlag damals noch dem allgemeinen Vorurteil, als seien „homogenes Licht“ und „reine Farbe“ identische Begriffe, während doch die Betrachtung meiner gelben und gelbroten Aufstriche (die sich als die reinsten im Farbenkreise erwiesen hatten) mit dem Spektroskop mich überzeugte, daß bei ihnen von Homogenität des zurückgeworfenen Lichtes bei weitem nicht die Rede war. So versuchte ich das schon von mir vor vielen Jahren aufgefundene und ausgesprochene *Prinzip der Koinzidenz der ausgezeichneten Fälle* auf die vorliegende Aufgabe anzuwenden. Ich suchte Antwort auf die Frage, wie sich ausgezeichnete Fälle von größerer Allgemeinheit als der Fall der Ergänzungsfarben bei der chromatischen Untersuchung der Aufstriche herstellen lassen. Da nämlich in solchen Fällen die gesamten Verhältnisse eine Vereinfachung um eine oder mehrere Stufen erfahren, konnte die den bisherigen Erörterungen unzugängliche Frage nach der *absoluten* Reinheit der Beantwortung näher rücken.

Auf diesem Wege wurde ich zu jenen Betrachtungen geführt, die grundsätzlich bereits an anderer Stelle¹⁾ dargelegt worden sind. Um den Leser das Aufsuchen jener Veröffentlichung zu ersparen, will ich das prinzipielle der Angelegenheit hier nochmals darlegen, zumal es im Zusammenhang mit dem eben Gesagten eine neue Beleuchtung gewinnt.

129. Absolute Reinheitsmessung. Führt man einen Aufstrich, dessen Reinheit festzustellen ist, durch ein ausgedehntes Spektrum hindurch, so daß er praktisch an jeder Stelle mit homogenem Licht beleuchtet ist, so muß er, eben wegen der Homogenität des Lichtes jedesmal in der Farbe erscheinen, welche das Spektrum an eben dieser Stelle zeigt. Die einzige Veränderlichkeit, welche er demgemäß unter diesen Umständen aufweisen kann, ist die seiner *Helligkeit*, d. h. des Bruchteils von dem homogenen Licht, mit dem er jeweils beleuchtet ist, den er je nach seiner Natur zurückwirft. Die ausgezeichneten Fälle bei einer derartigen Untersuchung sind naturgemäß diejenigen, bei welchen das zurückgeworfene Licht ein Maximum oder ein Minimum aufweist. Das Maximum an Licht wird der Aufstrich dort zurückwerfen, wo seine eigene Farbe mit der der Spektralfarbe übereinstimmt, da seine Farbe ja auf der Fähigkeit zu solcher Remission beruht. Das Minimum erscheint dort, wo seine eigene Farbe und die spektrale Beleuchtung im Verhältnis der Ergänzungsfarben stehen, da das komplementäre spektrale Licht dann von dem Aufstrich um so vollkommener absorbiert werden muß, je reiner dessen Farbe ist. Denkt man den Aufstrich ideal rein, so ist im Falle der maximalen Helligkeit seine Helligkeit gleich der eines ideal weißen Körpers, weil er alles Licht zurückwirft. Seine minimale Helligkeit ist gleich der eines ideal schwarzen Körpers, weil das gesamte auffallende homogene Spektrallicht absorbiert.

Die Abweichungen, welche Helligkeiten in den beiden ausgezeichneten Punkten von diesem idealen Grenzfall aufweisen werden, sind ein unmittelbares Maß für die ungenügende Erfüllung der Voraussetzung, d. h. für die unvollkommene Reinheit des Aufstriches. Und zwar wird an dem Punkt größter Helligkeit nur der schwarze, d. h. der absorbierende Bestandteil in dem Aufstrich verdunkelnd wirken, da sowohl der farbige wie der weiße Teil

1) Ztschr. f. physik. Chemie 91, 129. 1916.

das Licht remittieren. Daraus folgt, daß was der Helligkeit unter der gleichsinnigen Beleuchtung an Eins fehlt, ausschließlich der *schwarzen* Verunreinigung des Aufstriches zuzuschreiben ist. Nennt man h_1 die dort beobachtete größte Helligkeit, so ist also

$$1 - h_1 = s,$$

wo s den schwarzen Anteil in der Farbe des Aufstriches bedeutet. Der weiße Anteil wirkt an dieser Stelle, weil er seiner Definition gemäß alles Licht vollständig zurückwirft, ebenso wie der reinfarbige Anteil, der das gleiche tut. Die Gesamthelligkeit h_1 , die dort beobachtet wird, erweist sich daher als die Summe dieser beiden Anteile. Nennt man r den Anteil reiner Farbe und w den des Weiß, so besteht die weitere Gleichung $h_1 = r + w$.

Ganz ähnlich sind die Verhältnisse an der Minimalstelle. Das zurückgeworfene Licht rührt in diesem Falle ausschließlich von dem weißen Bestandteil her, da sowohl der farbige Bestandteil wie der schwarze das darauf fallende spektrale Licht vollständig absorbiert. Ist die Helligkeit an dieser Stelle $= h_2$, so besteht darnach die Beziehung $h_2 = w$. Der absorbierte Anteil dagegen setzt sich aus der Absorption durch den schwarzen und durch den farbigen Anteil zusammen, so daß für diesen, der durch $1 - h_2$ gegeben ist, die Gleichung besteht $1 - h_2 = r + w$.

Aus beiden Gleichungen zusammen folgt zur Bestimmung des farbigen Anteils r oder der *Reinheit* der einfache Ausdruck

$$r = h_1 - h_2,$$

d. h. die Reinheit ist gleich dem Unterschiede der beiden ausgezeichneten Helligkeiten.

130. Das Grau. Wenn man an einem vorgelegten Aufstrich festgestellt hat, welchen Reinheitsgrad er besitzt und welchen Ort im Farbkreise die in ihm vorhandene reine Farbe einnimmt, so ist damit die Farbe noch nicht erschöpfend gekennzeichnet. Der unbunte Anteil ist zwar seinem Betrage aber nicht seiner Art nach bekannt, denn er kann zwischen Schwarz und Weiß in unbegrenzt vielen Stufen des zwischenliegenden Grau wechseln. Diesem Wechsel entspricht eine gleiche Mannigfaltigkeit der Farben konstanter Reinheit, welche sich am unmittelbarsten in dem entsprechenden Wechsel der *Helligkeit* geltend macht. Ist der unbunte Bestandteil reines Weiß, so hat man es mit einer *hellklaren* Farbe zu tun, welche die hellste darstellt, die bei dem gegebenen

Reinheitsgrade möglich ist. In dem Maße, als dieses Weiß gegen immer dunkleres Grau ausgetauscht wird, ändert sich die Helligkeit der Mischung in abnehmendem Sinne; die Farbe geht durch eine Reihe trüber Abstufungen und endet schließlich in dem Punkte, wo das Grau in Schwarz übergegangen und eine *dunkelklare* Farbe entstanden ist. Gemäß der psychologischen Verschiedenheit, welche eine gleich große Vermischung der reinen Farbe mit Weiß oder Schwarz bewirkt, wird auch das Aussehen dieser Stufenreihe sich ändern. Die psychologische Wirkung der reinen Farbe wird am wenigsten bei dem Endpunkt dem dunkelklaren Gemisch beeinträchtigt erscheinen und am meisten bei dem anderen Endpunkt, dem hellklaren, während die grauen Stufen sich dazwischen anordnen.

Man kann sich mit Hilfe des Pomi eine Anschauung von dieser Reihe konstanter Reinheit verschaffen, wenn man bei konstanter Einstellung des Nikol einen möglichst reinfarbigem Aufstrich mit den aufeinander folgenden Stufen der Grauskala kombiniert. Sind die letzteren nebeneinander auf dem gleichen Träger geklebt, so braucht man diesen nur langsam über das Grundbrett zu führen, um nacheinander im Gesichtsfelde die verschiedenen Ergebnisse der Mischung derselben reinen Farbe mit verschiedenem Grau in konstantem Verhältnis zu erblicken.

Die Frage, ob es für diese verschiedenen Grau einen zahlenmäßigen Ausdruck gibt, ist bereits durch die Erörterung im dritten Stück dieser Beiträge beantwortet. Ist bekannt, welches Grau als Mischungsbestandteil der vorgelegten Farbe vorhanden ist, so ist dieses auch durch eine entsprechende photometrische Messung ohne weiteres bezüglich seines Verhältnisses zwischen Weiß und Schwarz gekennzeichnet. Hierbei wird aus den früher dargelegten Gründen sich als zweckmäßig erweisen, den Bruchteil Weiß, welchen das Grau im Vergleich zu einer idealen weißen Fläche remittiert, als Zahlenwert dieses Grau zu benutzen. Nennt man den weißen Anteil w und den absorbierten oder schwarzen Anteil s , so wird demgemäß das Grau durch das Verhältnis $\frac{w}{w+s}$ dargestellt.

Nun brauchen wir uns nur dessen zu erinnern, daß die Größen w und s sich bereits unmittelbar aus den Bestimmungen der Größen h_1 und h_2 ergeben hatten (129), und zwar war $w = h_2$ und $s = 1 - (h_1 - h_2)$. Daraus ergibt sich das Grau

$$g = \frac{w}{1 - (h_1 - h_2)}.$$

Auf solche Weise ist das Grau, das dem untersuchten Aufstrich beigemischt ist, unmittelbar in den direkt bestimmten Größen h_1 und h_2 ausgedrückt.

Es ergibt sich demnach, daß die beiden Werte, welche zur Bestimmung der Reinheit dienen, auch ausreichen, um das Grau aus ihnen zu berechnen. Es ist dieses grundsätzlich zu erwarten gewesen, da beide Werte voneinander ganz unabhängig bestimmt worden sind und somit auch zwei voneinander unabhängige Funktionen beider, wie es die Reinheit und das Grau sind, zu berechnen gestatten müssen.

131. Das Additionsgesetz. Jedes Paar der Gleichungen für h_1 und h_2 in N° 129 ist nicht unabhängig, weil es durch die allgemeine Beziehung $f + w + s = 1$ zusammengehalten wird. Diese Gleichung drückt die Voraussetzung aus, unter welcher die ganze Betrachtung angestellt worden ist und die ausdrücklich ausgesprochen werden muß, um volle Klarheit in der Angelegenheit zu gewinnen. Diese Voraussetzung ist, daß sich tatsächlich die zusammengesetzte Farbe irgendeines Aufstriches oder irgendeiner anderen Oberflächenfarbe *additiv und vollständig* durch die beschriebenen drei Anteile darstellen läßt. Es handelt sich also um einen prinzipiellen Ansatz, ähnlich dem Ohmschen Gesetze, nach welchem die Stromstärke durch das Produkt zweier Faktoren, der elektromotorischen Kraft und der Leitfähigkeit gegeben ist, welche ihrerseits von der Stromstärke ganz unabhängig sind. Ebenso beruht jene Rechnung auf der Voraussetzung, daß sowohl der farbige Anteil, wie das Schwarz und Weiß, selbständige und unabhängige Bestandteile in der Gesamtwirkung einer jeden beliebigen Farbe sind und daß ihre gegenseitige Beziehung durch das allgemeine Gesetz gekennzeichnet wird, nach welchem ihre Summe stets gleich Eins, d. h. gleich der ganzen Farbenwirkung ist. Andere Bestandteile der Farbenwirkung sind somit niemals vorhanden.

Die Richtigkeit eines so überaus allgemeinen und umfassenden Prinzips läßt sich beweisen, indem man es auf eine möglichst große Mannigfaltigkeit von Fällen anwendet und sich überzeugt, daß es niemals zu Widersprüchen, sowohl im eigenen Gebiete, wie mit anderen wohlkonstatierten Tatsachen führt. Tatsächlich hat MAXWELL in seiner fundamentalen Arbeit¹⁾ gezeigt,

1) Trans. Roy. Soc. Edinburgh 21, 275. 1855.

daß für alle von ihm untersuchten Farbenmischungen ein derartiges additives Gesetz gültig ist. Allerdings hat MAXWELL seinerzeit den Weg zur absoluten Reinheitsbestimmung nicht gefunden, obwohl für die von ihm untersuchten Probleme eine derartige Möglichkeit äußerst wünschenswert und förderlich gewesen wäre. Somit hat sein Beweis von der additiven Beschaffenheit der Farbenmischungen noch den Umweg einschlagen müssen, daß er die Komponenten seiner Mischungen mit unbekanntem Koeffizienten behaftet mußte, von denen er nur gemäß dem additiven Prinzip die Voraussetzung machte und durchführte, daß sie nur von der Natur der jeweiligen Farbe abhängig sind und somit durch alle Mischungen, die mit dieser erzeugt werden, unveränderte Werte beibehalten.

Ich kann hinzufügen, daß meine bisherigen Untersuchungen ohne Ausnahme im gleichen Sinne ausgefallen sind. Wenn auch gelegentlich auf frisch eröffneten Gebieten Widersprüche und Unstimmigkeiten aufzutreten schienen, so hat doch die eingehendere Arbeit in jedem einzelnen Falle ergeben, daß die Widersprüche nur scheinbar waren und daß vielmehr die genaue Feststellung der vorliegenden Verhältnisse regelmäßig auf eine Bestätigung des additiven Prinzipes geführt hat. Demgemäß kann man es als bisher immer und ohne Ausnahme bewiesen ansehen. Und wenn man auch die grundsätzliche Vorsicht bei aller wissenschaftlichen Forschung beobachten wird, nach welcher man die Möglichkeit widersprechender Fälle und die alsdann eintretende Notwendigkeit einer allgemeineren Fassung des fraglichen Prinzipes grundsätzlich zuzugeben bereit ist, so darf es doch zunächst mit dem Vertrauen benutzt werden, daß es niemals in die Irre und höchstens bei anscheinenden Ausnahmen zu neuen wichtigen Entdeckungen führen wird.

132. Der absolute Charakter der Reinheit und des Grau. Die Messung der wichtigen Größen h_1 und h_2 kommt auf die Bestimmung der Helligkeit im homogenen Licht heraus, reduziert sich mit anderen Worten auf die fundamentale Aufgabe der Photometrie. Diese Aufgabe wird, wie bekannt, allgemein gelöst, indem man zwei Flächen gleicher Helligkeit herstellt. Die Veränderung, welche man aus der Helligkeit der einen Fläche eintreten läßt, um sie mit der anderen Fläche gleich zu machen, muß vermöge irgendeines als exakt bekannten optischen Prinzipes die Messung

jener Helligkeit unabhängig von der Schätzung des Auges gestatten. Das Auge hat hierbei nichts weiter zu leisten, als die Gleichheit der eingestellten beiden Helligkeiten zu kontrollieren und dient, entsprechend den allgemeinen Begriffen der physikalischen Meßkunst, nur als Nullinstrument. An die Stelle des Auges könnte demgemäß jedes beliebige andere Radiometer treten, d. h. jedes Instrument, welches durch die empfangene Strahlung so beeinflusst wird, daß sich jeder Strahlungsintensität irgendeine entsprechend veränderte Einstellung zuordnet. Das Auge hat vor allen anderen Radiometern den Vorzug, daß es stets zur Hand ist, dagegen den Nachteil, daß seine Empfindlichkeit nicht beliebig gesteigert werden kann, sondern bei einigen Zehntel Prozenten eine unabänderliche Grenze findet.

Hieraus geht für die Bestimmung der Größen h_1 und h_2 , die für die gesamte Chromometrie fundamentale Tatsache hervor, daß diese Größen von der physiologischen Beschaffenheit des Auges und der psychologischen des zugeordneten Nervenapparates völlig unabhängig sind. Abhängig von beiden ist nur die Genauigkeit, mit welcher die Größen bestimmt werden können, nicht aber ihr Betrag. Diesem kommt vielmehr ein *absoluter* Charakter im physikalischen Sinne zu, da er eindeutig durch die Beschaffenheit der remittierenden Oberfläche bestimmt wird.

Diese Tatsache, daß der größere Teil der Chromometrie, nämlich der auf die Reinheit und das Grau bezügliche einen absoluten, von der subjektiven Veränderlichkeit des Auges unabhängigen Charakter hat, ist höchst bemerkenswert und steht in bestimmtestem Gegensatz zu allem, was bisher über diese Frage ausgesprochen und demgemäß auch gedacht worden ist. Der Umstand, daß die dritte Veränderliche des Gebietes, der Farbton, zweifellos von der subjektiven Beschaffenheit des Auges abhängt, hat offenbar die Vermutung mit sich gebracht, daß auch die beiden anderen Variablen der Farbe die gleiche Abhängigkeit zeigen müssen; mir ist bisher keine Arbeit bekannt geworden, welche diese Frage auch nur als zweifelhaft behandelte. Um so bestimmter ist die bemerkenswerte Tatsache von der objektiven oder physikalisch absoluten Beschaffenheit der genannten beiden Größen hervorzuheben.

Weiterhin besteht die nicht weniger bemerkenswerte Tatsache, daß die Reinheit und das Grau der gemischten Farben ihrem

Zahlenwerte nach auch völlig unabhängig sind von allen konventionellen Einheiten für die fundamentalen Größen der gesamten messenden Wissenschaft. Daß sich diese auf drei, nämlich Länge, Zeit und Masse reduzieren lassen, ist ein Irrtum, der lange verbreitet war, gegenwärtig aber als erledigt betrachtet werden kann. Vielmehr ist für jedes Gebiet, das irgendeiner bestimmten Energieart zugehört, noch eine vierte, willkürlich zu wählende Größe frei zu bestimmen, welche im Verein mit den drei genannten zur Definition aller in diesem Gebiete vorkommenden Größen ausreicht. Auch bezüglich der drei genannten ist es zweckmäßig, an Stelle der *Masse*, die mit ausgedehnten Gebieten, insbesondere der Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus unmittelbar gar nichts zu tun hat, die Energie zu setzen, deren Einheit für alle physikalischen Messungen ohne Ausnahme maßgebend ist.

Alle diese Tatbestände kommen nun bemerkenswerterweise für die Bestimmung der Reinheit und des Grau nicht in Betracht. Vielmehr stellen beide Größen unbenannte, also von *allen* Einheiten unabhängige Zahlen dar. Denn die unmittelbaren Ergebnisse der Messung, die Größen h_1 und h_2 sind solche unbenannte Zahlen, da sie durch Division zweier gleichartiger Größen miteinander entstehen. Diese gleichartigen Größen sind die Helligkeit des Aufstriches in den beiden polaren Spektralgebieten und die Helligkeit, welche ein ideal weißer Körper unter gleichen Bedingungen zeigen würde. In der Tat überzeugt man sich auch bei der Messung, daß es vollkommen gleichgültig ist, welche Einheiten für die Strecke, die Zeit und die Energie oder Masse man annimmt, wenn man eine der Größen h_1 oder h_2 bestimmen will. Jener absolute oder von allen anderen Verhältnissen unabhängige Charakter der beiden chromometrischen Urvariablen findet hierdurch gleichsam eine experimentelle Bestätigung.

133. Ideale Grenzfälle. Um die Bedeutung der fundamentalen Versuche zur Bestimmung von h_1 und h_2 ganz zu übersehen, tun wir am besten, zunächst das Verhalten „idealer“ Aufstriche in den Grenzfällen zu untersuchen, zwischen denen sich das tatsächlich Vorhandene einordnen muß. Hätten wir zunächst einen Aufstrich, welcher in der Weise der älteren irrtümlichen Auffassung homogenes Licht (also praktisch gesprochen ein naheliegendes Wellenlängenbündel) remittiert und alles andere Licht absorbiert, so würde sein Verhalten im Spektrum folgendes sein: In dem

größten Teil des Gesamtspektrums würde der Aufstrich schwarz aussehen. Nur in dem kleinen Gebiet der Wellenlängen, welche er remittiert, würde er plötzlich aufleuchten und (ideale Remission vorausgesetzt) so hell aussehen wie ein ideal weißer Körper. Darüber hinaus würde sofort wiederum das schwarze Aussehen eintreten.

Nun wissen wir, daß eine gesättigte Farbe (entsprechend den Untersuchungen des vierten Stückes) keineswegs identisch ist mit homogenem Licht, daß vielmehr ihr Remissionsvermögen über ein volles Farbenhalf sich erstreckt, wiederum allerdings im idealen Grenzfall. Ein solcher Aufstrich würde sich folgendermaßen verhalten. Für ihn zerfällt das gesamte Spektrum in zwei Gebiete, die gemäß den Kurvenzügen der Fig. 3 S. 480 durch je ein Paar Gegenfarben begrenzt sind, in denen er ein entgegengesetztes Verhalten betätigt. Da er nämlich ein vollständiges Farbenhalf ohne Absorption remittiert, so wird er in dem ganzen Teil des Spektrums, welches diesem Farbenhalf entspricht, so hell wie ein ideales Weiß aussehen, während er in dem ganzen anderen Teil sich als ideal schwarz betätigen würde. Während also im ersten Falle das helle Gebiet auf einen engsten Bezirk beschränkt war, erstreckte es sich in diesem Fall über ungefähr die Hälfte des Spektrums. Gleiches gilt für das dunkle Gebiet.

Die praktische Bedeutung dieses Verhaltens ist sehr groß. Sie geht dahin, daß es nicht erforderlich ist, die beleuchtende Farbe ängstlich aus einem ganz bestimmten Spektralgebiet zu nehmen, sondern man kann innerhalb eines breiten Umfanges jedes dazwischen liegenden Licht benutzen und erhält doch immer nur die Werte h_1 oder h_2 , je nach dem Spektralgebiet.

134. Praktische Fälle. Die wirklichen Aufstriche nähern sich jenem Ideal mehr oder weniger. Die Abweichungen bestehen darin, daß der Übergang von einem Spektralgebiet zum anderen nicht plötzlich wie im idealen Fall erfolgt, sondern stetig ist und um so langsamer verläuft, je unvollkommener die Bedingungen der idealen Sättigung erfüllt sind. Demgemäß werden die Spektralgebiete größter Remission und Absorption beide gegenüber der theoretischen Grenze eingeeengt sein. Doch wird insbesondere bei ausgeprägten Farben diese Einengung nur einen verhältnismäßig kleinen Teil des ganzen Gebietes betragen, so daß immerhin eine erhebliche Breite im Spektrum übrig bleibt, in welcher die maxi-

male Absorption oder Remission unabhängig von der dazwischen erfolgenden Änderung der Wellenlänge besteht.

Diese erste Einschränkung des idealen Falles bezieht sich auf die Stetigkeit der Übergänge an den beiden Rändern des Absorptionsgebietes der Pigmente. Außerdem kommt noch eine andere Abweichung in Frage, nämlich daß das remittierte Licht nicht allein aus den farbigen Anteilen besteht, welche zur Herstellung der gesättigten Farbe nötig sind, sondern außerdem noch weißes Licht enthält. Ebenso beschränkt die Absorption sich nicht ausschließlich auf das komplementäre Gebiet, sondern besteht auch teilweise im remittierten Gebiet. Beide Ursachen werden in dem Sinne wirken, daß in den hellen Gebieten der Auftrag nicht die theoretische Grenze erreicht, d. h. nicht so hell aussieht, wie wenn er aus idealem Weiß bestände, ebenso wie im dunklen Gebiete die theoretische Grenze nicht erreicht, d. h. nicht ein absolutes Schwarz erzeugt wird, sondern ein Anteil weißen bzw. gleichfarbigen Lichtes remittiert wird. Dies gilt für alle trüben Farben. Deren Verhältnisse sind bereits erörtert worden und haben hier nur Erwähnung gefunden, um ihnen ihre theoretische Stellung anzuweisen.

135. Die Anwendung von Lichtfiltern. Die angestellten Betrachtungen zeigen nun einen Weg, wie man um die immerhin unbequeme Herstellung eines genügend lichtstarken und ausgedehnten Spektrums zum Zweck der Reinheitsbestimmung herumkommen kann. Da die Remission innerhalb eines mehr oder weniger breiten Spektralgebietes konstant bleibt, so genügt es offenbar, die Aufstriche durch Lichtfilter zu beobachten, deren durchgelassenes Strahlengebiet etwas enger ist, als jenes kritische. Je enger ferner das Strahlengebiet ist, welches das Lichtfilter durchläßt, um so mehr dehnt sich der Teil des Farbkreises aus, dessen zugehörige Aufstriche mit ein und demselben Lichtfilter untersucht werden können. Der theoretische Grenzfall geht wieder dahin, daß mit einem Lichtfilter, welches ganz homogenes Licht durchläßt, bei ideal gesättigten Aufträgen der ganze Farbkreis untersucht werden könnte, nämlich die eine Hälfte auf h_1 und die andere auf h_2 . Je mehr sich das Lichtfilter diesem Ideal annähert, um so umfassender wird das Gebiet, für welches es anwendbar ist. Dabei ist wegen der vollständigen Symmetrie des remittierten wie des absorbierten Gebietes im idealen Grenzfall das Filter ebenso brauchbar, ob es sich um ein *Sperrfilter* handelt, d. h. eines, wel-

ches die Aufgabe hat, das Licht des Aufstriches zurückzuhalten, wie wenn es als *Durchlaßfilter* dienen, d. h. zur Beobachtung der hellsten Remission benutzt werden soll.

Tatsächlich hat sich herausgestellt, daß in dem günstigsten praktischen Falle, nämlich beim äußersten Rot, wo man eine ziemlich erhebliche Lichtmenge durchlassen kann, ohne die Farbe des durchgegangenen Lichtes wesentlich zu verändern und wo auch die optischen Eigenschaften der mit selektiver Absorption begabten Stoffe eine verhältnismäßig scharfe Abgrenzung gestatten, etwa 0,4 des Farbkreises mit demselben Filter untersucht werden kann. Allerdings ist dieses bei weitem der günstigste Fall und in den anderen Spektralgebieten muß man sich mit engeren Gruppen begnügen. Immerhin sind aber auch diese breit genug, daß eine verhältnismäßig kleine Zahl, rund sechs Filter genügt, um Farben aus dem ganzen Farbkreise, d. h. alle überhaupt vorkommenden, zu bearbeiten.

Durch diesen Umstand ist die chromatische Analyse jeder vorgelegten Farbe eine verhältnismäßig leicht und schnell ausführbare Operation geworden, die sich etwa der maßanalytischen Alkalimetrie und Azidimetrie in der Schnelligkeit, wenn auch noch nicht in der Genauigkeit an die Seite stellen läßt.

136. Vorarbeiten zu den Lichtfiltern. Um sich eine Vorstellung von der Wirkungsweise eines Lichtfilters gegenüber den hier vorliegenden Aufgaben zu verschaffen, stellt man sich einen fünfzig- oder hundertteiligen Farbkreis von 30 bis 50 cm Durchmesser aus möglichst reinen Aufstrichen her und betrachtet ihn durch die zu prüfenden Lichtfilter. Sind diese mäßig gefärbt, so läßt sich die Buntheit des Farbkreises noch gut erkennen. Dies ist ein Zeichen dafür, daß die Absorption des Lichtfilters zu gering ist. Macht man die Färbung stärker, so verschwindet ein Gebiet der bunten Farben nach dem anderen und zuletzt bleibt nur ein Unterschied von hell und dunkel übrig. Dann erscheint ein erheblicher Teil des Farbkreises so dunkel, als das von den Aufstrichen noch zurückgeworfene weiße Licht gestattet, und der entgegengesetzte Teil annähernd oder ganz so hell, wie eine rein weiße Schicht. Beide Gebiete sind durch einen Übergang verbunden, dessen Verlauf von der Absorptionskurve des angewandten Lichtfilters abhängt. Es läßt sich im allgemeinen sagen, daß je farb-reiner der Lichtfilter ist, um so steiler auch die Übergänge

zwischen Schwarz und Weiß ausfallen. In den häufigen Fällen, wo das von einem Farbstoff durchgelassene Licht aus zwei durch ein breites Band getrennten Teilen des Spektrums besteht, ist es notwendig, den einen oder anderen Teil durch ein geeignetes einseitig absorbierendes Pigment zu beseitigen. Dies tritt nicht nur bei violetten und blauen Pigmenten ein, deren Absorptionsgebiet inmitten des Spektrums liegt, sondern ist auch regelmäßige Eigentümlichkeit fast aller grünen Farbstoffe, die mit ganz geringen Ausnahmen äußerstes rotes Licht durchlassen und dadurch die Herstellung einheitlicher Lichtfilter erheblich erschweren.

Dieser Umstand, daß ein einzelner Farbstoff im allgemeinen nur ein breites Band aus dem Spektrum herausnimmt, das mit steigender Konzentration langsam breiter wird, macht es im allgemeinen notwendig, *zwei* Farbstoffe zu kombinieren, deren Bänder so über- oder nebeneinander fallen, daß nur das beabsichtigte Gebiet durchgelassen wird. Änderungen der Konzentration der einzelnen Farbstoffe gestatten die Grenzen der Bänder um kleine Beträge vorzuschieben und zurückzuziehen, so daß man, so weit nicht die Verschwommenheit der Ränder sich hinderlich erweist, jedes gewünschte Gebiet in jeder Breite abgrenzen kann.

137. Flüssige Filter. Was die technische Herstellung der Filter anlangt, so hat man hier bekanntlich die Wahl zwischen Flüssigkeitsfiltern und festen Filtern. Flüssigkeitsfilter erfordern parallelwandige Tröge und bedingen die daherrührenden Unbequemlichkeiten. Sie haben den großen Vorteil, daß man sie in wenigen Augenblicken herstellen kann und sind daher diejenige Form, in welcher sich die Vorversuchsarbeiten am zweckmäßigsten vollziehen.

Bei trockenen Filtern handelt es sich fast ausschließlich um Pigmente, die in *Gelatine* verteilt sind. Sie sind ein wenig umständlicher herzustellen, haben aber hernach nicht nur den Vorzug bequemer Handhabung, sondern den noch sehr viel erheblicheren, daß Pigmente, die in wäßriger Lösung stark veränderlich zu sein pflegen, in der festen Form einen Teil ihrer Lichtempfindlichkeit, sowie den allergrößten ihrer Veränderlichkeit infolge der Hydrolyse durch das Lösungswasser verlieren. Wenn demgemäß die Vorversuche mit flüssigen Filtern zu Resultaten geführt haben, so tut man gut, mit den gefundenen Pigmenten feste Gelatinefilter herzustellen, natürlich unter Berücksichtigung der Änderungen in

der Absorption der Farbstoffe, welche hierbei nicht auszubleiben pflegen.

Für den hier vorliegenden Zweck brauchen die Filter natürlich nur geringe Größe zu haben, welche durch die Dimensionen eines Brillenglases gekennzeichnet ist. Daher genügen z. B. mikroskopische Objektträger im Format von 26 und 46 mm reichlich. Man biegt sich einen dünnen Glasstab in der Gestalt eines U, dessen Außenmaß die angegebene Breite und Höhe hat, legt dieses zwischen zwei Gläser und hält das Ganze mit Hilfe einer federnden Kopierklammer zusammen. Dann werden die Ränder erwärmt und mit einer dünnen Stange eines Kittes aus einem Teil Wachs und drei Teilen Kolophonium bestrichen. Die geschmolzene Masse zieht sich kapillar in alle Fugen hinein und füllt sie vollständig aus, so daß man nach dem Erkalten ein Gefäß hat, welches sehr lange gegen wäßrige Lösungen standhält. Bei einer Weite von rund 1 mm ist der kapillare Halt der Flüssigkeit in diesem engen Gefäß groß genug, um ein bequemes Handhaben zu ermöglichen. Hat man eine Lösung gefunden, die zweckmäßig erscheint und deshalb länger dienen soll, so vergießt man das Gefäß, das man zu diesem Zweck etwa um 5 mm leer läßt, mit geschmolzenem Paraffin oder Japanwachs, so daß keine Luftblasen dazwischen verbleiben.

Ebenso erhält man sehr bequem zu handhabende Füllungen, wenn man den warmen Lösungen vor dem Eingießen in die Zellen etwa 3 bis 5 Prozent farblose Gelatine hinzusetzt, wodurch sie sich nach dem Gerinnen wie feste Lichtfilter handhaben lassen. Um die Verdunstung hintanzuhalten, ist es gleichfalls zweckmäßig, die Schicht mit geschmolzenem Paraffin zu bedecken.

138. Feste Lichtfilter. In der Literatur finden sich bereits sehr wertvolle Mitteilungen über Gelatine-Lichtfilter, unter denen die von E. KÖNIG¹⁾ und Freiherrn VON HÜBL²⁾ erwähnt werden mögen. Namentlich die letzteren stellen ein Muster wissenschaftlicher Klarheit und Sorgfalt dar und können als Grundlage für jede weitere Arbeit auf dem Gebiete dienen. Was hier hinzugefügt wird, beschränkt sich demgemäß auf diejenigen Punkte, welche für den vorliegenden besonderen Zweck in Betracht kommen.

Als Material für die Herstellung der Lichtfilter dient aus den an den angegebenen Stellen entwickelten Gründen, die vor allen

1) E. KÖNIG, die Farbenphotographie, 3. Aufl., Berlin 1913.

2) A. Freiherr VON HÜBL, die photogr. Lichtfilter, Halle 1910.

Dingen auf der Möglichkeit einer genauen Dosierung beruhen, ausschließlich *Gelatine*, die in warmem Wasser gelöst und mit den gleichfalls in Wasser gelösten Farbstoffen vermischt, filtriert und auf Glasplatten ausgegossen wird. Dort erstarrt sie und wird getrocknet, worauf man das gefärbte Gelatinehäutchen entweder auf dem Glase belassen oder aber vom Glase abziehen und gesondert verwenden kann.

Man beginnt damit, farblose Gelatine in reinem Wasser quellen zu lassen und nach Abgießen des Überschusses zu schmelzen. Ist die Gelatine, was nicht selten vorkommt, salzhaltig, so tut man gut, einige Male das Wasser abzugießen und durch reines zu ersetzen bis der größte Teil des Salzes durch Diffusion ausgetreten ist. Die in der Wärme geschmolzene Masse wird mit einer geringen Menge Thymol (rund 0,1%) versetzt, wodurch sie nahezu unbegrenzte Haltbarkeit gewinnt. Man stellt sich eine zehnprozentige Lösung her, die man in einem heizbaren Trichter durch ein Faltenfilter laufen und hernach erstarren läßt. Teilt man die ziemlich steife Gallerte in einzelne Stücke, so kann man diese in einem weitmündigen Stöpselglase beliebig lange aufbewahren, und in den gewünschten Mengen bequem abwägen, um die erforderlichen Flüssigkeiten zuzusetzen. Diese werden im allgemeinen so eingeteilt, daß die Lösung zuletzt rund fünf Prozent Gelatine enthält, da konzentriertere Lösungen zu schnell erstarren und daher ein gleichförmiges Ausbreiten beim Gießen erschweren. Lösungen unter fünf Prozent erstarren andererseits zu langsam und brauchen zum Trocknen zu lange Zeit. Im allgemeinen genügen 5 g Gelatine auf 100 qcm Filterfläche, die nach dem Trocknen eine Schicht von rund 0,05 mm Dicke bilden. Sollen die Filter in Gestalt von Blättern abgezogen werden, so ist es ratsam, einige Prozente der Gelatine Glycerin zuzusetzen. Zwar vermindert der Glycerin-gehalt die Widerstandsfähigkeit der Farben gegen das Licht, da aber bei der hier in Rede stehenden Verwendung der Farbfilter eine längere Einwirkung starken Lichtes nicht stattfindet, so kommt dieser Umstand nicht viel in Frage, während andererseits der Vorteil, infolge der verminderten Brüchigkeit der Schicht erheblich genug ist, um jenen Nachteil in den Kauf zu nehmen.

Die Glasplatten, welche die Gelatine aufnehmen sollen, sind aus dünnem farblosem Glase zu wählen. Spiegelglas ist für die hier vorliegenden Zwecke nicht erforderlich. Die Glastafeln, welche

zur Herstellung photographischer Platten dienen, sind im allgemeinen sehr geeignet, und wo ein Vorrat unbrauchbarer Negative vorhanden ist, wird man durch Einlegen der Platten in sehr verdünnte Natronlauge und Entfernung der Schicht mit heißem Wasser sich Aufnahmematerial leicht herstellen können. Die Platten werden sauber geputzt und je nachdem die Schicht auf dem Glase bleiben soll oder nicht verschieden behandelt. Im ersten Falle wird eine sehr verdünnte Lösung (1 : 500) von Wasserglas über die Oberfläche gegossen, worauf die Platte zum Abtropfen auf den Plattenbock gestellt wird. Im anderen Falle wird die Oberfläche mit Hilfe eines breiten Pinsels mit Talk eingestäubt, worauf man den überschüssigen Talk solange mit dem Pinsel forträumt, bis mit bloßem Auge keine Stäubchen mehr zu erkennen sind. Sicherer noch wirkt ein Überguß mit einer einprozentigen Lösung von nicht vulkanisiertem Kautschuk in Toluol. Zum Gießen wird zunächst eine große Platte aus dickem Glase vollständig wagrecht ausgerichtet, worauf man die zu überziehenden kleineren Glasplatten darauf legt, um sie mit der warmen farbstoffhaltigen Gelatine-lösung zu übergießen. Man kann bequem 10 ccm der Flüssigkeit auf 100 qcm Glasfläche vergießen, so daß die flüssige Schicht 1 mm stark wird.

Die abgemessene Flüssigkeit wird bei kleinen Platten aus einer Pipette, bei großen aus einem Meßgefäß aufgegossen. Etwa entstandene Luftbläschen nimmt man mit dem trockenen Finger fort, den man von oben mit der Blase in Berührung bringt. Er wirkt viel sicherer als der von KÖNIG empfohlene nasse Finger. Nach dem Erstarren werden die Platten auf Plattenböcke gestellt und zwar mindestens 5 cm voneinander entfernt, weil sonst kein genügender Luftdurchzug eintritt und in dieser Lage getrocknet, was im allgemeinen mindestens 24 Stunden erfordert.

Ganz wesentlich ist, daß man die Flüssigkeit unmittelbar vor dem Begießen *filtriert*. Es ist dazu nicht erforderlich, ein Papierfilter im heizbaren Trichter anzuwenden, vielmehr genügt es, die Flüssigkeit durch einen Pfropfen von Verbandwatte fließen zu lassen, den man durch Einblasen (nicht Drücken mit dem Glasstabe) in dem verjüngten Ende einer weiten Glasröhre befestigt hat. Es handelt sich bei dieser Filtration nicht um die Beseitigung von feinen Stäubchen, die schon durch das Filtrieren der unvermischten Gelatinelösung, sowie der Farbstofflösungen entfernt sein müssen,

sondern um die Beseitigung von Strukturverschiedenheiten, die bei der Vermischung der Gelatinelösung und der Farbstoffe entstehen und durch bloßes Umrühren nicht leicht zu entfernen sind. Sie bewirken Streifen und Unregelmäßigkeiten in der getrockneten Oberfläche des Überzuges, während Lösungen, die man unmittelbar vor dem Vergießen durch lockere Watte filtriert hat, mit spiegelblanker Oberfläche austrocknen und sehr viel befriedigendere Schichten ergeben.

Die zu verwendenden Farbstoffe werden vor dem Gebrauch im warmen Wasser aufgelöst, wobei die Wassermenge nach ihrer Löslichkeit zu bemessen ist und filtriert. In den meisten Fällen sind Lösungen von zwei Prozent zweckmäßig, in denen man die erforderlichen Farbstoffmengen bequem dosieren kann. Farbstofflösung und Gelatinegallerte werden, nötigenfalls unter Zusatz von so viel Wasser, daß eine Schichtdicke von 1 mm erzeugt wird, bei gelinder Wärme geschmolzen, vermischt und nach dem eben beschriebenen Filtrieren durch Watte vergossen.

139. Die Farbstoffe. Was die Wahl der zu verwendenden *Farbstoffe* anlangt, so kommt es für den hier vorliegenden Zweck im wesentlichen darauf an, bestimmte Spektralgebiete möglichst scharf abzusondern. Es ist also wünschenswert, daß die Absorptionsfelder der Farbstoffe mit möglichst kurzem Übergang in die Gebiete vollständiger Durchlässigkeit übergehen. Erfahrungsmäßig zeigen Farbstoffe mit derartig beschaffenem Absorptionsband ein besonders farbreines oder „brillantes“ Aussehen, wofür die Gründe sich aus dem früher Gesagten ergeben. Hier dient die Erscheinung, um aus der Unzahl der vorhandenen Farbstoffe alsbald die besser geeigneten auszuwählen.

Ferner sind die Grenzen der Absorptionsgebiete in weitem Maße von der Konzentration des Farbstoffes abhängig und da für unsere Zwecke Lichtfilter erforderlich sind, bei denen die Absorptionsgebiete an bestimmten Stellen stehen, so ist es nötig, diese Beziehung zwischen Absorptionsgrenze und Konzentration eingehender zu untersuchen. Für eine Anzahl von Farbstoffen ist dieses von Freiherrn VON HÜBL geschehen, doch wird man sich naturgemäß nicht auf die von ihm gemessenen, für photographische Zwecke bestimmten Farbstoffe beschränken, sondern die hier vorliegenden besonderen Aufgaben mit allgemeineren Mitteln zu lösen versuchen.

140. Methodik der Einstellung. Um das ganze Gebiet der Konzentrationen zu übersehen, stellt man sich eine Reihe von Aufgüssen her, deren Konzentrationen wie die Potenzen von $1/2$ abnehmen. Technisch geschieht dieses am einfachsten, daß man sich zunächst die konzentrierteste Lösung herstellt, welche den optischen und chemischen Verhältnissen gemäß ist, von dieser gemessene Mengen durch den Zusatz des gleichen Volums ungefärbter Gelatinelösung auf die Hälfte verdünnt und damit stufenweise fortfährt bis nahezu Farblosigkeit erreicht ist. Es handle sich beispielsweise um die Herstellung von Filtern, die auf der Glasscheibe bleiben sollen, etwa auf Täfelchen von 45 mm Seite, welche 20 qcm Oberfläche haben. Es werden 10 cbcm der konzentriertesten Lösung hergestellt und davon zweimal je 2 cbcm auf Glasplatten vergossen. Denn man tut wohl, von jeder Art zwei Platten zu gießen, da gelegentlich kleine Unfälle eine von ihnen unbrauchbar machen können. Vom Rest werden 5 cbcm mit 5 cbcm reiner, fünfprozentiger Gelatinelösung verdünnt, vermischt, filtriert und hiervon werden wieder 4 cbcm zur Herstellung von zwei Platten verbraucht. Eine neue Mischung von 5 cbcm mit dem gleichen Volum farbloser Gelatine gibt die dritte Stufe und so fährt man fort, bis man acht oder zehn Stufen erhalten hat.

Mittels einer solchen Reihe kann man jede beliebige Farbstoffdichte in Einheiten der geringsten Konzentration bis zum doppelten Betrage der größten zusammensetzen und hat somit ein Mittel an der Hand, die Wirkung jeder zwischen diesen Grenzen liegenden Konzentration auf das durchgehende Licht zu prüfen.

Die Platten werden nach dem Erstarren zum Trocknen aufgestellt und hernach mit einem aufgeklebten Papierstreifen versehen, welcher Farbstoff und Gehalt erkennen läßt. Die getrocknete Gelatineschicht ist sehr widerstandsfähig und bedarf beim Gebrauch für wissenschaftliche Zwecke keines besonderen Schutzes. Will man ein übriges tun, so kann man sie mit einem glänzend auf trocknenden photographischen Negativlack firnissen.

141. Verkitten. Da nur in den seltensten Fällen einheitliche Pigmente Filter mit den erforderlichen Eigenschaften geben, so hat man fast immer mehrere zu kombinieren. Man kann sich wohl stets so einrichten, daß *zwei* Filter genügen, um den angestrebten Zweck zu erreichen. Solche zwei Filter werden dann zweckmäßig mit den Gelatineseiten aneinander geklebt, wodurch sie im Gebrauch

fast unverwüstlich werden. Dieses ist bei kleinen Formaten, die hier in Betracht kommen, eine sehr viel einfachere Operation, als sie von Dr. KÖNIG geschildert wird. Man bringt auf die Mitte der einen Glasplatte (die Gelatineseite läßt sich daran erkennen, daß sie den Hauch nicht annimmt) einen mäßigen Tropfen Canada-balsam, den man mit Toluol so weit verdünnt hat, daß die Masse etwa wie Baumöl fließt. Dann legt man die andere Glasplatte (und zwar nicht von der Kante aus, sondern mit der Mitte) auf den Tropfen, rückt sie zurecht und preßt beide Platten mit Hilfe einer hölzernen Kopierklammer zusammen. Hat man die Menge des Balsams geschickt bemessen, so tritt kein Überfluß an den Kanten hervor, oder höchstens ein Tröpfchen, das man alsbald mit Filtrierpapier fortnimmt. Das Plattenpaar wird dann noch über der Lampe von beiden Seiten gelind erwärmt, wobei der Balsam kapillar an etwa noch unbenetzt gebliebene Stellen vordringt und ein Teil des Toluols am Rande verdampft. Nach dem Kaltwerden haften beide Platten genügend fest aneinander, um sich an den Rändern mit schwarzem Papier einfassen zu lassen. Noch bequemer sind Heftpflasterstreifen (Leukoplast) von 1 cm Breite, die auf dem Glase ausgezeichnet haften.

Die fertigen Filter werden mit einer Fahne aus zähem Papier versehen, auf welcher die Kennzeichnung des Filters angebracht wird. Wegen der wohlbekannten Vorzüge binokularer Beobachtung wird man zweckmäßig zwei gleiche Filter, eines für jedes Auge, benutzen, die man auf einem Gestell nach Art einer Auto- oder Schneebrille befestigt, durch welches das Auge vollkommen gegen seitliches Licht geschützt wird. Zur Aufnahme der Lichtfilter dienen beiderseits Rahmen, welche ein leichtes Auswechseln gestatten. Für Augen, welche zum scharfen Sehen der Brille bedürfen, befestigt man rohe Brillengläser von den erforderlichen optischen Eigenschaften, die man um ein geringes bei jedem Optiker kaufen kann, an der eben beschriebenen Farbenbrille, so daß diese mit den gewöhnlich getragenen Augengläsern nicht in Konflikt zu kommen braucht.

142. Beleuchtung. Die Technik der Messungen mit derartigen Lichtfiltern kommt darauf hinaus, daß man gleichzeitig den zu untersuchenden Aufstrich und eine Skala neutralgrauer Aufstriche durch das Filter beobachtet und denjenigen grauen Aufstrich bestimmt, dessen Helligkeit mit der des farbigen unter

den Beobachtungsbedingungen übereinkommt. Wie oben (Nr. 132) bewiesen worden ist, sind die Resultate solcher Beobachtungen sowohl unabhängig von der Natur des benutzten Lichtes, wie von der besonderen Beschaffenheit des Auges, mit dem die Beobachtungen ausgeführt werden und haben somit einen absoluten Charakter. Dies bedingt eine weitgehende Freiheit in bezug auf die Umstände, unter denen man die Messungen ausführt. Insbesondere ist man keineswegs auf das Tageslicht angewiesen, sondern man kann mit gleichem Erfolg und mit zuweilen erhöhter Bequemlichkeit Messungen bei beliebigem künstlichen Licht machen. Nur wird in bezug auf letzteres zu berücksichtigen sein, daß das künstliche Licht meist sehr viel weniger blaue und violette Strahlen enthält, als das Sonnenlicht, während es an rotem Licht sehr viel reicher ist. Dies bedingt einerseits eine Erschwerung der Messungen im blauen und violetten Gebiet und andererseits eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Spuren von rotem Licht, dessen Beseitigung einigermaßen schwierig ist. Lichtfilter, welche bei Tageslicht orangefarbene und rote Aufstriche grau erscheinen lassen, zeigen diese bei künstlichem Licht zuweilen noch ausgeprägt rot. Es ist deshalb zweckmäßig, für solche Arbeiten ein künstliches Licht zu verwenden, das möglichst wenig rote und möglichst viel blaue und violette Strahlen enthält, wofür die moderne Technik neben dem Bogenlicht bereits eine ganze Reihe weiterer Hilfsmittel geschaffen hat. Für den Kleinbetrieb kommt Azetylenlicht am ehesten in Frage.

143. Meßverfahren. Zur Helligkeitsbestimmung kann grundsätzlich jedes Photometer dienen, welches man an seinem Okularende mit einer Vorrichtung versieht, um die jeweils gebrauchten Lichtfilter einzuschieben. Indem man beispielsweise mit dem früher beschriebenen Halbschattenphotometer derartig verfährt und die beiden Seiten desselben einerseits mit einem Aufstrich von reinem Bariumsulfat, andererseits mit dem zu untersuchenden Aufstrich beschickt, kann man die Spaltbreite auf der ersten Seite solange ändern, bis das Gesichtsfeld gleichförmig geworden ist. So gewinnt man ein unmittelbares Maß für die Helligkeit des Aufstriches unter den angegebenen Verhältnissen. Und ebenso, wie man für alle Zwecke, welche nicht die letzte Genauigkeit erfordern, das Photometer durch eine zweckmäßig abgestufte Skala von grauen Aufstrichen ersetzen kann, so kann man auch hier

derart verfahren. Man betrachtet durch dasselbe Lichtfilter den zu untersuchenden Aufstrich und die Grauskala nebeneinander und stellt diejenige Stufe der letzteren fest, welche an Helligkeit mit der des Aufstriches übereinkommt.

Da diese letztere Methode wegen ihrer Einfachheit und der Wohlfeilheit der erforderlichen Hilfsmittel voraussichtlich die meiste Verbreitung und Anwendung finden wird, soll auf sie etwas näher eingegangen werden. Dabei sei vorausgeschickt, daß die beschriebene Ausführungsform nur eine unter vielen Möglichkeiten darstellt und daß es demgemäß nicht ausgeschlossen ist, daß von anderer Seite neue Ausführungsformen angegeben werden, die sich als bequemer oder aus anderen Gründen vorzüglicher erweisen. Zur Ausführung der Messungen dient die unten beschriebene Form der Grauleiter. Man führt unter Betrachtung mit dem Lichtfilter den zu untersuchenden Aufstrich längs dieser Stufenleiter hin und her, bis man die gleichhelle Stufe gefunden hat. Dem Aufstrich gibt man am besten auch die Form eines 3 cm breiten und 6 cm langen Blattes, das man zuletzt so hält, daß zwei nebeneinander liegende graue Felder je zur Hälfte gedeckt werden. Man kann dergestalt sehr genau beurteilen, mit welchem der Felder der Aufstrich übereinstimmt und lernt bald, dazwischen liegende Stufen auf $1/5$ einschätzen. Die Beobachtungen müssen bei senkrechter Sehlinie und um 45° geneigter Richtung des einfallenden Lichtes angestellt werden, da unter dieser Bedingung der durch etwa mangelnden Parallelismus der Flächen bewirkte Fehler am geringsten ausfällt. Die Aufstellung sei so beschaffen, daß in der Blickrichtung keine Schatten erscheinen und die zu vergleichenden Flächen scharf aneinander grenzen. Dies ist bekanntlich die Voraussetzung, unter welcher die genaueste Feststellung der Helligkeitsgleichheit möglich ist.

144. Fehlermöglichkeiten. Überlegt man sich die Fehler, welche bei dieser Art Messung eintreten können, so ergibt sich, daß diese beiderseits die Reinheit eher zu klein, als zu groß erscheinen lassen. Es sind somit *Minimalwerte*, welche man erhält, und man ist unter allen Umständen dagegen geschützt, die Reinheiten vorhandener Aufstriche zu überschätzen. Denn wenn wir zunächst durch das übereinstimmende Lichtfilter die größte Helligkeit aufsuchen, besteht die Gefahr, daß durch ein nicht genügend passendes Lichtfilter, d. h. ein solches, welches einen merklichen

Anteil des vom Aufstrich remittierten Lichtes zurückhält, die Helligkeit h_1 zu klein gefunden wird. Andererseits kann durch das ungenügende Passen des komplementären Sperrfilters die Helligkeit h_2 im dunkelsten Gebiete nur zu groß gefunden werden; es gibt aber keine Möglichkeit, eine geringere Helligkeit zu beobachten, als sie bei idealer Absorption des farbigen Anteils im remittierten Licht erzeugt würde. Da nun die Reinheit gleich der Differenz $h_1 - h_2$ ist, das erste Glied aber nur zu klein, das zweite dagegen nur zu groß gefunden werden kann, so liegen beide Fehlermöglichkeiten in demselben Sinne, die Differenz zu verkleinern und die Reinheit zu gering erscheinen zu lassen.

Es ist deshalb ratsam, sich bei den Beobachtungen die Helligkeitsbestimmungen nicht auf ein Lichtfilter auf jeder Stelle zu beschränken, sondern durch einige nahestehende Filter vergleichend zu untersuchen. Man überzeugt sich bei dieser Gelegenheit, daß oft zwei benachbarte Filter weit genug übereinandergreifen, um die gleichen Einstellungen, sowohl bezüglich der maximalen, wie der minimalen Helligkeit zu ergeben. Wo dieses nicht eintritt, hat man Veranlassung, ein neues Filter herzustellen, welches zwischen den vorhandenen liegt und dadurch ein vollständiges Übereinandergreifen ermöglicht. Gleichzeitig lassen derartige Beobachtungen das Maß der Unsicherheit erkennen, welches von der Benutzung dieses Hilfsmittels herrührt. Man wird sie geringer finden, als man auf den ersten Blick erwarten sollte und nicht größer, als die übrigen Fehlermöglichkeiten.

145. Filterpigmente. Es ist bereits darauf hingewiesen worden, daß zu Lichtfiltern sich am meisten möglichst lebhaft gefärbte Pigmente eignen, da bei diesen die Bedingung zur scharfen Einschließung bestimmter Spektralgebiete, nämlich eine möglichst gute Begrenzung der Absorptionsstreifen und die Abwesenheit von sekundären Streifen und Schatten im Spektrum am besten gewährleistet ist. Immerhin ist dieses nicht immer zutreffend und es ist daher zweckmäßig, Farbstoffe, die man für Filterzwecke verwenden will, in bezug auf diese Eigenschaft vorher spektroskopisch zu untersuchen. Die meisten bisherigen Arbeiten auf den Gebieten der Spektrographie der Pigmente beziehen sich auf die Lage der Absorptionsstreifen, welche naturgemäß bei möglichst weitgehender Verdünnung am besten festzustellen ist. Hier kommen dagegen die Absorptionsverhältnisse bei mittleren und stärkeren Konzen-

trationen in Betracht, bei welchen häufig getrennte Streifen zusammenfließen und über deren Einzelheiten die vorhandene Literatur nur unvollkommen Auskunft gibt. Demgemäß soll von vornherein betont werden, daß es zweifellos eine große Anzahl von Pigmenten geben wird, die dasselbe oder besseres leisten als die von mir benutzten. Da es sich aber auch hier um den Gegensatz zwischen erstmaligem Betreten des Gebietes und sorgfältiger Ausarbeitung des vorhandenen Besitzes handelt, so werden die nachfolgenden Mitteilungen über die erste Hälfte dieser Operation die zweite zu erleichtern geeignet sein.

1. *Chinolingelb* wurde mit übereinstimmenden Eigenschaften von den Fabriken Bayer und Agfa geliefert. Der Farbstoff gehört der sauren Gruppe an. Er hat ein reines Gelb zwischen Nr. 0 und 2 und die Absorption erstreckt sich demgemäß über das ganze violette, blaue und grünlich blaue Gebiet bis etwa zur Wellenlänge 500.

2. *Tatrazin*. Sauer. Der Farbton ist Nr. 6 bis 8, also rötlich gelb. Die Absorption erstreckt sich gleichfalls über die ganze kurzwellige Hälfte des Spektrums, geht aber weiter, ungefähr bis 520.

3. *Bengalrosa*. Dieser saure jodhaltige Eosinfarbstoff gehört zu den am meisten nach der bläulichen Seite verschobenen Pigmenten der Gruppe. Er hat ein breites Absorptionsgebiet im Grün, etwa zwischen 475 und 600, läßt also bereits einen erheblichen Anteil Violett durch. Dadurch eignet er sich einerseits zur Herstellung von Rotfiltern, indem man ihn mit anderen Filtern kombiniert, welche die kurzen Wellen fortnehmen und ebenso zur Herstellung von Violettfiltern durch Vernichtung der langwelligen Seite. Bemerkenswert ist, daß nach den Beobachtungen von HÜBL dieser unter gewöhnlichen Umständen sehr lichtempfindliche Farbstoff in Gelatine sich hochgradig lichtecht erweist.

4. *Guineaviolett* Agfa. Ein saurer Farbstoff von rein violetter Farbe, der ähnlich wie der vorige nur in anderem Verhältnis beide Enden des Spektrums durchläßt unter Absorption des mittleren Gebietes. Da das durchgelassene rote Licht auf ein ziemlich enges Band am äußersten Ende des sichtbaren Rotes beschränkt ist, so gibt der Farbstoff nach Absorption der kurzen Wellen ein sehr wertvolles Lichtfilter für das äußerste Rot.

5. *Methylviolett 4 B und R*. Diese altbekannten basischen Farbstoffe werden mit übereinstimmenden Eigenschaften von den ver-

schiedenen Fabriken hergestellt. Ihre Absorptionsverhältnisse sind denen des Guineaviolett sehr ähnlich, nur daß das Methylviolett *R* ein breiteres Gebiet im Rot durchläßt und dementsprechend auch ein helleres Rotfilter ergibt. Beide Pigmente eignen sich gleichfalls für die Herstellung von Blau- und Violettfiltern. Ihre sehr geringe Lichtechtheit kann nach HÜBL durch Zusatz von Kupfersulfat zur Gelatinelösung verbessert werden. Die erforderliche Menge ist nicht groß, ein Gehalt gleich dem an Farbstoff ist mehr als ausreichend.

6. *Naphtolgrün* Agfa. Ein saurer, infolge diffuser Absorption ziemlich trüb aussehender Farbstoff. Trotz dieser Eigenschaft, welche ihn sonst für einen Filterfarbstoff ungeeignet machen würde, ist er unentbehrlich, weil er der einzige mir zur Zeit bekannte grüne Farbstoff ist, welcher das Rot vollständig absorbiert. Bis auf weiteres sind wir also auf seine Verwendung angewiesen, es soll aber nicht unterlassen werden, an dieser Stelle an die Fachmänner die Bitte zu richten, aus der unübersehbaren Menge der grünen wasserlöslichen Farbstoffe noch einen oder den anderen schöner gefärbten ausfindig zu machen und zu bezeichnen, welcher die gleiche spektrale Eigenschaft besitzt.

7. *Berlinerblau*. Auch dieser Farbstoff ist durch die so ungewein seltene Absorption des roten Endes ausgezeichnet. Er ist neben dem Naphtolgrün unentbehrlich, weil dieses neben seiner roten auch noch eine violette Absorption besitzt, welche beim Berlinerblau zwar nicht völlig fehlt, sich aber doch erst bei höheren Konzentrationen störend bemerkbar macht. Da der Farbstoff als solcher nicht in Wasser löslich ist, so muß er im Zustande kolloider Verteilung benutzt werden und es ist daher nötig, auf sein Verhalten etwas ausführlicher einzugehen.

Das Absorptionsgebiet beginnt bereits bei großer Verdünnung das äußerste Rot zu decken und dringt von dort bei zunehmender Konzentration in ganz regelmäßiger Weise nach den kürzeren Wellen vor. Je stärker man also die Lösungen macht, umso kürzer wird das Spektrum am roten Ende und bereits bei recht mäßigen Stärken, welche das Filter mittelblau erscheinen lassen, wird das Rot bis zur Grenze des Gelb vollständig zurückgehalten.¹⁾

1) In der Verwendung des Berlinerblau für blaue Lichtfilter ist P. KRAIS vorgegangen. Zeitschr. f. angew. Chemie 1914, S. 34.

Zur Herstellung der Lichfilter kann man verschiedene Wege einschlagen. KRAIS behandelt eine ausfixierte photographische Platte zunächst mit einer Eisenchloridlösung und sodann mit einer Lösung von gelbem Blutlaugensalz. Das Verfahren gestattet keine Gehaltsbestimmung. Versucht man Blutlaugensalz mit Gelatine auf Platten auszugießen und diese nach dem Erstarren in einer Eisenlösung auszufärben, so stellt sich heraus, daß alsbald der aus den klassischen Untersuchungen PFEFFERS wohlbekannte halbdurchlässige Niederschlag an der Grenze entsteht, welcher das weitere Eindringen der Eisenlösung auf lange Zeit behindert und eine gleichförmige Durchfärbung zu einem seltenen Zufalle macht. Wenn man gelatinehaltige Blutlaugensalz- und Eisenlösungen zusammenbringt, entstehen neben einem kolloid gelösten Anteil Flocken, welche abfiltriert werden müssen und damit eine genaue Dosierung verhindern. Nach verschiedenen Versuchen habe ich folgendes Verfahren gefunden. Käufliches bestes Berlinerblau („Pariserblau“) wird mit 0,3 Prozent seines Gewichtes Oxalsäure und etwas Wasser zusammengerieben. Es zergeht unter diesen Umständen schnell zu einer tiefblau gefärbten kolloiden Flüssigkeit, welche man mit Wasser verdünnen, filtrieren und der warmen Gelatine-lösung zufügen kann, wobei sich die Flockenbildung leicht vermeiden läßt. Die Gelatine muß für diesen Zweck besonders sorgfältig durch Auswässern von dem oft vorhandenen Gehalt an Chlorkalzium befreit werden, damit nicht durch Fällung von Kalziumoxalat eine unerwünschte Trübung des Filters eintritt.

Da die Lösung mit manchen Farbstoffen Niederschläge gibt, stellt man Platten mit reinem Berlinerblau in verschiedener Stärke her. Die Absorption schreitet von der roten Seite aus regelmäßig vor, wobei allerdings zu bemerken ist, daß gleichzeitig mit der kräftigen Absorption an dem roten Ende des Spektrums eine schwächere am anderen eintritt, so daß bei etwas stärkeren Berlinerblau-Platten auch das violette Ende verkürzt erscheint.

8. *Methylenblau*. Es wurde eine Marke 2 B, Kristalle extra D der Agfa benutzt. Der basische Farbstoff erleidet in wäßriger Lösung starke Hydrolyse, so daß man ihn mit einigen Tropfen Essigsäure schützen muß. Das Absorptionsbild ist ziemlich zusammengesetzt, insbesondere im Rot, doch fließen die dort vorhandenen

Streifen bei zunehmender Konzentration zusammen, so daß die Absorption ziemlich vollständig wird. Das Violett geht besser durch, als bei dem sonst ähnlich gefärbten Berlinerblau.

146. Bestimmung der Konzentration und Kombination.

Aus den vorher beschriebenen Farbstoffen wurden in bekannter Weise Gelatinefilter gegossen, deren Konzentrationen wie die Potenzen von $1/2$ abnahmen. Aus gleichnamigen und verschiedenen Platten, deren vorher bestimmte Absorptionsverhältnisse die gewünschte Wirkung erwarten ließ, wurden dann Lichtfilter versuchsweise zusammengestellt, deren Prüfung folgendermaßen vorgenommen wurde. Ein Farbkreis von 100 Stufen wurde in Gestalt eines Kreises von 38 cm Durchmesser aufgeklebt und durch die zu prüfenden Lichtfilter betrachtet. War die Absorption zu gering, so traten die Verschiedenheiten des durchgelassenen Lichtes in einem Rest von Buntheit des Farbkreises zutage. In dem Falle, daß die Absorption genügend ist, verschwindet diese Buntheit, und der Farbkreis teilt sich in eine dunkle und eine helle Hälfte, die je nach der Beschaffenheit des Filters durch kürzere oder längere abgestufte graue Übergänge verbunden sind. Die Aufgabe ist, die Konzentration einerseits so hoch zu wählen, daß jeder Rest von Buntheit verschwindet und sie andererseits in so mäßigen Grenzen zu halten, daß noch eine hinreichende Lichtmenge durch das Filter tritt. Denn die zum Teil recht starke Verdunkelung der Lichtfilter ist die wesentlichste Ursache, durch welche die Fehlergrenze der Reinheitsmessungen heraufgesetzt wird.

Die Kombinationen, welche sich am Farbkreise als brauchbar erwiesen haben, werden nun einer strengeren Prüfung dergestalt unterworfen, daß man mit ihrer Hilfe an der Grauskala die entsprechenden Gebiete des Farbkreises in Gestalt möglichst reinfarbiger Aufträge auf ihre Helligkeit untersucht. Bei dieser Gelegenheit kommen noch Reste von Farbigeit zur Geltung, die bei der summarischen Beobachtung des Farbkreises nicht mehr in die Erscheinung traten, indem der Aufstrich gegenüber den normalgrauen Stufen der Grauskala sich entsprechend gefärbt erweist. Der Umstand, daß die Helligkeit durch Aufsuchung der entsprechenden Graustufe bei den beiden zu vergleichenden Flächen gleich gemacht wird, erleichtert sehr die Erkennung von Resten einseitiger Färbung. Dann wird die Korrektur vorgenommen, in-

dem man den einen oder den anderen Bestandteil des Lichtfilters, der durch die Beschaffenheit der übrig gebliebenen Färbung kenntlich gemacht wird, in bezug auf seine Konzentration etwas höher nimmt, bis die störende Erscheinung verschwunden ist.

Sind so die besten Konzentrationsverhältnisse ermittelt, so werden neue Gelatineaufgüsse in den betreffenden Konzentrationen hergestellt. Es vermehrt die Arbeit kaum merklich, wenn man die Anzahl der gegossenen Platten etwas hoch nimmt, um Material für eine größere Anzahl Filter vorrätig zu haben.

Bezüglich der Bezeichnung der Konzentrationen habe ich mich den durchaus sachgemäßen Vorschlägen HÜBL'S angeschlossen. Nach ihm ist die Konzentration 1 durch 1 g Pigment auf 1 qm Fläche gegeben. Richtet man sich, wie oben angeführt, dergestalt ein, daß die fertigen Lösungen 5 Prozent Gelatine und daneben die erforderlichen Mengen der Farbstoffe enthalten, so kann man diese so bemessen, daß ihre Einheit 1 g im Liter ist. Dieses bedingt, daß die Flüssigkeit 1 mm hoch auf das Glas gegossen wird, welches eine in jeder Beziehung bequeme Abmessung darstellt. Man wird also, wenn es sich darum handelt, die nachstehend angegebenen Rezepte auszuführen, die angegebenen Zahlen als Gramme auf 1 Liter auffassen können und braucht dann nur dafür Sorge zu tragen, daß auf je 10 qcm Filterfläche 1 cbcm der gießfertigen Lösungen verbraucht wird.

147. Vorschriften. Nachfolgend gebe ich die Vorschriften für eine Anzahl von Filtern an, die ich bei meinen Untersuchungen benutzt habe. Die Mannigfaltigkeit der hergestellten Filter ist größer, als die unbedingte Notwendigkeit es mit sich bringen würde. Ebenso war es mir nur willkommen, wenn verschiedene Filter mehrfach übereinander greifen, so daß man dieselben Teile des Farbenkreises unabhängig voneinander untersuchen konnte. Jedes Filter ist aus zwei verschiedenen Elementen mit Hilfe von Kanadabalsam zusammengekittet.

Die nachstehende Tabelle enthält die laufenden Nummern des Filters, die Angabe der Farbstoffe und ihrer Konzentrationen, das durchgelassene Strahlengebiet in Wellenlängen, die Nummern des Teilkreises des Farbenkreises, für welche das Filter benutzt werden kann. Hierbei ist die Anwendung als Paßfilter für die Bestimmung von h_1 mit dem Pluszeichen, die als Sperrfilter zur Bestimmung von h_2 mit dem Minuszeichen versehen worden.

No.	Zusammensetzung	Durchgelassene Wellenlängen	Anwendungsgebiet im Farbkreis als	
			Paßfilter +	Sperrfilter —
1	Tartrazin 10 Bengalrosa 10	595—690	N. 0 bis 25	N. 52 bis 86
2	Methylviolett R 0,6 Tartrazin 10	625—690	0 bis 36	—
3	Guineaviolett 2,5 Tartrazin 10	660—690	0 bis 47	—
5	Methylenblau 1,25 Guineaviolett 2,5	415—480	48 bis 68	89 bis 20
5a	Methylenblau 2,5 Guineaviolett 2,5	415—465	—	87 bis 20
6	Methylviolett R 0,6 Berlinerblau 1,25	415—475	—	4 bis 48
7	Naftolgrün 1,25 Methylenblau 1,25	450—540	67 bis 77	—
8	Berlinerblau 2,5 Chinolingelb 10	480—560	65 bis 95	17 bis 35
8a	Naftolgrün 10 Methylenblau 0,6	530—560	—	20 bis 35
9	Naftolgrün 5 Tartrazin 10	520—585	93 bis 100	35 bis 53

148. Reinheitsbestimmungen im Farbkreise. Die eben beschriebenen Methoden der absoluten Reinheitsmessung wurden zunächst um sie zu erproben und gleichzeitig einen Überblick über die Grenzen der experimentell erreichbaren Reinheit zu gewinnen, auf sämtliche Farben eines 100-teiligen Farbkreises angewendet, dessen Herstellung oben (No. 93) summarisch beschrieben worden ist. Auch hier handelt es sich um einen ersten Vorstoß, der eine umfassende Orientierung, nicht aber die Erreichung der höchstmöglichen Genauigkeit bezweckte.

Die nachstehenden Tabellen bringen zunächst die Nummern im Farbkreise; dann folgen die Größen h_1 und h_2 und die aus ihnen berechnete Reinheit f . Die folgende Spalte enthält die Reinheit der Ergänzungsfarbe und die letzte das Verhältnis beider.

Reinheitsbestimmungen im Farbkreis Li b.

No.	h_1	h_2	$h_1 - h_2 = f$	f_{n+50}	Verhältnis
0	88	13	75	43	0,57
1	88	13	75	43	0,57
2	88	12	76	43	0,57
3	85	11	74	44	0,60
4	85	11	74	46	0,62
5	85	10	75	45	0,60
6	85	09	76	45	0,59
7	85	08	77	45	0,58
8	85	08	77	45	0,58
9	85	09	76	44	0,58
10	85	09	76	45	0,59
11	85	10	75	47	0,62
12	88	10	78	47	0,60
13	88	10	78	47	0,60
14	88	12	76	47	0,62
15	88	12	76	47	0,62
16	88	14	74	47	0,63
17	91	16	75	47	0,62
18	91	17	74	47	0,63
19	88	17	71	47	0,66
20	88	17	71	47	0,66
21	91	17	74	47	0,63
22	91	17	74	46	0,62
23	91	17	74	46	0,62
24	91	17	74	45	0,61
25	91	17	74	44	0,59
26	91	17	74	43	0,58
27	88	17	71	42	0,59
28	88	17	71	42	0,59
29	88	17	71	42	0,59
30	88	17	71	42	0,59
31	88	17	71	42	0,59
32	88	18	70	42	0,60
33	88	18	70	41	0,59
34	88	19	69	41	0,59
35	88	20	68	40	0,59
36	88	19	69	40	0,58
37	88	19	69	40	0,58

No.	h_1	h_2	$h_1 - h_2 = f$	f_{n+50}	Verhältnis
38	88	18	70	43	0,61
39	85	17	68	48	0,70
40	85	16	69	51	0,74
41	82	16	66	55	0,83
42	80	16	64	58	0,91
43	75	16	59	58	0,98
44	70	16	54	62	1,07
45	68	17	53	64	1,21
46	63	17	46	68	1,48
47	61	16	45	70	1,55
48	60	16	44	70	1,59
49	59	16	43	72	1,68
50	59	16	43		
51	59	16	43		
52	59	16	43		
53	59	15	44		
54	59	13	46		
55	58	13	45		
56	58	13	45		
57	58	13	45		
58	58	13	45		
59	57	13	44		
60	59	14	45		
61	61	14	47		
62	61	14	47		
63	61	14	47		
64	61	14	47		
65	61	14	47		
66	61	14	47		
67	61	14	47		
68	61	14	47		
69	61	14	47		
70	61	14	47		
71	61	14	47		
72	61	15	46		
73	61	15	46		
74	61	16	45		
75	61	17	44		
76	61	18	43		

No.	h_1	h_2	$h_1 - h_2 = f$	f_{n+50}	Verhältnis
77	61	19	42		
78	61	19	42		
79	61	19	42		
80	61	19	42		
81	61	19	42		
82	61	19	42		
83	61	20	41		
84	61	20	41		
85	61	21	40		
86	61	21	40		
87	61	21	40		
88	63	20	43		
89	65	17	48		
90	68	17	51		
91	70	15	55		
92	72	14	58		
93	72	14	58		
94	75	13	62		
95	77	13	64		
96	80	12	68		
97	82	12	70		
98	82	12	70		
99	84	12	72		

Die allgemeinen Beziehungen, welche auf diese Weise festgestellt werden konnten, lassen sich am bequemsten aus der Kurventafel Fig. 14 ablesen. Die oberste Linie h_1 ergibt die mit den Durchlaßfiltern beobachteten Helligkeiten, aus denen in bekannter Weise der schwarze Anteil der Aufstriche folgt. Die Punkte stellen die unmittelbaren Ablesungen an der von mir benutzten Grauskala mit fünfstufiger Interpolation dar; sie verlaufen deshalb nicht stetig, sondern sprungweise um je eine oder mehrere der genannten Stufen. Vereinigt man die so erhaltenen Messungen, so beobachtet man folgendes: Die mit h_1 bezeichnete Größe hat sehr hohe Werte, die für den ersten Teil der Aufträge bis etwa No. 40, also für Gelb, Orange, das ganze Rot bis ins Blaurot hinein rund 0,9 betragen. Diese Aufstriche enthalten also relativ nur wenig Schwarz. Von 40 ab findet ein schneller Abfall statt,

welcher bis zu einem Minimum führt, das etwa bei 57 gelegen ist. Von dort ab hebt sich die Linie, bleibt lange Zeit im Blaugrünen und Reingrünen ganz horizontal und steigt dann schließlich von 87 ab wiederum steil aufwärts, um schließlich fast denselben Punkt zu erreichen, von dem sie bei 0 ausgegangen war. Genau derselbe Punkt wird nicht erreicht, weil das von mir benutzte gelbe Pigment am Anfang der Reihe verschieden war von dem am Schluß der Reihe. Zwischen 0 und 5 wurde nämlich Strontiumchromat benutzt, während zwischen 70 und 100 Siriusgelb mit Lithopon vermischt zur Herstellung der blau- und gelbgrünen Töne diente. Es geschah dieses, weil mir das Strontiumchromat noch eine Spur Rot zu enthalten schien, so daß die letzten gelbgrünen Töne weniger rein ausfielen als mit Siriusgelb.

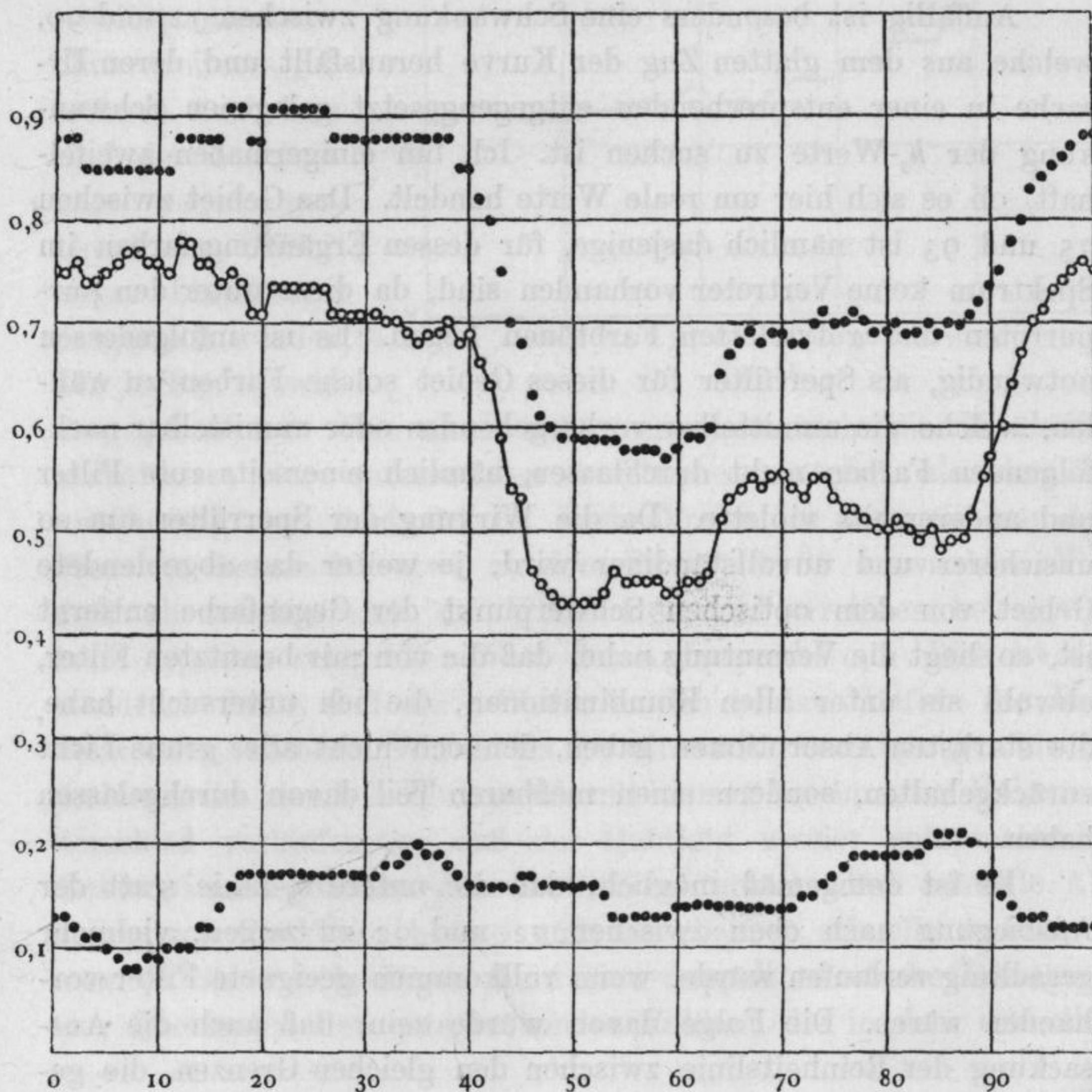


Fig. 14.

Die unterste Reihe stellt die h_2 -Werte dar, welche den Anteil Weiß in den Aufstrichen ergeben. Diese verläuft viel weniger bewegt. Die Schwankungen beschränken sich auf rund 8 Prozent, indem von 0 bis 10 der weiße Anteil abnimmt, dann bis 18 auf einen ziemlich konstanten Betrag steigt, bei dem es mit geringen Schwankungen bis zum Schluß verbleibt. Die mittlere, mit r bezeichnete Linie der *Reinheiten*, welche sich als Differenz der gleichnamigen Ordinaten beider eben beschriebenen Linien ergibt, zeigt dementsprechend folgenden Verlauf. Sie hat ziemlich hohe Werte (um 0,75 herum) bis zu dem Farbton 40, fällt dann schnell auf rund 0,45 herab, welcher Wert bei 52 erreicht ist und steigt dann nach einigen Schwankungen zwischen 0,4 und 0,5 von 90 ab wiederum steil bis zu dem früheren Wert aufwärts.

Auffällig ist besonders eine Schwankung zwischen 72 und 90, welche aus dem glatten Zug der Kurve herausfällt und deren Ursache in einer entsprechenden entgegengesetzt gelegenen Schwankung der h_2 -Werte zu suchen ist. Ich bin einigermaßen zweifelhaft, ob es sich hier um reale Werte handelt. Das Gebiet zwischen 75 und 93 ist nämlich dasjenige, für dessen Ergänzungsfarben im Spektrum keine Vertreter vorhanden sind, da diese unter den purpurroten und rotvioletten Farbtönen liegen. Es ist infolgedessen notwendig, als Sperrfilter für dieses Gebiet solche Farben zu wählen, welche die unmittelbar vorhergehenden oder unmittelbar nachfolgenden Farben nicht durchlassen, nämlich einerseits rote Filter und andererseits violette. Da die Wirkung der Sperrfilter um so unsicherer und unvollständiger wird, je weiter das abgeblendete Gebiet von dem optischen Schwerpunkt der Gegenfarbe entfernt ist, so liegt die Vermutung nahe, daß die von mir benutzten Filter, obwohl sie unter allen Kombinationen, die ich untersucht habe, die stärksten Absorptionen gaben, dennoch nicht alles grüne Licht zurückgehalten, sondern einen meßbaren Teil davon durchgelassen haben.

Es ist demgemäß möglich, daß die untere h_2 -Linie statt der Ausbiegung nach oben zwischen 72 und 92 zu zeigen, vielmehr geradlinig verlaufen würde, wenn vollkommen geeignete Filter vorhanden wären. Die Folge davon würde sein, daß auch die Aus-sackung der Reinheitslinie zwischen den gleichen Grenzen, die gegenwärtig zu beobachten ist, verschwindet und durch einen glatten

Zug ersetzt werden würde.¹⁾ Um aber grundsätzlich keine hypothetischen Elemente in die Untersuchung einzuführen, habe ich den Verlauf so gelassen, wie er sich mir experimentell ergeben hatte und weise nur auf die hierzu erhebenden Bedenken im Interesse der weiter unten angeführten Erörterungen hin.

149. Reinheitsverhältnisse der Ergänzungsfarben. Aus den Werten dieser Zusammenstellung lassen sich nun für die um 50

Einheiten verschiedenen Paare, welche Ergänzungsfarben für mein Auge und normale Tagesbeleuchtung darstellen, die Reinheitsquotienten ohne weiteres berechnen. Auch diese sind der Anschauung wegen graphisch in Gestalt eines Linienzuges

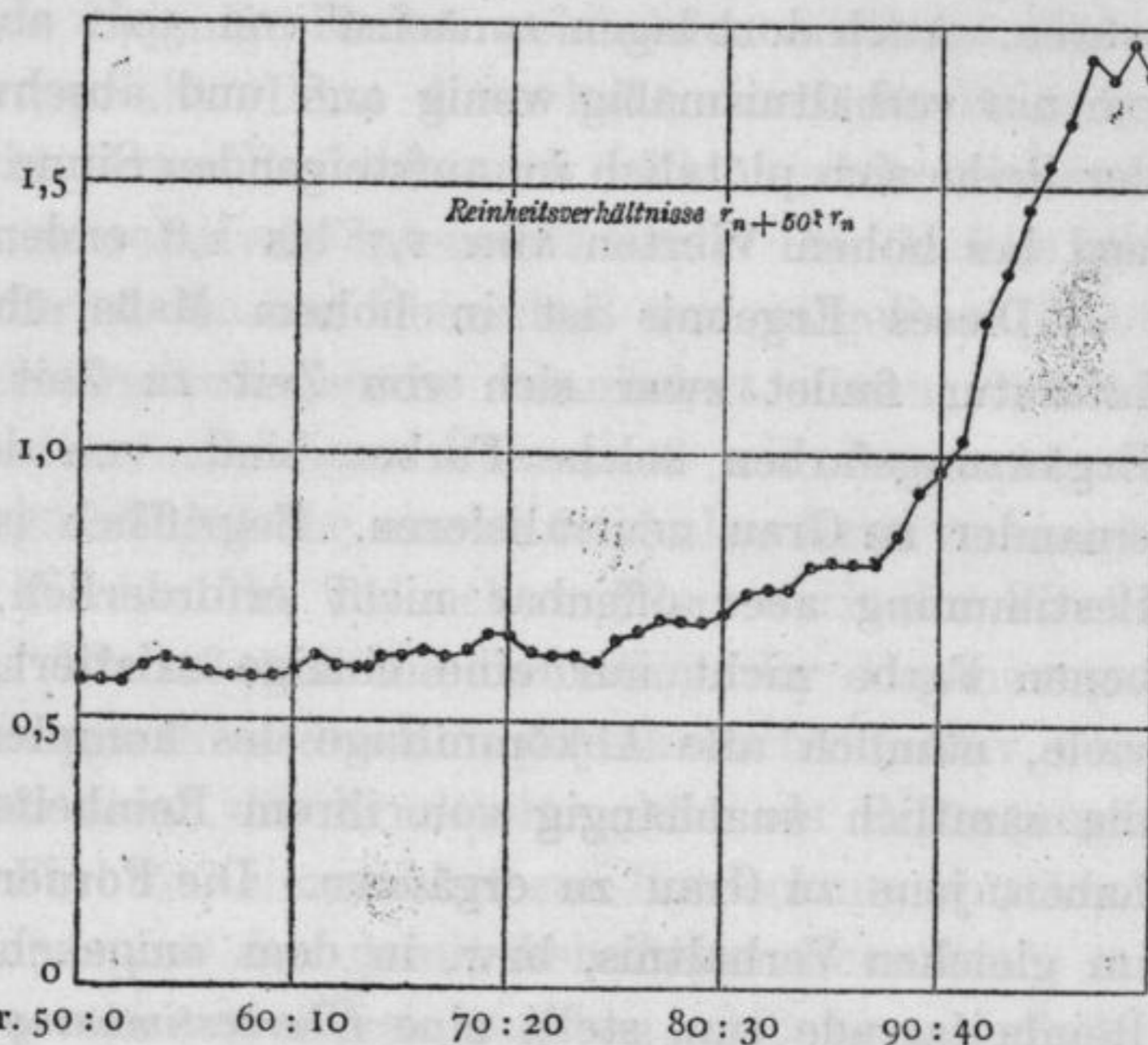


Fig. 15.

dargestellt worden, Nr. 50:0 60:10 70:20 80:30 90:40 der in Fig. 15 wiedergegeben ist. Wie man sieht, erweisen sich die Reinheitsverhältnisse der untersuchten Aufstriche zunächst als ziemlich unabhängig von dem Ort im Farbkreise, in dem sie um den Wert 0,6 herum bis etwa zu dem Punkt 38:88 schwanken. Von dort ab erheben sich die Werte steil und erreichen bei 49:99 rund 1,7, den reziproken Wert der Anfangszahl 0,6. Dies ist der Ausdruck dafür, daß die r -Werte in den beiden Hälften des Farbkreises, nämlich von 0 bis 40 einerseits und von 50 bis 90 andererseits ziemlich horizontal mit einem bestimmten Höhenunterschied verlaufen, so daß der Quotient zweier entsprechender Zahlen immer nahezu denselben Wert erhält. Das schnelle Abfallen von Punkt 40 bis 50 und das eben so schnelle Aufsteigen von 90 bis 100 bedingen dann eine doppelt so starke Bewegung der Quotienten der entsprechenden Zahlen, die in dem schnellen

1) Dies hat sich später bestätigt. (Anm. b. d. Korr.)

Aufsteigen der Verhältniswerte ihren Ausdruck findet. So viel ist über die Bestimmung der Reinheitswerte und ihrer Verhältnisse anzugeben.

150. Vergleich mit den Neutralisationsverhältnissen. Man sieht auf den ersten Blick, daß der allgemeine Verlauf der Reinheitsverhältnisse die allergrößte Ähnlichkeit mit dem Verlauf der Neutralisationsverhältnisse hat, wie sie früher mitgeteilt worden waren. Auch dort lagen zunächst von 50/0 ab Werte vor, die um 0,6 nur verhältnismäßig wenig auf- und abschwanken, gegen Ende der Reihe sich plötzlich im aufsteigenden Sinne in Bewegung setzen und bei hohen Werten von 1,7 bis 1,8 enden.

Dieses Ergebnis ist in hohem Maße überraschend. In der Literatur findet zwar sich von Zeit zu Zeit die Definition, daß Ergänzungsfarben solche Farben sind, von denen *gleiche* Mengen einander zu Grau neutralisieren. Begrifflich ist diese quantitative Bestimmung aber offenbar nicht erforderlich, da zu einer gegebenen Farbe nicht nur eine einzige existiert, sondern unendlich viele, nämlich alle Abkömmlinge des komplementären Farbtones, die sämtlich unabhängig von ihrem Reinheitsgrade die Fähigkeit haben, jene zu Grau zu ergänzen. Die Forderung, sie müßten dies im gleichen Verhältnis, bzw. in dem umgekehrten Verhältnis ihrer Reinheitsgrade tun, stellt eine *Überbestimmung* in der begrifflichen Beziehung zwischen den Ergänzungsfarben dar, deren Gültigkeit nicht von vornherein gegeben ist, sondern experimentell geprüft werden muß.

Bei weiterer Überlegung wird man ferner zu folgendem Widerspruch geführt. Die Reinheitsgrade gegebener Farben lassen sich, wie oben bewiesen worden ist, *objektiv*, d. h. unabhängig von der Beschaffenheit der Beleuchtung, wie von der des beobachtenden Auges bestimmen. Sie stellen also absolute Werte dar, die mit der vorgelegten Farbe objektiv gegeben sind und keiner Veränderung irgendwelcher Art unterliegen. Ganz anders verhalten sich die Ergänzungsfarben. Diese sind von der Art der Beleuchtung qualitativ wie quantitativ abhängig, und außerdem auch von der Beschaffenheit des beobachtenden Auges. Was das Erste anlangt, so kann man sich leicht überzeugen, daß Ergänzungsfarben, welche bei Tageslicht neutrales Grau ergeben, diese Eigenschaft bei Lampenlicht nicht mehr besitzen. Vielmehr tritt eine Verschiebung ein, die sich ohne weiteres durch den Umstand erklären

läßt, daß das Lampenlicht verhältnismäßig mehr rotgelbe Strahlen enthält, als das Tageslicht. Es müssen deshalb die Farben, welche einander unter diesen Umständen zu Grau ergänzen sollen, relativ mehr Blau enthalten, und demgemäß verschieben sich die Farbtöne, die miteinander neutrales Grau ergeben. Nur ein Paar von Ergänzungsfarben wird (nebst den unmittelbar benachbarten) vorhanden sein, welches durch diesen Umstand qualitativ nicht beeinflußt wird, nämlich diejenige Farbe, welche der mittleren Farbe des Lampenlichtes entspricht. Denn diese kann durch die Beleuchtung mit Lampenlicht ihrem Farbton nach nicht verschoben werden, sondern nur ihrer relativen Intensität nach. Das Gleiche gilt für ihre Ergänzungsfarbe, da der Überschuß von rotgelbem Licht nur die Reinheit der Ergänzungsfarbe vermindert, ihren Farbton aber nicht ändert, indem sich dieser Überschuß mit dem entsprechenden Anteil der Ergänzungsfarbe nur zu neutralem Grau vereinigt.

Ebenso wie der Wechsel der Beleuchtung hat auch der Wechsel des Auges seinen Einfluß auf die Definition der Ergänzungsfarben, die ja physiologisch und nicht physikalisch-objektiv definiert sind. Demgemäß dient die Ermittlung der als Ergänzungsfarben empfundenen Farbtöne umgekehrt zur Entdeckung von Anomalien des Farbensinnes bei den damit behafteten Personen.

Somit muß man ohne weiteres zugeben, daß eine einfache Beziehung zwischen dem Sättigungsgrade gegebener Farbaufstriche und den Mengenverhältnissen, nach welchen solche Farbaufstriche, wenn sie ihrem Farbton nach komplementäre Farben bilden, sich zu Grau neutralisieren werden, nicht von vornherein zu erwarten ist. Denn es kann nicht erwartet werden, daß eine absolut oder physikalisch definierte Größe in einer bestimmten und unveränderten Beziehung zu einer physiologisch bedingten und von subjektiven Faktoren abhängigen Größe stehen kann, welche ihrerseits deren Betrag in weitestem Maße beeinflussen kann.

151. Quantitativer Vergleich. Wir kommen also zu dem nicht vorauszusehenden, ja eigentlich halbwegs absurd erscheinenden experimentellen Resultat, daß die subjektiv bedingten Neutralisationsverhältnisse nicht wesentlich abweichen von den rein objektiven Reinheitsverhältnissen der gleichen Farben, daß also die oben erwähnte unmotivierete Annahme, als müßten Ergänzungsfarben im reinen Zustande sich auch quantitativ im Verhältnis 1 zu 1 neutralisieren, sich als im Großen und Ganzen zutreffend erweist.

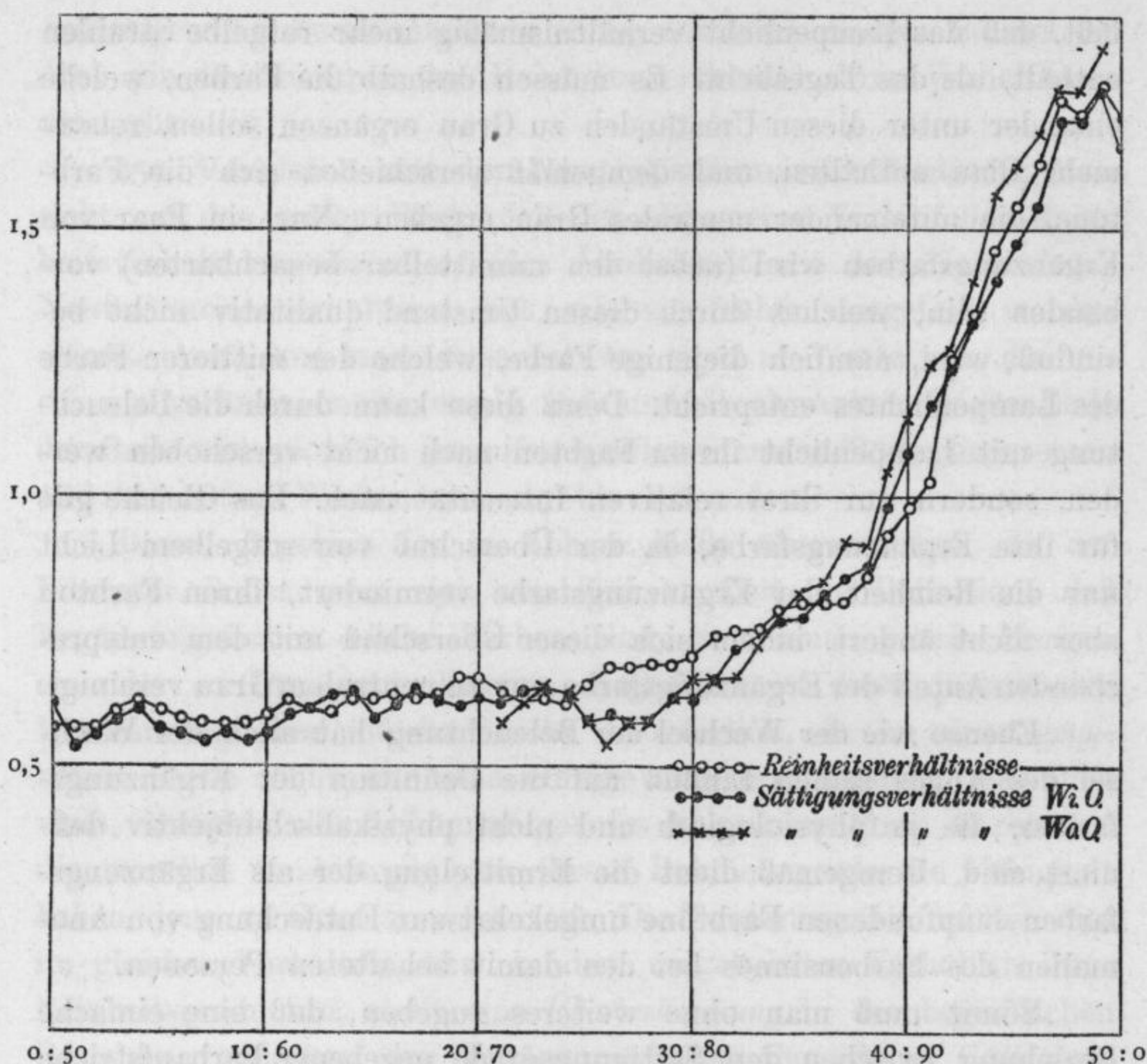


Fig. 16.

Um nun genauer festzustellen, wie weit diese Beziehung tatsächlich stattfindet, sind in Fig. 16 beide Reihen in dasselbe Koordinatensystem eingetragen worden. Die Ringelchen stellen die absoluten Reinheitsverhältnisse dar, während die schwarzen Punkte die subjektiven Neutralisationsverhältnisse veranschaulichen.¹⁾ Man erkennt, daß etwaige Abweichungen zwischen beiden Kurven im Gebiete 0 bis 30 so geringfügig sind, daß sie zunächst von den Versuchsfehlern, die man auf ± 5 Prozent schätzen kann, nicht sicher unterschieden werden könnten. Dagegen liegen im aufsteigenden Teil zweifellos Unterschiede in dem Sinne vor, daß die Reinheitsverhältnisse ihr Verharren auf den Mittelwert 0,6 bedeutend weiter, nämlich bis 38 fortsetzen, als die Neutralisationsverhältnisse, die schon bei 29 oder 30 die Konstanz aufgeben, um in das Gebiet des schnellen Aufstieges überzugehen.

1) Die dritte Linie mit den Kreuzpunkten wird unten ihre Erklärung finden.

Es besteht also die merkwürdige Tatsache, daß die gelben, rotgelben und roten Farben bis etwa zum Carminrot subjektiv als Ergänzungsfarben Neutralisationsverhältnisse aufweisen, die mit den absoluten Reinheitsverhältnissen praktisch zusammenfallen. Demgemäß vereinigen sich innerhalb dieses Gebietes tatsächlich gleiche Mengen komplementärer Lichter, diese Mengen *objektiv* gemessen, auch *subjektiv* zu neutralem Grau.

Von dieser Stelle ab aber, also im Gebiet der purpurroten, violetten und rötlich-blauen Töne, sowie ihrer grünen Ergänzungsfarben wird die Übereinstimmung geringer. Und zwar liegt der Unterschied so, daß durchgängig die Neutralisationsverhältnisse der Ergänzungsfarben höhere Werte aufweisen, als die Reinheitsverhältnisse. Anschaulich gesprochen wäre innerhalb dieses Gebietes *weniger grüne* Farbe zum neutralisieren der entsprechenden purpurroten und violetten Farben erforderlich, als durch das Reinheitsverhältnis der beiderseitigen Aufstriche unter der Annahme, daß gleiche Mengen die Neutralisation bewirken, gefordert erscheint.¹⁾

152. Ausschaltung individueller Einflüsse. Angesichts des Umstandes, daß die Neutralisationsverhältnisse subjektiv bedingt sind, und daß die gewonnenen Zahlen zunächst nur für mein Auge gelten, an welchem bei meinem Alter von 62 Jahren die allgemeinen Altersveränderungen vorausgesetzt werden können, habe ich es für wünschenswert gehalten, die beobachteten Werte mit solchen zu vergleichen, die durch erheblich jüngere Augen gewonnen wurden. Mein Sohn WOLFGANG OSTWALD unterzog sich freundlichst der Mühe, auch seinerseits eine Reihe von Pomieinstellungen durchzuführen. Da er keine vorangängige Übung in der Handhabung des Apparates sich angeeignet hatte, vergrößerte er die Anzahl der Einstellungen für jede Lage auf fünf. Auch wurden die Nummern 0 bis 22 fortgelassen, weil hier die Verhältnisse normal erscheinen und das Gewicht ist auf das besondere Gebiet zwischen 23 und 50 gelegt worden. Um einen unmittelbaren Vergleich zu ermöglichen, sind die entsprechenden Werte in Gestalt von Kreuzchen in Fig. 16 eingetragen worden. Wie man sieht, verlaufen sie den von mir eingestellten Zahlen ganz nahe. Wenn ein Unterschied besteht, dessen Realität mir nicht ganz zweifellos erscheint, so liegt er in solchem Sinne, daß die mit den jüngeren Augen erhaltenen Be-

1) Vgl. indessen die Anmerkung S. 565.

obachtungen etwas stärker von den absoluten Reinheitsverhältnissen abweichen als meine.

Es soll an dieser Stelle absichtlich davon abgesehen werden, die Folgerungen zu erörtern, welche aus diesen Tatsachen gezogen werden können. Vielmehr erscheint es als zweckmäßiger, dies im Zusammenhange mit anderen ähnlichen experimentellen Beziehungen zu tun, die mir zwar schon jetzt vorliegen, aber erst in anderem Zusammenhange mitzuteilen sind.

153. Der unbunte Anteil. Nachdem vorstehend das Erforderliche über den bunten Anteil gemischter Farben dargelegt worden ist, bleiben noch einige Bemerkungen über den unbunten zu machen übrig. Dieser setzt sich aus Schwarz und Weiß zusammen, zwischen denen jedes beliebige Verhältnis bestehen kann, so daß sich der unbunte Anteil als ein *Grau* auffassen läßt, dessen Zusammensetzung entsprechend früheren Darlegungen durch das Verhältnis des weißen Anteils zur Summe von Weiß + Schwarz definiert werden kann. Indessen ist noch zu beachten, daß dieses Verhältnis nur als Rechnungsergebnis aus der unmittelbaren Bestimmung sich herausstellt. Denn der weiße Anteil ist $= h_2$, während der schwarze $= 1 - h_1$ ist. Daraus ergibt sich für das Grau nach der eben gegebenen Definition der Ausdruck

$$g = \frac{h_2}{1 - h_1 + h_2}.$$

Es ist natürlich nicht notwendig, die beiden unbunten Anteile in der eben angegebenen Weise zum Grau zusammenzufassen. Es genügt vielmehr auch die einfache Angabe des Bruchteils Weiß oder Schwarz, welcher neben der gesättigten Farbe vorhanden ist, um die vorliegende gemischte Farbe ebenso vollständig zu definieren, wie durch die Angabe der Reinheit und des Grau. Der weiße Anteil kann höchstens so viel betragen als die Reinheit von der Eins übrig gelassen hat. Er kann aber auch beliebig weniger betragen, bis zum Nullwert herunter. Die Angabe des Bruchteils Weiß, welcher neben der gesättigten Farbe vorhanden ist, genügt daher zur eindeutigen Definition der Mischfarbe, da man das, was an der Summe beider noch zur Einheit fehlt, auf Grund der allgemeinen Farbgleichung $s + w + s = 1$ dem Schwarz zuschreiben muß.

Demgemäß ist es endlich auch möglich, auf die besondere Berechnung der Reinheit ganz zu verzichten und nur die Mengen

Schwarz und Weiß einzeln anzugeben, welche in der gemischten Farbe vorhanden sind. Was an der Summe gegenüber der Einheit fehlt, muß dann gesättigte Farbe sein. Diese letzte Form der Darstellung hat die besondere Eigenschaft, daß sie der unmittelbare Ausdruck der Messungsergebnisse ist, welche ja nur den Betrag an Schwarz und Weiß feststellen. Dies ist bei dem Ausdruck $h_2 = w$ unmittelbar ersichtlich. Der andere Ausdruck $1 - h_1 = s$ hat diese etwas zusammengesetztere Form nur deshalb angenommen, weil die Ablesungen an der Grauskala bei der Beobachtung mit dem Lichtfilter oder im Spektrum gewöhnlich auf den weißen Anteil bezogen werden und nicht auf den schwarzen. Würde man h_1 nicht in Bruchteilen des Weiß, sondern in Bruchteilen des Schwarz des äquivalenten Grau ausdrücken, so würde auch eine Gleichung $h_1 = s$ gültig sein.

Die Frage, welche von diesen verschiedenen Ausdrucksmöglichkeiten die zweckmäßigste ist, wird später besonders erörtert werden. Es sei schon hier vorausgenommen, daß sich eine Darstellungs- und Rechnungsweise finden läßt, in welcher die unmittelbaren Messungsergebnisse auch ohne weitere Umrechnung als Koordinaten eines entsprechenden Farbkörpers benutzt werden können.

154. Das allgemeine Verfahren der Chromometrie. Zusammenfassend soll kurz der Weg rekapituliert werden, um an einer vorgelegten Farbe die erschöpfende Analyse vorzunehmen. Durch diese wird sie eindeutig und unverwechselbar gegen jede andere Farbe gekennzeichnet, gleichzeitig aber auch absolut definiert und daher jederzeit reproduzierbar gemacht. Dazu ist es allerdings noch nötig, neben der Reinheit und dem Grau auch für die dritte Veränderliche, den Farbton, eine derartige Bestimmung zu geben. Diese Aufgabe wird später in einem besonderen Stück dieser Beiträge bearbeitet werden. Nehmen wir sie als gelöst an, so setzt sich eine vollständige chromatische Analyse aus folgenden drei Operationen zusammen.

1. *Bestimmung des Farbtones.* Es geschieht dieses, indem man mit Hilfe des Pomi diejenige Farbe im Farbkreise aufsucht, welche mit der vorgelegten sich zu neutralem Grau vermischen läßt. Die um ± 50 verschiedene Nummer des Farbkreises ist dann die Nummer des Farbtones, dem die vorgelegte Farbe angehört.

2. *Bestimmung der Reinheit.* Es werden die beiden ausgezeichneten Helligkeiten h_1 und h_2 mit Hilfe von Lichtfiltern oder anderen äquivalenten Versuchsanordnungen gemessen. Aus diesen beiden Größen ergibt sich die Reinheit nach der Formel

$$f = h_1 - h_2.$$

3. *Bestimmung des Weiß, Schwarz und Grau.* Die ausgezeichneten Helligkeiten stehen in unmittelbarer Beziehung zu den Bruchteilen an Weiß und Schwarz, die in der analysierten Farbe enthalten sind. Denn ersteres ist durch die Gleichung $w = 1 - h_2$, letzteres durch $s = 1 - h_1$ gegeben. Aus beiden folgt für das Grau

$$g = \frac{h_2}{1 - (h_1 - h_2)} = \frac{h_2}{1 - f}.$$

Da für alle drei Größen die Änderung um 1 Prozent sich ganz in der Nähe der Unterschiedsschwelle befindet, so genügt überall eine zweizifferige Zahl, um die ganze Mannigfaltigkeit der experimentell unterscheidbaren Stufen zu decken. Dieses macht für die drei unabhängigen Veränderlichen dreimal zwei Ziffern. Eine sechszifferige Zahl reicht also zur erschöpfenden Kennzeichnung jeder Farbe aus.

Für praktische Bedürfnisse wird eine gröbere Teilung genügen. Nehmen wir an, daß überall 25 Stufen ausreichen, so kann man ihnen die Buchstaben des Alphabetes zuordnen. Das Zeichen jeder einzelnen Farbe reduziert sich dadurch auf eine Zusammenstellung von drei Buchstaben.



- C. BRUHNS, Neue Best. d. Längendiff. zwisch. d. Sternwarte in Leipzig u. d. neuen Sternwarte auf d. Türkenschanze in Wien. 1880. *M.* 2.40.
- C. NEUMANN, Über die peripolaren Koordinaten. 1880. *M.* 1.50.
- Die Verteil. d. Elektrizität auf ein. Kugelkalotte. 1880. *M.* 2.40.
- W. G. HANKEL, Elektr. Untersuch. 15. Abhdlg.: Über die aktino- und piezoelektr. Eigenschaften des Bergkrystalles und ihre Beziehung zu den thermoelektrischen. Mit 4 Tafeln. 1881. *M.* 2.—
- Elektrische Untersuchungen. 16. Abhdlg.: Über die thermoelektr. Eigenschaften d. Helvins, Mellits, Pyromorphits, Mimetesits, Phenakits, Pennins, Diophasen, Strontianits, Witherits, Cerussits, Euklases und Titanits. Mit 3 Tafeln. 1882. *M.* 2.—
- Elektrische Untersuchungen. 17. Abhdlg.: Über die bei einigen Gasentwickelungen auftretenden Elektrizitäten. 1883. *M.* 1.80.
- XIII. BAND. (22. Bd.) 1887. brosch. Preis *M.* 30.—
- G. T. FECHNER, Über die Frage des Weberschen Gesetzes u. Periodizitätsgesetzes im Gebiete des Zeitsinnes. 1884. *M.* 2.80.
- Über die Methode der richtigen und falschen Fälle in Anwendung auf die Maßbestimmungen der Feinheit oder extensiven Empfindlichkeit des Raumsinnes. 1884. *M.* 7.—
- W. BRAUNE u. O. FISCHER, Die bei der Untersuchung v. Gelenkbewegungen anzuwendende Methode, erläutert am Gelenkmechanismus des Vorderarmes beim Menschen. Mit 4 Taf. 1885. *M.* 2.—
- F. KLEIN, Über die elliptischen Normalkurven der n^{ten} Ordnung und zugehörige Modulfunktionen der n^{ten} Stufe. 1885. *M.* 1.80.
- C. NEUMANN, Über die Kugelfunktionen P_n und Q_n , insbesondere über die Entwicklung der Ausdrücke $P_n(z_1 + \sqrt{1-z_1^2} \sqrt{1-z_2^2} \cos \Phi)$ und $Q_n(z_1 + \sqrt{1-z_1^2} \sqrt{1-z_2^2} \cos \Phi)$. 1886. *M.* 2.40.
- W. HIS, Zur Geschichte des menschlichen Rückenmarkes und der Nervenwurzeln. Mit 1 Tafel und 10 Holzschnitten. 1886. *M.* 2.—
- H. BRUNS, Über eine Aufg. der Ausgleichsrechnung. 1886. *M.* 2.—
- R. LEUCKART, Neue Beiträge zur Kenntnis des Baues und der Lebensgeschichte der Nematoden. Mit 3 Tafeln. 1887. *M.* 7.—
- C. NEUMANN, Über die Methode des arithmetischen Mittels 1. Abhdlg. Mit 11 Holzschnitten. 1887. *M.* 3.20.
- XIV. BAND. (24. Bd.) 1888. brosch. Preis *M.* 42.—
- J. WISLICENUS, Über die räuml. Anordnung d. Atome in organisch. Molekülen u. ihre Bestimmung in geometr.-isomeren ungesättigten Verbindungen. Mit 186 Figuren. 2. Abdruck. 1889. *M.* 4.—
- W. BRAUNE und O. FISCHER, Untersuchungen über die Gelenke des menschlichen Armes. 1. T.: Das Ellenbogengelenk v. O. Fischer. 2. T.: Das Handgelenk von W. Braune und O. Fischer. Mit 12 Holzschnitten und 15 Tafeln. 1887. *M.* 5.—
- J. P. MALL, Die Blut- und Lymphwege im Dünndarm des Hundes. Mit 6 Tafeln. 1887. *M.* 5.—
- W. BRAUNE und O. FISCHER, Das Gesetz der Bewegungen in den Gelenken an der Basis der mittleren Finger und im Handgelenk des Menschen. Mit 2 Holzschnitten. 1887. *M.* 1.—
- O. DRASCH, Untersuchung über die papillae foliatae et circumvallatae d. Kaninchens u. Feldhasen. Mit 8 Tafeln. 1887. *M.* 4.—
- W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 18. Abhdlg.: Fortsetzung der Versuche über das elektrische Verhalten der Quarz- und der Borackitkrystalle. Mit 3 Tafeln. 1887. *M.* 2.—
- W. HIS, Zur Geschichte des Gehirns, sowie der zentralen u. peripherischen Nervenbahnen. Mit 3 Taf. u. 27 Holzschn. 1888. *M.* 3.—
- W. BRAUNE und O. FISCHER, Über den Anteil, den die einzelnen Gelenke des Schultergürtels an der Beweglichkeit des menschlichen Humerus haben. Mit 3 Tafeln. 1888. *M.* 1.60.
- G. HEINRICIUS und H. KRONECKER, Beiträge zur Kenntnis des Einflusses der Respirationsbewegungen auf den Blutlauf im Aortensysteme. Mit 5 Tafeln. 1888. *M.* 1.80.
- J. WALTHER, Die Korallenriffe der Sinaihalbinsel. Mit 1 geologischen Karte, 7 lithogr. Taf., 1 Lichtdrucktaf. u. 34 Zinkotyp. 1888. *M.* 6.—
- W. SPALTEHOLZ, Die Verteilung der Blutgefäße im Muskel. Mit 3 Tafeln. 1888. *M.* 1.80.
- S. LIE, Zur Theorie der Berührungstransformationen. 1888. *M.* 1.—
- C. NEUMANN, Über die Methode des arithmetischen Mittels. 2. Abhdlg. Mit 19 Holzschnitten. 1888. *M.* 6.—
- XV. BAND. (26. Bd.) 1890. brosch. Preis *M.* 35.—
- B. PETER, Monographie der Sternhaufen G. C. 4460 u. G. C. 1440, sowie e. Sterngruppe bei α Piscium. Mit 2 Taf. u. 2 Holzschn. 1889. *M.* 4.—
- W. OSTWALD, Über die Affinitätsgrößen organischer Säuren u. ihre Beziehung zur Zusammensetzung u. Konstitution ders. 1889. *M.* 5.—
- W. BRAUNE und O. FISCHER, Die Rotationsmomente der Beugemuskeln am Ellbogengelenk des Menschen. Mit 5 Tafeln und 6 Holzschnitten. 1889. *M.* 3.—
- W. HIS, Die Neuroblasten und deren Entstehung im embryonalen Mark. Mit 4 Tafeln. 1889. *M.* 3.—
- W. PFEFFER, Beiträge zur Kenntnis der Oxydationsvorgänge in lebenden Zellen. 1889. *M.* 5.—
- A. SCHENK, Über Medullosa Cotta und Tubicaulis Cotta. Mit 3 Tafeln. 1889. *M.* 2.—
- W. BRAUNE und O. FISCHER, Über den Schwerpunkt des menschlichen Körpers mit Rücksicht auf die Ausrüstung des deutschen Infanteristen. Mit 17 Tafeln und 18 Figuren. 1889. *M.* 8.—
- W. HIS, Die Formentwicklung des menschlichen Vorderhirns vom Ende des 1. bis zum Beginn des 3. Monats. Mit 1 Taf. 1889. *M.* 2.80.
- J. GAULE, Zahl und Verteilung der markhaltigen Fasern im Froschrückenmark. Mit 10 Tafeln. 1889. *M.* 3.—
- XVI. BAND. (27. Bd.) 1891. brosch. Preis *M.* 21.—
- P. STARKE, Arbeitsleistung u. Wärmeentwicklung bei der verzögerten Muskelzuckung. Mit 9 Tafeln u. 3 Holzschnitten. 1890. *M.* 6.—
- W. PFEFFER, I. Über Aufnahme und Aussage ungelöster Körper — II. Zur Kenntnis der Plasmahaut und der Vacuolen nebst Bemerkungen über den Aggregatzustand des Protoplasmas und über osmotische Vorgänge. Mit 2 Tafeln u. 1 Holzschn. 1890. *M.* 7.—
- J. WALTHER, Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung. Untersuchungen über die Bildung der Sedimente in den ägyptischen Wüsten. Mit 8 Tafeln und 99 Zinkätzungen. 1891. *M.* 8.—
- XVII. BAND. (29. Bd.) 1891. brosch. Preis *M.* 33.—
- W. HIS, Die Entwicklung des menschlichen Rautenhirns vom Ende des 1. bis zu Beginn des 3. Monats. I. Verläng. Mark. Mit 4 Tafeln und 18 Holzschnitten. 1891. *M.* 4.—
- W. BRAUNE und O. FISCHER, Die Bewegung des Kniegelenks, nach einer neuen Methode am lebenden Menschen gemessen. Mit 19 Tafeln und 6 Figuren. 1891. *M.* 5.—
- R. HAHN, Mikrometrische Vermessung des Sternhaufens $\Sigma 762$ ausgeführt am zwölfköpfigen Äquator der Leipziger Sternwarte. Mit 1 Tafel. 1891. *M.* 6.—
- F. MALL, Das retikulirte Gewebe und seine Beziehungen zu den Bindegewebsfibrillen. Mit 11 Tafeln. 1891. *M.* 5.—
- L. KREHL, Beiträge zur Kenntnis der Füllung und Entleerung des Herzens. Mit 7 Tafeln. 1891. *M.* 5.—
- J. HARTMANN, Die Vergrößerung des Erdschattens bei Mondfinsternissen. Mit 1 lithogr. Tafel u. 3 Textfiguren. 1891. *M.* 8.—
- XVIII. BAND. (31. Bd.) 1893. brosch. Preis *M.* 24.—
- W. HIS jun., Die Entwicklung des Herznervensystems bei Wirbeltieren. Mit 4 Tafeln. 1891. *M.* 5.—
- C. NEUMANN, Über einen eigentümlichen Fall elektrodynamischer Induction. Mit 1 Holzschnitt. 1892. *M.* 3.—
- W. PFEFFER, Studien zur Energetik der Pflanze. 1892. *M.* 4.—
- W. OSTWALD, Über die Farbe der Ionen. Mit 7 Taf. 1892. *M.* 2.—
- O. EICHLER, Anatom. Untersuchungen über die Wege des Blutstromes im menschl. Ohrlabyrinth. Mit 4 Taf. u. 3 Holzschn. 1892. *M.* 3.—
- H. HELD, Die Beziehungen des Vorderseitenstranges zu Mittel- und Hinterhirn. Mit 3 Tafeln. 1892. *M.* 1.20.
- W. G. HANKEL und H. LINDENBERG, Elektrische Untersuchungen. 19. Abhdlg.: Über die thermo- und piezoelektrischen Eigenschaften der Krystalle des chloresauren Natrons, des unterschwefelsauren Kalis, des Seignettesalzes, des Resorcins, des Milchsuckers und des dichromsauren Kalis. Mit 3 Tafeln. 1892. *M.* 1.80.
- W. BRAUNE u. O. FISCHER, Best. d. Trägheitsmomente d. menschl. Körpers u. seiner Glieder. Mit 5 Taf. u. 7 Figur. 1892. *M.* 4.—
- XIX. BAND. (32. Bd.) 1893. brosch. Preis *M.* 12.—
- J. T. STERZEL, Die Flora des Rotliegenden im Plauenschen Grunde bei Dresden. Mit 13 Tafeln. 1893. *M.* 12.—
- XX. BAND. (33. Bd.) 1893. brosch. Preis *M.* 21.—
- O. FISCHER, Die Arbeit der Muskeln und die lebendige Kraft des menschlichen Körpers. Mit 2 Tafeln u. 11 Figuren. 1893. *M.* 4.—
- E. STUDY, Sphärische Trigonometrie, orthogonale Substitutionen und elliptische Funktionen. Mit 16 Figuren. 1893. *M.* 5.—
- W. PFEFFER, Druck- und Arbeitsleistung durch wachsende Pflanzen. Mit 14 Holzschnitten. 1893. *M.* 8.—
- H. CREDNER, Zur Histologie der Faltenzähne paläozoischer Stegocephalen. Mit 4 Tafeln und 5 Textfiguren. 1893. *M.* 4.—
- XXI. BAND. (35. Bd.) 1895. brosch. Preis *M.* 27.—
- O. EICHLER, Die Wege des Blutstromes durch den Vorhof und die Bogengänge des Menschen. Mit 1 Doppeltafel. 1894. *M.* 1.—
- W. G. HANKEL und H. LINDENBERG, Elektrische Untersuchungen. 20. Abhdlg.: Über die thermo- und piezoelektrischen Eigenschaften der Krystalle des brom- und überjodsauren Natrons, des Asparagins, des Chlor- und Brombaryums, sowie des unterschwefelsauren Baryts und Strontians. Mit 2 Tafeln. 1894. *M.* 1.60.
- S. LIE, Untersuch. üb. unendl. kontinuierliche Gruppen. 1895. *M.* 5.—
- W. BRAUNE u. O. FISCHER, Der Gang des Menschen. I. T.: Versuch am unbelast. u. bel. Mensch. M. 14 Taf. u. 26 Textfig. 1895. *M.* 12.—
- H. BRUNS, Das Eikonol. 1895. *M.* 5.—
- J. THOMAE, Untersuchungen über zwei-zweideutige Verwandtschaften und einige Erzeugnisse derselben. 1895. *M.* 3.—
- XXII. BAND. (37. Bd.) 1895. brosch. Preis *M.* 20.—
- H. CREDNER, Die Phosphoritknollen des Leipziger Mitteloligocäns und der norddeutschen Phosphoritzone. Mit 1 Tafel. 1895. *M.* 2.—
- O. FISCHER, Beiträge zu einer Muskeldynamik. 1. Abhdlg.: Über die Wirkungsweise eingelenk. Musk. M. 8 Taf. u. 13 Textfig. 1895. *M.* 9.—
- R. BOEHM, Das südamerikanische Pfeilgift Curare in chemischer und pharmakol. Bezieh. I. T.: Das Tubo-Curare. Mit 1 Taf. 1895. *M.* 1.80.
- B. PETER, Beobachtungen am sechszölligen Repsoldischen Heliometer der Leipziger Sternwarte. Mit 4 Textfig. u. 1 Doppeltaf. 1895. *M.* 6.—
- W. HIS, Anatom. Forschungen über Joh. Seb. Bach's Gebeine u. Antlitz nebst Bemerk. üb. dessen Bilder. Mit 15 Textfig. u. 1 Taf. 1895. *M.* 2.—
- XXIII. BAND. (40. Bd.) 1897. brosch. Preis *M.* 29.—
- P. DRUDE, Über die anomale elektrische Dispersion von Flüssigkeiten. Mit 1 Tafel und 2 Textfiguren. 1896. *M.* 2.—
- Zur Theorie stehender elektr. Drahtwellen. M. 1 Tzf. 1896. *M.* 5.—
- M. v. FREY, Untersuchungen über die Sinnesfunktionen der menschl. Haut. 1. Abh.: Druckempfind. u. Schmerz. M. 16 Textfig. 1896. *M.* 5.—
- O. FISCHER, Beiträge zur Muskelstatik. 1. Abhandlg.: Über das Gleichgewicht zwischen Schwere und Muskeln am zweigliedrigen System. Mit 7 Tafeln und 21 Textfiguren. 1896. *M.* 6.—
- J. HARTMANN, Die Beob. d. Mondfinstern. M. 4 Textfig. 1896. *M.* 5.—
- O. FISCHER, Beiträge zu einer Muskeldynamik. 2. Abhdlg.: Über die Wirkung der Schwere und beliebiger Muskeln auf das zweigliedrige System. Mit 4 Taf. und 12 Textfig. 1897. *M.* 6.—

XXIV. Band. (42. Bd.) 1898. brosch. Preis M 23.50.

- R. BOEHM, Das südamerikanische Pfeilgift Curare in chemischer und pharmakologischer Beziehung. II. Teil (Schluß). I. Das Calceolonecurare. II. Das Topfeurare. III. Über einige Curarerinden. Mit 4 Tafeln und 1 Textfigur. 1897. M 3.—
 W. WUNDT, Die geometrisch-optischen Täuschungen. Mit 65 Textfiguren. 1898. (Vergr.) M 5.—
 P. PETER, Beobachtungen am sechszöll. Repsold'schen Heliometer der Leipz. Sternwarte. 2. Abhdlg. Mit 2 Textfig. u. 1 Taf. 1898. M 5.—
 H. CREDNER, Die Sächsischen Erdbeben während der Jahre 1889 bis 1897. Mit 5 Taf. u. 2 in d. Text gedruckte Kärtch. 1898. M 4.50.
 W. HIS, Über Zellen- und Synkytenbildung, Studien am Salmonidenkeim. Mit 14 Figuren im Text. 1898. M 4.—
 W. G. HANKEL, Elektrische Untersuchungen. 21. Abhdlg.: Über die thermo- und piezo-elektrischen Eigenschaften der Krystalle des ameisensauren Baryts, Bleioxyds, Strontians und Kalkes, des salpetersauren Baryts und Bleioxyds, des schwefelsauren Kalis, des Glycocolls, Taurins und Quercits. Mit 2 Tafeln. 1899. M 2.—

XXV. BAND. (43. Bd.) 1900. brosch. Preis M 26.30.

- O. FISCHER, Der Gang des Menschen. II. T.: Die Bewegung des Gesamtschwerpunktes und die äußeren Kräfte. Mit 12 Tafeln und 5 Textfiguren. 1899. M 8.—
 W. SCHEIBNER, Über die Differentialgleichungen der Mondbewegung. 1899. M 1.50.
 W. HIS, Protoplasmastudien am Salmonidenkeim. Mit 3 Tafeln und 21 Textfiguren. 1899. M 5.—
 W. OSTWALD, Periodische Erscheinungen bei der Auflösung des Chroms in Säuren. Erste Mitteilung. Mit 6 Tafeln. 1899. M 3.—
 S. GARTEN, Beiträge zur Physiologie des elektrischen Organes des Zitterrochen. Mit 1 Lichtdruck- u. 3 lithograph. Taf. 1899. M 5.—
 W. SCHEIBNER, Zur Theorie des Legendre-Jacobischen Symbols ($\frac{n}{m}$). 1900. 1. Abhandlung. M 1.80.
 W. OSTWALD, Dampfdrucke ternärer Gemische. Mit 36 Textfiguren. 1900. M 2.—

XXVI. BAND. (45. Bd.) 1901. brosch. Preis M 36.—

- E. BECKMANN, Neue Vorrichtungen zum Färben nichtleuchtender Flammen (Spektrallampen). Mit 2 Tafeln. 1900. M 2.—
 W. OSTWALD, Periodische Erscheinungen bei der Auflösung des Chroms in Säuren. Zweite Mitteil. Mit 16 Textfig. 1900. M 2.50.
 O. FISCHER, Der Gang des Menschen. III. T.: Betracht. über die weiteren Ziele der Untersuch. u. Überblick über die Bewegungen der unteren Extremitäten. Mit 7 Taf. u. 3 Textfig. 1900. M 6.—
 W. HIS, Lecithoblast und Angioblast der Wirbeltiere. Histogenetische Studien. Mit 102 Textfiguren. 1901. M 8.—
 S. GARTEN, Über rhythmische, elektrische Vorgänge im quergestreiften Skelettmuskel. Mit 13 Doppeltafeln. 1902. M 5.50.
 R. FICK, Über die Bewegungen in den Handgelenken. Mit 8 Figuren im Text, 7 photograph. u. 3 lithograph. Tafeln. 1901. M 6.50.
 O. FISCHER, Der Gang des Menschen. IV. T.: Über die Bewegung des Fußes und die auf denselben einwirkenden Kräfte. Mit 3 Tafeln und 11 Textfiguren. 1902. M 5.50

XXVII. BAND. (46. Bd.) 1902. brosch. Preis M 35.30.

- E. GROSSMANN, Beobachtungen am Repsold'schen Meridiankreise der von Kuffner'schen Sternwarte in Wien-Ottakring in den Jahren 1896—1898. Mit 4 Textfiguren. 1902. M 6.—
 C. NEUMANN, Über die Maxwell-Hertz'sche Theorie. Mit 3 Textfiguren. 1901. 1. Abhandlung. M 3.50.
 W. HIS, Beobachtungen zur Geschichte der Nasen- u. Gaumenbildung beim menschlichen Embryo. Mit 48 Figuren i. Text. 1901. M 3.80.
 F. MARCHAND, Über das Hirngewicht des Menschen. 1902. M 3.—
 O. FISCHER, Das statische und das kinetische Maß für die Wirkung eines Muskels, erläutert an ein- und zweigelenkigen Muskeln des Oberschenkels. Mit 12 Tafeln. 1902. M 7.50.
 B. PETER, Beobachtungen am sechszöll. Repsold'schen Heliometer der Leipziger Sternwarte. 3. Abhdlg. Mit 1 Tafel. 1902. M 2.50.
 W. SCHEIBNER, Zur Theorie des Legendre-Jacobi'schen Symbols ($\frac{n}{m}$), insbesondere über zweiteil. komplexe Zahlen. 2. Abhdlg. Mit 2 Textfiguren. 1902. M 3.50.
 C. NEUMANN, Über die Maxwell-Hertz'sche Theorie. 2. Abhdlg. Mit 3 Textfiguren. 1902. M 3.50.
 F. HAYN, Selenographische Koordinaten. 1. Abhdlg. 1902. M 2.—

XXVIII. BAND. (49. Bd.) 1903. brosch. Preis M 31.—

- H. HELD, Untersuchungen über den feineren Bau des Gehörorgans der Wirbeltiere. I. Zur Kenntnis des Cortischen Organs und des Goltz'schen Sinnesapparates bei Säugetieren. Mit 4 Doppeltafeln. 1 Tafel und 2 Figuren im Text. 1902. M 6.—
 C. NEUMANN, Über die Maxwell-Hertz'sche Theorie. 3. Abhdlg. Mit 3 Textfiguren. 1902. M 1.50.
 F. ZIRKEL, Über Urausscheidungen in rhein. Basalten. 1902. M 3.—
 H. HELD, Über den Bau der Neuroglia und über die Wand der Lymphgefäße in Haut und Schleimhaut. Mit 60 Figuren im Text und auf Tafeln. 1903. M 6.50.
 O. FISCHER, Der Gang des Menschen. V. T.: Die Kinematik des Beinschwings. Mit 5 Doppeltafeln und 8 Textfiguren. 1904. M 5.—
 H. CREDNER, Der vogtländ. Erdbebenschwarm v. 13. Febr. bis zum 18. Mai 1903 u. seine Registrier. durch das Wiechertsche Pendelseismometer i. Leipzig. Mit 26 Seismogr. a. Textfig. u. 1 K. 1904. M 5.—
 O. FISCHER, Der Gang des Menschen. VI. T.: Über den Einfluß der Schwere und der Muskeln auf die Schwingungsbewegung des Beins. Mit 3 Doppeltafeln und 7 Textfiguren. 1904. M 4.—

XXIX. BAND. (51 Bd.) 1906. brosch. Preis M 25.20.

- F. HAYN, Selenographische Koordinaten. 2. Abhdlg. Mit 4 Tafeln. 1904. M 6.—

Leipzig, Oktober 1917.

Acta acad

Druck von B. G. Teubner in Leipzig.

- H. HELD, Zur weiteren Kenntnis der Nervenendfüße und zur Struktur der Sehzellen. Mit 1 Doppeltafel. 1904. M 2.—
 C. CORRENS, Gregor Mendels Briefe an Carl Nägeli 1866—1873. Ein Nachtrag zu den veröffentlichten Bastardierungsversuchen Mendels. Mit einem Faksimile. 1905. M 3.—
 O. FISCHER, Über die Bewegungsgleichungen räumlicher Gelenkssysteme. Mit 6 Textfiguren. 1905. M 3.50.
 A. NATHANSOHN, Über die Bedeutung vertikal. Wasserbeweg. für die Produktion des Planktons im Meere. Mit 1 Karte. 1906. M 4.—
 E. MARX, Die Geschwindigkeit der Röntgenstrahlen. Mit 6 Textfiguren. 1906. I. Teil. M 1.60.
 B. PETER, Beobachtungen am sechszölligen Repsold'schen Heliometer der Leipziger Sternwarte. 4. Abhdlg. Triangulation von 28 Sternen in den Hyaden. 1906. M 3.50.
 H. BRUNS, Das Gruppenschema für zufäll. Ereignisse. 1906. M 1.60.

XXX. BAND. (56. Bd.) 1909. brosch. Preis M 22.40.

- F. HAYN, Selenographische Koordinaten. 3. Abhandlung. Mit 1 lithographischen Tafel. 1907. M 4.—
 W. MÖBIUS, Zur Theorie des Regenbogens und ihrer experimentellen Prüfung. Mit 24 Figuren im Text. 1907. M 5.—
 W. PFEFFER, Untersuchungen über die Entstehung der Schlafbewegungen der Blattoorgane. Mit 36 Textfiguren. 1907. M 8.—
 B. PETER, Parallaxenbestimmungen an dem Repsold'schen Heliometer der Leipziger Sternwarte. 1908. M —.80.
 O. WIENER, Der Zusammenhang zwischen den Angaben der Reflexionsbeobachtungen an Metallen und ihren optischen Konstanten. Mit 18 Figuren im Text. 1908. M 2.60.
 A. v. OETTINGEN, Elemente der projektiven Dioptrik. Mit 9 Figuren auf 2 Tafeln. 1908. M 2.—

XXXI. BAND. (58. Bd.) 1909. brosch. Preis M 25.20.

- O. FISCHER, Zur Kinematik des Listing'schen Gesetzes. Mit 2 Tafeln und 32 Figuren im Text. 1909. M 3.40.
 C. NEUMANN, Über das logarithmische Potential einer gewissen Ovalfläche. Mit 6 Abbildungen im Text. 1909. M 3.—
 A. v. OETTINGEN, Robert Mayers wissenschaftlicher Entwicklungsgang im Jahre 1841. Vortrag, gehalten am 25. Mai 1908. 1909. M 1.—
 E. v. MEYER, Über Zersetzungsweisen vierfach-alkylierter Ammoniumverbindungen. Nach eigenen Versuchen und Untersuchungen von E. Schwabe. 1909. M 1.—
 H. HELD, Untersuchungen über den feineren Bau d. Ohrlabyrinthes der Wirbeltiere. II. Zur Entwicklungsgesch. d. Cortischen Organs u. d. Macula Acustica bei Säugetieren u. Vögeln. M. 18 Taf. 1909. M 7.—
 F. HAUSDORFF, Die Graduierung nach dem Endverlauf. 1909. M 1.60.
 K. ROHN, Der Büschel von Flächen 2. Grades im Raume S_n und ein $(n+1)$ -Flach in besonderer Beziehung zu ihm. 1909. M 1.20.
 F. MARCHAND, Über die normale Entwicklung und den Mangel des Balkens im menschl. Gehirn. M. 5 Taf. u. 32 Fig. i. T. 1909. M 7.—

XXXII. BAND. (62. Bd.) 1913. brosch. Preis M 35.—

- O. FISCHER, Zur Kinematik der Gelenke vom Typus des Humero-Radialgelenks. Mit 28 Figuren im Text. 1909. M 3.50.
 E. MARX, Zweite Durchführung der Geschwindigkeitsmessung der Röntgenstrahlen. Experimentaluntersuchung. Mit 14 Figuren im Text und 10 Kurventafeln. 1910. M 4.—
 W. PFEFFER, Der Einfluß von mechanischer Hemmung und von Belastung auf die Schlafbewegungen. Mit 31 Textfig. 1911. M 6.—
 H. MIEHE, Javanische Studien. Mit 25 Textfiguren. 1911. M 6.—
 E. GROSSMANN, Die Polhöhe der Leipziger Sternwarte. 1912. M 3.50.
 O. WIENER, Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung. Erste Abhandlung: Die Mittelwertsätze für Kraft, Polarisation und Energie. Mit 9 Figuren im Text. 1912. M 4.—
 K. H. SCHEUMANN, Petrographische Untersuchungen an Gesteinen des Polzengebietes in Nord-Böhmen, insbesondere über die Spaltungsserie der Polzenit-Trachydolerit-Phonolith-Reihe. Mit 34 Fig. im Text nach Zeichnungen des Verfassers. 1913. M 8.—

XXXIII. BAND. (63. Bd.) 1917. brosch. Preis M 25.—

- F. HAYN, Selenographische Koordinaten. 4. Abhandl. Mit 11 Tafeln 1914. M 8.—
 C. NEUMANN, Über die Dirichlet'sche Theorie der Fourierschen Reihen. Ein Versuch, die Dirichlet'sche Theorie so umzugestalten, daß sie Auskunft gibt nicht nur über die Gleichwertigkeit zwischen der gegebenen Funktion und der ihr entsprechenden Fourierschen Reihe, sowie über die Konvergenz der Reihe, sondern auch über d. Gleichmäßigkeit dieser Konvergenz. M. 7 Fig. i. T. 1914. M 3.—
 C. NEUMANN, Franz Neumanns Beiträge zur Krystallonomie aus den Jahren 1823 und 1826. Ein Versuch, den wesentlichen Inhalt dieser vor fast hundert Jahren erschienenen fundamentalen Schriften in übersichtlicher und lückenloser Weise darzustellen. Mit 66 Figuren im Text und 22 Tafeln. 1916. M 14.—

XXXIV. BAND.

- W. PFEFFER, Beiträge zur Kenntnis der Entstehung der Schlafbewegungen. Mit 36 Figuren im Text. 1915. M 6.—
 A. v. OETTINGEN, Die Grundlage d. Musikwissenschaft u. d. duale Reininstrument. Mit 2 Separattafeln u. 86 Taf. i. T. 1916. M 8.—
 W. OSTWALD, Beiträge zur Farbenlehre. Erstes bis fünftes Stück. 1917. Mit 16 Figuren im Text. M 9.—

XXXV. Band.

- V. BJERKNES, Über thermodynamische Maschinen, d. unter Mitwirkung d. Schwerkraft arbeiten. Mit 4 Fig. im T. 1916. M 1.60.
 — Über Wellenbewegung in kompressiblen, schweren Flüssigkeiten. 1916. M 1.60.
 J. THOMAE, Über den Steinerschen Strahlenbüschel und den Dreispitz. Mit 15 Figuren im Text. 1916. M 3.—

B. G. Teubner.