

Die elektrische Reizung mit Wechselströmen.

Von

Dr. med. **Emil Reiss,**

z. Z. Assistenzarzt an der medizinischen Klinik des städt. Krankenhauses
zu Frankfurt a. M.

(Mit 3 Textfiguren.)

Der Wechselstrom hat in physiologischer Hinsicht bei der Prüfung der elektrischen Reizbarkeit grosse Vorzüge vor dem konstanten Strom. Die Stromstösse, die in stets einander entgegengesetzter Richtung sich ablösen, lassen eine Gewöhnung an den Reiz und eine Ermüdung nur in sehr geringem Masse aufkommen. Trotzdem wurde zu quantitativen Untersuchungen der elektrischen Erregung, insbesondere von Nerv und Muskel, bisher vorwiegend der konstante Strom benutzt, weil sich mit diesem einheitlichere Resultate erzielen liessen. Die Gründe hierfür lagen einestheils in der Schwierigkeit der exakten Messung von Wechselströmen, andernteils darin, dass die physiologische Wirkung des Wechselstroms bisher nicht genau genug definiert war.

In bezug auf den letzteren Punkt machte namentlich eine Tatsache der Erklärung Schwierigkeiten. Es ist schon lange bekannt, dass hochfrequente Wechselströme auch bei grosser Intensität vom menschlichen Körper gut vertragen werden. Beispielsweise kann man einen Tesla-Strom (von Millionen Polwechseln in der Sekunde), der eine gewöhnliche Glühlampe speist, gefahrlos durch einen Menschen hindurchleiten. Ein konstanter Strom von der gleichen Intensität würde unbedingt tödlich sein. Man hat sich diese Tatsache verständlich zu machen gesucht, indem man sagte, Ströme so hoher Wechselfrequenz passieren den Körper überhaupt nicht oder nicht in ihrer vollen Stärke, sondern sie verlaufen ganz oder teilweise an seiner Oberfläche. Schon d'Arsonval ist gegen diese Erklärung aufgetreten. Nernst hat dann eingehend dargelegt, dass ein solches Zusammendrängen der Stromlinien an der Oberfläche nur bei metallischen Leitern stattfindet und nicht bei Elektrolyten,

wie sie der tierische Körper ausschliesslich darstellt¹⁾. Er hat ferner experimentell bewiesen, dass auch die besten Elektrolyte schnellen Schwingungen den gleichen Widerstand entgegensetzen wie gewöhnlichen Strömen²⁾.

Die Beziehung, die zwischen der Anzahl der Polwechsel eines Stromes und seiner physiologischen Wirkung besteht, muss eine gesetzmässige sein. Dieses Gesetz hat Nernst zunächst theoretisch entwickelt, indem er der Ursache der physiologischen Reizung durch den elektrischen Strom überhaupt auf den Grund ging. Nernst sagt darüber in seiner ersten diesbezüglichen Publikation³⁾:

„Nach unseren bisherigen Kenntnissen kann der galvanische Strom im organisierten Gewebe, also einem Leiter rein elektrolytischer Natur, keine anderen Wirkungen als Ionenverschiebungen, d. h. Konzentrationsänderungen, verursachen; wir schliessen also, dass letztere die Ursache des physiologischen Effekts sein müssen. Bei Wechselströmen treten Konzentrationsänderungen in mit der Richtung des Stromes wechselndem Sinne auf. Wenn ihr Mittelwert einen bestimmten Betrag erreicht, wird die physiologische Wirkung merklich werden, d. h. die Reizschwelle ist erreicht.

Es scheint nun möglich, diese mittleren Konzentrationsänderungen zu berechnen, ohne gar zu spezielle Vorstellungen zu Hilfe nehmen zu müssen. Es ist bekannt, dass im organisierten Gewebe die Zusammensetzung der wässrigen Lösung, die den elektrolytischen Leiter bildet, nicht überall die gleiche ist, und insbesondere ist sie innerhalb und ausserhalb der Zellen verschieden. Halbdurchlässige Membrane verhindern den Ausgleich durch Diffusion; nur an diesen Membranen können Konzentrationsänderungen durch den Strom erzeugt werden, während bekanntlich im Innern einer Lösung von überall gleicher Zusammensetzung der Strom eine solche Wirkung nicht hervorbringen kann, weil in jedes Volumelement in jedem Augenblick ebensoviel Ionen hinein- wie hinauswandern.

An den halbdurchlässigen Membranen hingegen müssen Konzentrationsänderungen auftreten, weil der Strom daselbst Salz hintransportiert, dessen weiteren Transport die Membran verhindert.

1) Wiedemann's Annalen Bd. 60 S. 615. 1897.

2) Nernst, Wiedemann's Annalen Bd. 60 S. 614. 1897. Ferner Nernst und Lerch, Nachr. v. d. Kgl. Gesellsch. d. Wissensch. zu Göttingen 1904.

3) Nachr. v. d. Kgl. Gesellsch. d. Wissensch. zu Göttingen, math.-physik. Klasse 1899 H. 1 S. 104 ff.

Salze, welche die Membran zu passieren imstande sind, übernehmen die Stromleitung durch die Membran. Hier also ist offenbar der Sitz der elektrischen Reizung zu suchen¹⁾. Wenn nun ein Strom von der Dichtigkeit I die Salzmenge v an die Membran transportiert, so wird gleichzeitig infolge Diffusion eine Rückwanderung des Salzes eintreten; die mittlere Konzentration an der Membran wird also bedingt durch die entgegenwirkenden Effekte des Stroms und der Diffusion.“

Nernst hat nun auf Grund dieser Anschauungen aus den bekannten Gleichungen des Wechselstroms und der Diffusion eine Formel mathematisch abgeleitet, welche die Beziehung zwischen Stärke und Frequenz eines Wechselstroms bei der physiologischen Reizung ausdrückt. Voraussetzung bei der Entwicklung der Formel war, dass die vom Wechselstrom hervorgerufenen Konzentrationswellen in einiger Entfernung von der Membran schon abgeklungen sind. Die Nernst'sche Formel lautet:

$$C = \frac{J}{\sqrt{N}}$$

oder

$$J = \sqrt{N} \cdot C,$$

wobei J die Intensität des Wechselstroms, N die Anzahl der ganzen Polwechsel in der Zeiteinheit und C eine Konstante bedeutet. In Worten besagt die Formel also: die Intensität eines Wechselstroms, die einen bestimmten physiologischen Effekt ausübt, ist proportional der Wurzel aus der Wechselfrequenz und einer Konstanten.

Die grosse Bedeutung dieser Formel für die Physiologie liegt einmal darin, dass sie einer Anschauung über das Zustandekommen der elektrischen Reizung lebender Gewebe entspringt, die ausserordentlich einfach und folgerichtig ist. Es ist, wie ich glaube, die einzige der vielen Theorien der elektrischen Reizung, die auf dem Boden unseres bisherigen Wissens eine wirkliche Erklärung gibt.

Eine weitere Bedeutung erlangt die Formel dadurch, dass sie uns erlaubt, einen bestimmten Reizeffekt in einem absoluten Wert anzugeben. Denn die Grösse der Konstante kann, wenn die Formel

1) Es ist vielleicht nicht ausgeschlossen, dass elektrostatische Ladungen an den halbdurchlässigen Membranen, auf die zuerst Ostwald (Zeitschr. f. physik. Chem. Bd. 6 S. 71. 1890) hingewiesen hat, ebenfalls Reizerscheinungen ausüben; da diese aber mit den Konzentrationsveränderungen parallel gehen, so brauchen wir sie hier nicht weiter zu berücksichtigen.

richtig ist, nur abhängig sein von der Form des angewandten Wechselstroms und von der Reizempfindlichkeit des untersuchten Nerven. Alle die Fehlerquellen, die bei den bisherigen Methoden der elektrischen Reizung am Lebenden in Betracht kamen, wie der (veränderliche) Widerstand und die Kapazität der menschlichen Oberhaut, die Ermüdung der Nerven und namentlich für unterbrochene Ströme die Abhängigkeit der Reizschwelle von der Wechselfrequenz, müssen bei geeigneter Versuchsanordnung für unsere Konstante in Wegfall kommen. Sie wird unter gleichen Bedingungen, d. h. für ein und dieselbe Apparatur und für den gleichen Nerven (oder Muskel usw.) stets die gleiche Grösse haben müssen. Aus diesem Grunde wäre es auch möglich, dass die Methode einmal für die Pathologie Bedeutung gewinnt.

Es war also eine dankenswerte Aufgabe, die mir Professor Nernst stellte, durch weitere Messungen zu prüfen, ob die genannte Formel richtig ist. Einige Versuche in dieser Richtung lagen bereits vor.

Zeynek¹⁾ hatte die Reizbarkeit der sensiblen Nerven durch Versuche an den Fingerspitzen geprüft und im grossen Ganzen (ausser für sehr langsame Wechselströme) die Nernst'sche Formel bestätigen können. Nernst selbst hat dann zusammen mit Barratt²⁾ die Richtigkeit der Formel für den motorischen Froschnerven in Versuchen erweisen können, über die später eingehend berichtet werden soll.

Wenn die Nernst'sche Formel richtig ist, so muss ihr eine allgemeine Gültigkeit für die elektrische Reizung lebender Gewebe zukommen. Aus diesem Grunde habe ich versucht, sie an verschiedenartigen Geweben zu prüfen. Es wurde untersucht: die Reizung motorischer Nerven des Frosches, die Reizung sensibler Nerven des Menschen (in Verfolg der Zeynek'schen Versuche), die direkte Muskelreizung am Frosch und die Reizung sensibler Pflanzen.

Die exakte Messung von Wechselströmen ist eine Aufgabe, die noch immer die Technik beschäftigt. Je grösser die Frequenz von Wechselströmen wird, um so schwieriger ist es, Instrumente zu konstruieren, welche die Stromstärke unabhängig von Schwankungen der Frequenz angeben. Die Versuchsanordnung war daher auch

1) Göttinger Nachr., math.-physik. Kl. 1899 H. 1 S. 94.

2) Zeitschr. f. Elektrochemie 1904 S. 664.

der schwierigste Teil der vorliegenden Arbeit, der Monate in Anspruch nahm. Und dennoch ist die nach diesen Vorversuchen getroffene Anordnung in der Handhabung noch etwas diffizil gewesen, so dass die Versuche mit anderen ganz neu konstruierten Instrumenten nochmals kontrolliert resp. ergänzt wurden. Nachfolgend sollen diese beiden hauptsächlichen Apparaturen, deren erste in Göttingen, die zweite in Berlin in Anwendung kam, ausführlich beschrieben werden.

Apparatur 1.

Es wurde beabsichtigt, die Gültigkeit der Formel für eine möglichst grosse Variation der Wechselfrequenzen zu prüfen. Dazu waren verschiedene Wechselstromgeneratoren nötig. Den Strom für hohe Frequenzen lieferte eine Wechselstromsirene nach Dolezalek. Im Prinzip besteht diese von den Siemens-Schuckert-Werken hergestellte Maschine aus einem Zahnrad aus weichem Eisen, das an zwei Elektromagneten vorübergeführt wird. Je nachdem eine Zacke oder eine Lücke dieses Zahnrades den Magneten passiert, wird der durch diesen von einer gewöhnlichen Stromquelle geleitete galvanische Strom durch Induktion verstärkt oder abgeschwächt, indem gleichzeitig seine Richtung umgekehrt wird. Die Anzahl der Zacken entspricht der bei einer Umdrehung des Rades stattfindenden Zahl der ganzen Polwechsel. Das Rad wird durch einen durch Bremsvorrichtung genau regulierbaren Elektromotor getrieben. Aus der Umdrehungszahl des Rades lässt sich leicht die Wechselfrequenz berechnen. Sie liess sich von etwa 400—5000 in der Sekunde variieren. Die Maschine lief sehr gleichmässig. Nur ausnahmsweise wurden durch Schwankungen des dem Stadtanschluss entnommenen Hochspannungsstroms Unregelmässigkeiten hervorgerufen. Die Stromstärke liess sich durch Veränderung des Erregungsstroms, ferner natürlich durch Einschaltung von Widerständen in den gelieferten Wechselstrom regulieren.

Die Wechselströme mittlerer Frequenzen lieferte eine Maschine, die aus in eine Hartgummiplatte kreisförmig eingelassenen Drahtrollen bestand, die einen Kern von Eisendrahten enthielten. Zu beiden Seiten dieser Rollen rotierte je ein Kranz von 60 stumpfen Eisenspitzen, die durch einen konstanten Strom elektromagnetisch erregt wurden. Die Maschine wurde mit der Hand gedreht. Der Drehende musste sich dauernd nach dem Takt eines Metronoms

richten, das auf das gewünschte Tempo eingestellt wurde. Die mit dieser Maschine erzielten Wechselfrequenzen bewegten sich etwa zwischen 100 und 2000 in der Sekunde.

Zur Erzeugung noch kleinerer Wechselfrequenzen diente eine dritte Maschine. Sie bestand aus fünf grossen, in eine drehbare Hartgummiplatte eingelassenen Drahtspulen, die zwischen den Polen eines grossen Elektromagneten hindurchbewegt wurden. Der Magnet wurde wiederum von aussen gereizt, wozu in diesem Falle der Hochspannungsstrom nötig war. Die Maschine wurde unter den gleichen Kautelen wie die vorige durch Handantrieb bewegt. Sie lieferte 30 bis 100 Polwechsel in der Sekunde.

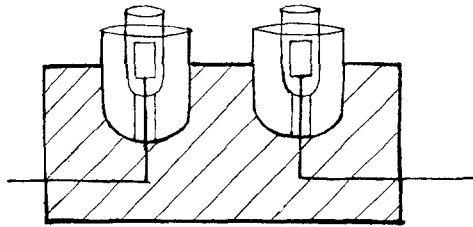


Fig. 1.

Die Wechselfrequenz wurde bei sämtlichen Maschinen vor und nach jedem Versuch mit Hilfe von Tourenzähler und Sekundenuhr bestimmt.

Der von beiden letztbeschriebenen Maschinen gelieferte Strom musste, um die für die Versuchsanordnung erforderliche Spannung zu erreichen, durch einen Transformator geleitet werden, dessen Auswahl den jeweiligen Versuchsbedingungen angepasst wurde. Natürlich wurde in jeder einzelnen Versuchsreihe immer nur ein und derselbe Transformator benützt.

Von der Maschine resp. dem Transformator wurde der Strom in einem einheitlichen Stromkreis durch verstellbare Widerstände und durch das zu untersuchende Objekt geleitet. Als Elektroden dienten für die Versuche am Tier und der Pflanze die bekannten Pinselelektroden. Der Pinsel war mit physiologischer Kochsalzlösung getränkt. — Für die Versuche an den Fingerspitzen des lebenden Menschen war eine Elektrode nötig, die es erlaubte, den Strom einem stets gleich grossen Hautbezirk in unveränderlichem Kontakt zuzuführen. Dieser Zweck wurde durch folgende Anordnung erreicht (vgl. Fig. 1): Kleine Platinelektroden steckten in zwei kurzen,

unten zugeschmolzenen Glasröhrchen von etwa 1 cm Durchmesser. Diese wurden bis zum Rand mit physiologischer Kochsalzlösung gefüllt und zwei Fingerkuppen einer Hand darauf gesetzt. Die Röhrchen steckten in etwas grösseren Glaströgen zum Auffangen der überfliessenden Flüssigkeit — eine nicht unwichtige Vorrichtung, weil sonst der Strom zum Teil durch die zwischen den Röhrchen sich bildende Flüssigkeitsschicht lief anstatt durch die Finger. Das Ganze steckte in einem Paraffinblock, durch den die Drahtzuleitung zu den Platinelektroden gut isoliert wurde.

Von den in den Hauptstromkreis eingeschalteten Widerständen wurde ein Nebenkreis abgezweigt, der zu dem Messinstrument führte. Als solches diente ein Quadrantenelektrometer nach Dolezalek. Die Ablesung geschah mit Fernrohr und Skala. Es wurden immer nur zwei diagonal liegende Quadranten gleichzeitig benutzt. Mit Hilfe eines Kommutators konnte bald das eine, bald das andere Quadrantenpaar eingeschaltet werden, so dass bei jeder Messung der Ausschlag des Instruments nach beiden Seiten abgelesen wurde. Die beiden Quadranten waren mit den Enden des Abzweigewiderstands, die Nadel mit dessen Mitte verbunden. Die bei der betreffenden Ablesung gerade freien Quadranten wurden mit Hilfe eines am Kommutator angebrachten Bügels jedesmal auch mit der Mitte des Widerstandes verbunden. Durch letztgenannten Kunstgriff wurden störende Einflüsse der Luftelektrizität vermieden, die sich bei nicht angeschlossener Nadel leicht in starker Unstetigkeit des Nullpunkts geltend machen. (Auch wenn man die Nadel zur Erde ableitet und dazu Gas- oder Wasserrohr benutzt, schwankt der Nullpunkt infolge hier durchlaufender Ströme oft ausserordentlich.) Das Elektrometer wurde vor jeder grösseren Versuchsreihe als Voltmeter mit Hilfe eines Hitzdrahtgalvanometers von Hartmann und Braun mit Wechselströmen geacht. Das Hitzdrahtinstrument war vorher mit Gleichstrom als Amperemeter geacht worden. In den Versuchen wurde alsdann die Stromstärke aus der Spannung, die das Elektrometer anzeigte, und dem Widerstand, von dem es abgezweigt war, berechnet.

Als Widerstände dienten anfangs die üblichen Widerstandskasten (Stöpselwiderstände). Es wurden meist 20 000 — 60 000 Ω vor das Elektrometer gelegt.

Bei Wechselfrequenzen von nicht viel mehr als 100 pro Sekunde bedingen auch so grosse Stöpselwiderstände keinen Fehler. Bei

höheren Frequenzen aber kommt ihre Kapazität störend in Betracht.

Da also die Stöpselwiderstände nicht für alle Versuche zu gebrauchen waren, wurden Flüssigkeitswiderstände benutzt. Sie bestanden aus zwei weiten Glasrohren, die beide in dasselbe enge Glasrohr einmündeten und mit Borsäuremannitlösung gefüllt waren. Ein dem Lumen des engen Glasrohres nahezu angepasster Glasstab konnte in jenem auf und nieder bewegt werden, so dass er nur noch eine schmale Flüssigkeitsschicht zwischen sich und der Glaswand übrig liess. Diese kapillare Flüssigkeitsschicht bildete den Hauptwiderstand, der durch Bewegen des Glasstabes beliebig reguliert werden konnte. Grosse, gut platinirte Platinelektroden bildeten die

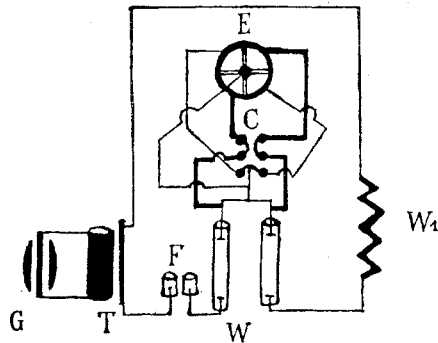


Fig. 2. Apparatur I. G = Wechselstromgenerator. T = Transformator. F = Elektroden für Fingerreizung. W = Flüssigkeitswiderstand vor dem Elektrometer. W_1 = Regulierwiderstand. C = Kommutator. E = Elektrometer.

Stromzuleitung. Vor jeder grösseren Versuchsreihe wurde der Widerstand dieser Gefässe durch Vergleich mit einer Chaperonrolle an der Wheatstone'schen Brücke auf die gewünschte Höhe eingestellt.

Die gesamte Schaltung der Apparatur 1 entsprach der Fig. 2.

Wie die Tabellen zeigen werden, waren die hiermit erzielten Resultate im ganzen zufriedenstellend. Indessen konnte man doch bei höheren Wechselfrequenzen (über 2000) hier und da einen Gang der Konstanten wahrnehmen, der sich nicht auf zufällige Fehler beziehen liess. Es lag der Verdacht nahe, dass die wenngleich sehr geringe Kapazität des Elektrometers hierfür verantwortlich zu machen sei. Auch waren die Ströme, welche die Maschine von Dolezalek lieferte, wohl nicht ohne weiteres als völlig reine Sinusströme anzusprechen. Aus diesen Gründen wurden die Versuche mit etwas veränderter Apparatur wiederholt und ergänzt.

Apparatur 2.

Den Hochfrequenzstrom lieferte wiederum die Wechselstrom-sirene nach Dolezalek. Zur Erzeugung ganz kleiner Schwingungszahlen diente ein fünfpfardiger rotierender Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer, dessen vier Feldmagneten mit 220 Volt erregt wurden. Der durch den Anker gehende Gleichstrom wurde durch einen Vorschaltwiderstand reguliert, so dass die Erregung annähernd gleich blieb, auch wenn man die Maschine langsamer laufen liess. Durch Anlegen eines Voltmeters und Rotation des Ankers mit der Hand wurde festgestellt, dass einer Umdrehung zwei ganze Polwechsel entsprachen. Daraus wurde wie sonst die Wechselfrequenz in jedem einzelnen Falle bestimmt.

Als Messinstrument diente ein von den Siemens-Schuckert-Werken erst ganz kürzlich mit möglichster Verminderung von Metall (völlig ohne Eisen) konstruiertes Spiegel-Elektrodynamometer. Die Achse der beweglichen Spule war in der Nordsüdrichtung aufgestellt. Der Strom wurde hintereinander durch die zwei festen Rollen und die bewegliche Spule geleitet. Ein Kommutator erlaubte, die Stromrichtung ausschliesslich in den festen Rollen zu wechseln, während die Spule immer im gleichen Sinne durchflossen wurde. Das Instrument wurde mit Gleichstrom geaicht, wobei als Milliampèremeter ein Millivoltmeter von Keiser & Schmidt von $450\ \Omega$ Widerstand diente, wozu ein Nebenschluss von $12\ \Omega$ gelegt war. Dieses Instrument wiederum war mittels eines Präzisions-Instrumentes von Hartmann & Braun als Milliampèremeter geaicht worden.

Die Stärke der Erregung wurde bei der Dolezalek'schen Maschine durch Variierung des Magnetisierungsstroms reguliert. Bei dem Wechselstrom-Gleichstromumformer wurde die Regulation am gelieferten Wechselstrom erzielt durch Einschalten eines variierbaren Jodkadmium-Amylalkohol-Widerstandes zur groben, eines Borsäure-Mannit-Widerstandes zur feinen Einstellung.

Um einen möglichst reinen Sinusstrom zu erzielen, wurden einem in der physikalischen Gesellschaft von Herrn Ohrlich (1906) gemachten Vorschlage entsprechend in den Wechselstromkreis möglichst viel eisenfreie Selbstinduktionen in Gestalt von 10–15 Rollen aufgespulten Kupferdrahtes eingeschaltet. Hierdurch werden die schnelleren Nebenschwingungen vernichtet, und nur die reinen Grundschwingungen bleiben übrig.

Die gesamte Anordnung entsprach der Fig. 3. Ein besonderer Vorteil gegen die frühere Anordnung lag darin, dass sämtliche Apparate in einen Stromkreis hintereinandergeschaltet werden konnten. Kapazität und Selbstinduktion konnte infolgedessen auf das Messinstrument nicht störend einwirken.

In den folgenden Tabellen soll durch die Bezeichnung A_I und A_{II} kenntlich gemacht werden, mit welcher der beiden Apparaturen die betreffende Versuchsreihe ausgeführt wurde.

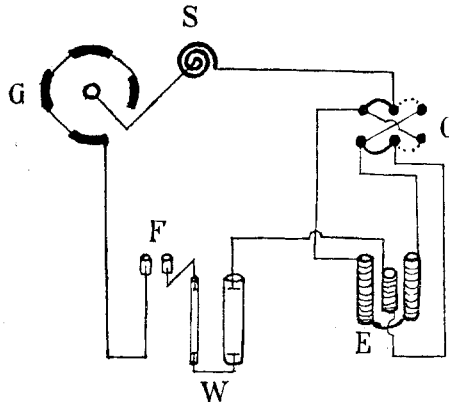


Fig. 3. Apparatur II. G = Wechselstromgenerator. S = Selbstinduktion. C = Kommutator. E = Elektrodynamometer. W = Flüssigkeitswiderstände. F = Elektroden für Fingerreizung.

I. Motorische Nerven.

Reizversuche am motorischen Nerven habe ich nur in geringem Umfang angestellt, weil hierüber bereits exakte Untersuchungen von Nernst und Barratt vorlagen. In meinen Versuchen wurde der in üblicher Weise¹⁾ präparierte N. ischiadicus des Frosches über zwei Pinselelektroden gelegt. Der Oberschenkelknochen war fixiert, der Unterschenkel bewegte einen federnden Stahlhebel, an dem ein Fähnchen befestigt war. Die erste geringe Bewegung des Fähnchens galt als Indikator für die stattgehabte Reizung. Es wurde die oben beschriebene Apparatur (A_I) mit der Dolezalek'schen Wechselstromsirene benutzt. Die von Nernst und Barratt angewandte Messmethode war etwas komplizierter, weil Spannung und

1) Für die mir dabei geleistete Unterstützung sage ich Herrn Dr. Erich Ebstein (damals am physiol. Institut in Göttingen) auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank.

Widerstände getrennt bestimmt werden mussten. Bezüglich der Einzelheiten muss auf das Original verwiesen werden; im Prinzip können die Versuche anstandslos mit den meinen verglichen werden.

Schnelle und langsame Frequenzen wurden in allen Versuchen mit möglichster Abwechslung eingeschaltet, so dass man eine etwaige zeitliche Veränderlichkeit des Präparates wohl ausschalten konnte. Vor jeder Ablesung wurde erst mehrmals auf die minimale Reizwirkung eingestellt; in dieser Weise wurden mehrere Ablesungen gemacht, deren Mittelwert zur Rechnung benutzt wurde. In allen im folgenden mitgeteilten Tabellen ist durch die in der ersten Kolumne stehende Zahl die Reihenfolge der einzelnen Versuche wiedergegeben; die Versuche sind im aufsteigenden Sinne der Wechselfrequenz angeordnet. Die Wechselfrequenz N , d. i. die Anzahl der ganzen Polwechsel in der Sekunde, steht in der zweiten Kolumne. Dann folgt die Stromstärke J in Milliampère und endlich die nach der Formel berechnete Konstante, deren Wert durch 10000 zu dividieren ist. Auch die Tabellen von Nernst und Barratt, die ich hier nochmals zum Abdruck bringe, habe ich der Einheitlichkeit halber in dieser Weise umgerechnet.

Eigene Versuche (A D).

1.

Nr.	N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
1	920	0,140	0,046
2	1710	0,187	0,045

2.

3	760	0,112	0,041
4	2000	0,192	0,043
5	2790	0,257	0,049
1	2850	0,237	0,044
2	4290	0,330	0,050

Versuche von Nernst und Barratt.

1.

N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-3}$
200	0,00112	0,00079
550	0,00177	0,00075
632	0,00176	0,00070
750	0,00202	0,00074

2.

N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-3}$
185	0,00149	0,00110
448	0,00200	0,00095
545	0,00272	0,00117
641	0,00238	0,00094
947	0,00323	0,00105
1537	0,00381	0,00097

3.

105	0,00081	0,00079
136	0,00088	0,00075
785	0,00216	0,00098
960	0,00241	0,00078
2230	0,00385	0,00082

Wie man sieht, geben meine beiden Versuche etwa ebensogute Resultate wie die von Nernst und Barratt. Die Konstanten zeigen keinen bestimmten Gang. Fehler bis zu 10 % kommen allerdings vor. Nernst und Barratt schreiben dieselben hauptsächlich dem Umstand zu, dass „eine Reihe verschiedenartiger Grössen mit grösster Schnelligkeit gemessen werden musste“. Bei meinen Versuchen war diese Fehlerquelle nicht mehr vorhanden. Dagegen war die Bestimmung der ersten Muskelzuckung mit dem blossen Auge keine so exakte wie in den Versuchen von Nernst und Barratt, welche Autoren die Muskelzuckung mit Hilfe von Spiegel und Fernrohr an einer Skala ablasen. Auch kann wohl die Grösse der Nervenoberfläche, die mit der Pinselelektrode in direkte Berührung kommt, im Laufe einer Versuchsreihe etwas wechseln; das mag die Höhe der Stromstärke, die zur Reizauslösung nötig ist, in geringem Grade beeinflussen. Man wird wohl nicht fehlgehen, wenn man den grössten Teil des in meinen Versuchen enthaltenen Fehlers auf diese und andere in den äusseren Versuchsbedingungen enthaltene Ungenauigkeiten zurückführt.

Dass die von Nernst und Barratt erhaltenen Werte der Stromstärken und Konstanten in einer ganz anderen Grössenordnung lagen als die meinen, dürfte wohl auf Unterschiede in den Froschpräparaten zurückzuführen sein.

An dem wesentlichen Ergebnis, d. i. an dem Fehlen eines bestimmten Ganges der Konstanten in jeder einzelnen Versuchsreihe, ändert diese Tatsache nichts. Meine Versuchsergebnisse sind also

denen der mehrfach genannten Autoren durchaus analog. Die Formel $\frac{J}{\sqrt{N}} = C$ besitzt auf Grund der verschiedenen Versuche Gültigkeit für die Reizung des motorischen Froschnerven im Gebiete von etwa 100—4300 Wechselfrequenzen pro Sekunde.

II. Sensible Nerven.

Zu der grossen Mehrzahl der Versuche habe ich meine eignen Fingerspitzen benutzt, und zwar meistens Zeige- und Mittelfinger einer Hand. Vor jeder Versuchsreihe wurden sie mit Seife entfettet, während der Dauer einer Versuchsreihe wurden sie möglichst vor anderen Reizen geschützt. Sie wurden auf die oben beschriebenen Elektrodengefässe so aufgesetzt, dass die betreffende Hautstelle völlig von der physiologischen Kochsalzlösung gespült war. Insbesondere wurde das Zwischentreten von Luftblasen vermieden. Nachdem irgendeine konstante Wechselfrequenz hergestellt war, wurde der Strom so lange verstärkt, bis eben gerade in den Fingern ein leises Prickeln zu fühlen war. Dieser Moment wurde als die Reizschwelle angesehen. Zuweilen spürte man im einen Finger das Prickeln früher als im andern. War die gewünschte Stromstärke erreicht, so mussten die Finger unter dem gleichen Druck bis zum Ende der Ablesung auf den Elektrodengefässen liegen bleiben. Denn es zeigte sich stets, dass bei stärkerem Aufdrücken des Fingers bei gleichbleibender Stromquelle das Messinstrument einen um ein geringes grösseren Ausschlag gab. Offenbar wird durch starkes Aufpressen der Finger das Gewebe blutleerer gemacht und daher sein Widerstand gegen den elektrischen Strom geringer. Ein Messungsfehler entsteht dadurch natürlich nicht, wenn die Ablesung bei dem gleichen Fingerdruck gemacht wird, bei welchem die Reizschwelle eingestellt worden war. In dieser Weise wurde gewöhnlich bei jeder Geschwindigkeit der Wechselstrommaschine die Reizschwelle dreimal eingestellt und bei jeder Einstellung mit Hilfe eines Kommutators auf beiden Seiten der Skala eine, eventuell auch mehrere Ablesungen gemacht. Auch die jeweilige Wechselfrequenz wurde stets mehrmals bestimmt.

Aus dem Vergleich mehrerer Einstellungen und Ablesungen in einem Versuch ergibt sich die Fehlergrösse der Methode.

Nachstehend zwei Beispiele von je drei hintereinander gemachten Einstellungen der Reizschwelle mit Bestimmung der Stromstärke und Wechselfrequenz ohne beabsichtigte Veränderung der Stromquelle:

N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
1670	0,952	0,233
1670	0,940	0,230
1670	0,960	0,235
820	0,480	0,168
830	0,530	0,184
820	0,540	0,189

Man sieht, dass zwischen den einzelnen Bestimmungen Differenzen vorkommen, die bis zu 10 % des Wertes der Konstanten betragen. Die Bestimmung der Wechselfrequenz zeigt nur geringe Abweichungen. Der Hauptfehler liegt, wie man sieht, in der Angabe der Stromstärke. Die Einstellung der Nadel des Messinstruments erfolgte aber, wie die Beobachtung lehrte, sehr prompt (aperiodisch) und blieb unter entsprechenden Kautelen sehr konstant. Schaltete man an Stelle der Finger z. B. ein Stück Draht ein, so zeigte das Messinstrument, wenn an der Stromquelle nichts verändert wurde, stets mit grosser Genauigkeit den gleichen Wert an. Man muss also folgern, dass nicht die Messung selber den Hauptanteil des Fehlers trug, sondern dass die jedesmalige Einstellung der Reizschwelle die hauptsächliche Fehlerquelle war. Der Moment, in dem das erste Reizgefühl auftritt, ist eben nicht mit absoluter Genauigkeit zu bestimmen. Es sind also die Abweichungen der Stromstärke in der Tabelle zur Hauptsache der unvollkommenen Ausbildung des Gefühlssinnes (für den elektrischen Strom) zuzuschreiben.

Da die erhaltenen Tabellen sämtlich gleichsinnig ausfielen, genügt es, wenn nachstehend nur eine grössere Auswahl reproduziert wird. Es sei nochmals bemerkt, dass die mit der Apparatur II (A II) ausgeführten Versuche Anspruch auf grössere Exaktheit haben.

I. Hohe Frequenzen. (A II.)

Nr.	N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
4	1470	0,851	0,222
3	1850	1,015	0,236
1	2860	1,167	0,218
2	3130	1,220	0,218
5	820	0,535	0,187
3	1390	0,670	0,180
1	2170	1,035	0,222
2	2780	1,192	0,226
4	3450	1,278	0,218

Nr.	N	$J \times 10^{-5}$	$C \times 10^{-4}$
1	800	0,530	0,188
3	840	0,510	0,176
5	1410	0,860	0,230
2	2380	1,195	0,245
4	3100	1,330	0,238
3	880	0,575	0,190
2	2330	1,000	0,207
1	3220	1,240	0,218
9	820	0,515	0,180
3	870	0,598	0,203
4	1190	0,760	0,220
8	1610	0,900	0,224
5	1670	0,952	0,233
6	2130	1,080	0,234
1	2170	1,026	0,220
7	2330	1,100	0,228
2	3220	1,250	0,220
10	3330	1,260	0,219
1	460	0,480	0,225
8	760	0,510	0,185
6	940	0,545	0,177
4	1120	0,673	0,201
9	1410	0,730	0,194
3	2040	0,955	0,211
5	2700	1,082	0,208
2	3570	1,230	0,204
7	3570	1,260	0,211
2	750	0,375	0,137
3	1220	0,530	0,152
1	2860	0,910	0,170
4	3570	0,920	0,154
1	690	0,450	0,171
3	1520	0,635	0,162
2	3330	1,332	0,231
4	720	0,425	0,157
1	1640	0,615	0,152
2	2270	0,865	0,181
3	3450	1,057	0,180

A I.

5	820	0,297	0,104
9	860	0,278	0,095
3	860	0,297	0,102
7	860	0,321	0,110
1	870	0,291	0,099
11	870	0,297	0,101
8	1670	0,407	0,100
2	1850	0,393	0,092
6	2230	0,470	0,100
12	2550	0,489	0,097
4	3530	0,522	0,088
10	3870	0,532	0,086

II. Mittlere Frequenzen (AI).

Nr.	N	$J \times 10^{-8}$	$C \times 10^{-4}$
3	280	0,22	0,131
4	460	0,28	0,130
2	650	0,35	0,137
5	940	0,38	0,124
1	970	0,38	0,122
4	340	0,26	0,144
1	370	0,28	0,146
3	540	0,32	0,137
2	790	0,36	0,128
6	200	0,22	0,155
5	320	0,25	0,139
4	570	0,40	0,168
1	590	0,31	0,127
7	620	0,32	0,128
2	780	0,41	0,147
3	1180	0,57	0,166
7	590	0,411	0,169
6	720	0,460	0,171
8	720	0,461	0,172
13	770	0,445	0,160
4	790	0,460	0,164
12	970	0,513	0,165
5	1000	0,519	0,164
1	1070	0,519	0,159
11	1110	0,508	0,152
2	1250	0,603	0,171
10	1430	0,600	0,159
9	1580	0,633	0,159
3	1580	0,640	0,161
1	500	0,291	0,130
2	530	0,312	0,136
10	650	0,338	0,132
1	770	0,341	0,123
4	850	0,334	0,115
5	940	0,358	0,117
8	980	0,390	0,124
3	1110	0,380	0,114
9	1330	0,407	0,111
6	1360	0,399	0,108
7	1700	0,574	0,139
1	270	0,251	0,152
4	280	0,253	0,151
2	330	0,271	0,149
7	370	0,300	0,155
3	410	0,301	0,150
5	440	0,315	0,151
6	490	0,338	0,153
8	550	0,346	0,151
1	670	0,356	0,138
6	860	0,332	0,114
2	1050	0,333	0,118
5	1150	0,397	0,117
4	1430	0,426	0,113
3	1700	0,498	0,122

Nr.	N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
1	250	0,241	0,154
6	280	0,286	0,171
2	330	0,308	0,170
3	380	0,308	0,158
4	460	0,330	0,154
5	590	0,339	0,140
1	140	0,131	0,112
2	210	0,249	0,170
7	230	0,280	0,185
5	250	0,277	0,176
3	260	0,285	0,177
4	310	0,313	0,179
8	370	0,351	0,181
6	440	0,327	0,155

III. Kleinere Frequenzen (A I).

2	21	0,161	0,352
1	29	0,192	0,371
1	26	0,192	0,374
4	26	0,219	0,426
3	27	0,210	0,402
2	40	0,264	0,420
5	40	0,250	0,394
1	37	0,221	0,364
2	39	0,221	0,353
4	44	0,215	0,324
8	45	0,221	0,328
3	62	0,229	0,290
5	76	0,257	0,296
6	86	0,297	0,292
7	100	0,318	0,318
5	34	0,17	0,292
3	35	0,17	0,286
6	71	0,24	0,278
2	74	0,24	0,280
1	106	0,27	0,262
4	109	0,27	0,259
2	35	0,245	0,412
3	41	0,270	0,421
1	83	0,338	0,370
4	32	0,197	0,350
5	38	0,204	0,331
1	56	0,235	0,315
3	57	0,246	0,327
6	59	0,252	0,329
2	67	0,266	0,326

IV. Kleinste Frequenzen (A II).

3	7	0,130	0,479
1	12	0,150	0,436
2	30	0,200	0,334
4	38	0,215	0,350

Nr.	N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
1	7	0,220	0,820
5	11	0,245	0,745
3	19	0,280	0,635
2	28	0,263	0,500
4	34	0,340	0,580
1	7	0,230	0,876
7	12	0,238	0,698
6	14	0,250	0,668
4	17	0,263	0,639
3	23	0,267	0,560
5	30	0,317	0,563
2	36	0,302	0,497
8	38	0,320	0,521
1	12	0,410	1,167
3	13	0,407	1,141
4	20	0,500	1,118
2	38	0,540	0,871
1	12	0,418	1,190
2	38	0,532	0,858
1	10	0,215	0,697
3	20	0,235	0,525
2	36	0,325	0,539

Mit Ausnahme der Versuche mit kleinsten Wechselfrequenzen ergeben sämtliche Tabellen übereinstimmend eine volle Bestätigung der von Nernst aufgestellten Formel $\frac{J}{\sqrt{N}} = C$. Denn die nach dieser Formel berechnete Konstante ist nur geringen Schwankungen unterworfen und zeigt keinen bestimmten Gang nach irgendwelcher Richtung. Die Schwankungen der Konstanten betragen bis 10 % des Wertes, oft viel weniger, selten mehr. Nach dem oben Dargestellten ist man berechtigt, den Hauptteil dieses Fehlers der physiologischen Unmöglichkeit zuzuschreiben, die Reizschwelle des sensiblen Nerven für elektrische Ströme absolut scharf anzugeben. Bei den Versuchen konnte immer beobachtet werden, dass bei ungeschickten oder unaufmerksamen Personen die Fehler der Konstanten grössere waren. Es ist also in den mitgeteilten Versuchen diejenige Genauigkeit erreicht, die bei der Entwicklung der betreffenden Sinnesqualität des Menschen erreichbar ist. Mit dieser sind der Methode ihre natürlichen Schranken gesetzt.

Nur bei kleinsten Wechselfrequenzen stimmt die Formel nicht, hier zeigen sämtliche Tabellen einen unverkennbaren Gang der Kon-

stanten nach der gleichen Richtung. Aber auch diese Tatsache ist von Nernst bereits vorausbestimmt worden¹⁾. Denn wie oben auseinandergesetzt ist, war die Voraussetzung für die Aufstellung der Formel, dass die von den einzelnen Stößen des Wechselstromes hervorgerufenen Konzentrationswellen in einiger Entfernung von der Membran schon abgeklungen sind. Diese Bedingung „wird unstatthaft, wenn die Längen der Konzentrationswellen mit den Dimensionen einer Zelle kommensurabel werden, wenn also die Frequenz zu gering wird“. Dass bei Anwendung von Strömen so geringer Wechselstromfrequenz die Konstanten tatsächlich einen Gang zeigten, darf als weiterer Beweis für die Richtigkeit der Nernst'schen Formel angesehen werden.

Der Besitz einer so exakten Methode legte den Gedanken nahe, die Reizempfindlichkeit solcher Körperstellen miteinander zu vergleichen, zwischen denen mit der bisherigen Methodik eine Verschiedenheit noch nicht festgestellt war, also in erster Linie symmetrischer Hautteile. Eine eventuelle Verschiedenheit des Hautwiderstandes konnte ja nicht störend in Betracht kommen, weil stets nur Stromstärken gemessen wurden.

Vergleich beider Hände.

Nr.	N	Rechts		Links		Versuchsperson
		$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$	
1	760	0,470	0,171	0,405	0,147	} A
2	3330	1,265	0,219	0,870	0,151	
1	830	0,470	0,163	0,490	0,170	} B
3	930	0,525	0,173	0,550	0,181	
2	3450	0,895	0,152	0,200	0,204	
3	710	0,705	0,264	0,620	0,232	} C
4	1410	1,050	0,280	0,860	0,229	
2	2330	1,302	0,270	0,135	0,235	
1	2700	über 1,400	über 0,270	0,130	0,217	
1	690	0,430	0,164	0,305	0,116	} D
3	1430	0,715	0,189	0,590	0,156	
2	2220	0,920	0,195	0,740	0,157	

Meine Versuche darüber beschränkten sich auf die Vergleichung entsprechender Finger beider Hände eines Individuums unter möglichst gleichen Bedingungen. Die Versuche hatten stets ein

1) Göttinger Nachrichten 1899 S. 107.

positives Ergebnis. Wie die Tabellen zeigen, ist in der Mehrzahl der Fälle die linke Hand die empfindlichere. Der Unterschied ist gering, aber doch absolut deutlich. Eine Erklärung für dieses Verhalten — wenn es durch zahlreichere Untersuchungen Bestätigung findet —, wird wohl darin zu suchen sein, dass die rechte Hand durch die andauernden groben Insulte, denen sie im täglichen Gebrauch mehr als die linke ausgesetzt zu sein pflegt, ihr Empfindungsvermögen für Reize feinster Art etwas abgestumpft hat. Im Falle B der vorstehenden Tabelle ist es allerdings umgekehrt gewesen, obwohl die betreffende Versuchsperson kein Linkshänder war.

Ich habe aus den an verschiedenen Versuchspersonen an beiden Händen bei verschiedenen Wechselfrequenzen (mit der gleichen Apparatur) erhaltenen Konstanten die Mittelwerte berechnet und in nachstehender Tabelle zusammengestellt.

Versuchsperson	C	
	rechts	links
A	0,19	0,15
B	0,16	0,18
C	0,27	0,23
D	0,18	0,15
E	0,19	
F	0,18	
G	0,15	

Man sieht daraus, dass die einzelnen Werte gar nicht sehr weit auseinanderliegen. Es ist also die Möglichkeit vorhanden, durch Untersuchungen an zahlreicheren Individuen die normale Breite der Reizschwelle sensibler Nerven für Wechselströme festzulegen.

III. Muskeln.

Die direkte Muskelreizung mit Wechselströmen wurde an curareisierten Fröschen untersucht. Es wurde zunächst diejenige Dosis des käuflichen Curarepräparates festgestellt, die bei subkutaner Injektion eine völlige Lähmung der motorischen Nerven des Frosches herbeiführte, ohne das Tier zu töten. Die volle Wirkung dieser Dosis (etwa 0,001 g) war meist nach etwa 20 Minuten erreicht. Alsdann wurde sofort die Haut des einen Schenkels abgezogen (während das übrige Tier intakt blieb), der M. gastrocnemius unter Schonung der Blutgefäße von der Unterlage losgelöst und der betreffende Schenkel in gleicher Weise wie unter I beschrieben eingespannt. Übrigens

zeigten vergleichende Messungen, dass die Abschnürung der versorgenden Blutgefässe innerhalb der Versuchsdauer die direkte Reizempfindlichkeit des Muskels nicht beeinflusste. Die Stromzuführung geschah mittelst Pinselelektroden, die an zwei möglichst weit voneinander entfernten Stellen des Muskels (*M. gastrocnemius*) angelegt wurden. Liess man in dieser Weise den Strom längere Zeit hindurchgehen, so zeigte sich stets an seiner Ein- und Austrittsstelle eine Veränderung des Gewebes, bestehend in weisslicher Verfärbung und leichter Abhebung der äusseren Muskelhülle. Zugleich trat eine erhebliche Herabsetzung der Reizempfindlichkeit ein. Diesem Übelstand konnte leicht dadurch begegnet werden, dass die Elektroden bei jeder einzelnen Messung an eine andere Stelle des Muskels angelegt wurden. Eine etwa dadurch bedingte Verschiedenheit des Widerstandes war ja irrelevant, weil stets direkt die Stromstärke gemessen wurde. Der Muskel wurde stets gut mit physiologischer Kochsalzlösung befeuchtet gehalten. Die Versuche wurden möglichst schnell hintereinander gemacht, so dass mit einem und demselben Muskel selten länger als eine halbe Stunde experimentiert wurde. Die erste mit dem blossen Auge sichtbare Muskelzuckung galt als Indikator für die Reizschwelle. Diese Zuckung war eine kurzdauernde. Sie trat im Momente der Stromverstärkung ein, und erst mit der Stromöffnung erfolgte eine nochmalige Zuckung. Während der Dauer des Stromdurchtrittes war ein Tetanus nicht vorhanden. Diese Beobachtung stimmt mit zahlreichen älteren Angaben überein, nach denen von einer gewissen Zahl (etwa 300 pro Sekunde) der Stromstösse an aufwärts bei geringer Stromstärke kein Tetanus mehr eintritt.

Nachfolgend die Tabellen. Jede einzelne ist an einem anderen Präparat gewonnen, so dass nur innerhalb der gleichen Versuchsreihe die Einzelwerte unmittelbar vergleichbar sind.

A I.

Nr.	<i>N</i>	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
3	770	0,194	0,0700
1	1540	0,338	0,0861
4	1540	0,351	0,0895
2	3430	0,478	0,0816
2	770	0,228	0,082
4	1540	0,478	0,122
1	1650	0,440	0,108
3	3750	0,639	0,104

Nr.	N	$J \times 10^{-3}$	$C \times 10^{-4}$
3	1140	0,271	0,0806
1	1180	0,292	0,0853
4	1220	0,240	0,0686
2	3640	0,473	0,0784
5	3640	0,460	0,0763
3	810	0,110	0,0386
2	1020	0,120	0,0376
1	1760	0,150	0,0357
4	2110	0,175	0,0381
5	3640	0,232	0,0385
3	810	0,550	0,190
4	1710	0,800	0,193
2	3430	1,250	0,213
1	3640	1,230	0,204
5	3640	1,100	0,182
2	790	0,190	0,0676
3	790	0,190	0,0676
5	1460	0,220	0,0575
1	1740	0,230	0,0551
4	2180	0,360	0,0772
4	750	0,280	0,102
7	750	0,280	0,102
1	1120	0,410	0,109
6	1330	0,370	0,101
3	1740	0,510	0,122
5	2140	0,510	0,110
2	3430	0,800	0,137
8	3640	0,780	0,129

Die Versuche sind nicht alle gleich gut ausgefallen. Auch wurde eine solche Exaktheit wie bei den Versuchen an den sensiblen Nerven der Finger selten erreicht. Das liegt ja in der Natur der Sache. Der freigelegte Muskel eines curaresierten Frosches ist allen möglichen Einflüssen, die störend oder schädigend wirken, viel mehr ausgesetzt als der unter physiologischen Bedingungen untersuchte sensible Nerv der menschlichen Hand. Dennoch zeigte eine jede der oben angeführten Tabellen eine gute, manche sogar eine ausgezeichnete Übereinstimmung der Konstanten; namentlich lässt sie nirgends einen bestimmten Gang erkennen. Damit ist die Gültigkeit der Nernst'schen Formel auch für die direkte Muskelreizung erwiesen.

IV. Pflanzen.

Beliebte Objekte für Reizversuche an Pflanzen sind verschiedene Mimosenarten, die auf Reize aller Art mit einem Zusammenklappen ihrer Blätter und Stengel antworten. Wärme, Licht, Erschütterung, Chemikalien, Elektrizität vermögen diesen Effekt hervorzubringen. Allzu häufige und zu lange Applikationen dieser Reize ebenso wie ungünstige Ernährungsbedingungen vermindern die Empfindlichkeit der Pflanze oder heben gar die Reaktionserscheinungen ganz auf. Über den genaueren Vorgang, der diesen Bewegungen der „reizbaren Pflanzen“ zugrunde liegt, gehen die Meinungen noch weit auseinander. Nerven wie die Organismen der Tierwelt oder äquivalente Leitungsbahnen besitzen die Pflanzen jedenfalls nach neueren Anschauungen nicht. Vielmehr ist es wahrscheinlich, dass sich die der Bewegung zugrundeliegenden Erscheinungen langsam von Ort zu Ort fortpflanzen. Die Art der Reizleitung ist aber für unseren Fall gleichgültig. Die Bewegungserscheinungen sollten ja nur als Indikator für den stattgehabten Reiz dienen. Unsere Versuche betreffen nur die Frage der Umwandlung der elektrischen Energie am Orte der Einwirkung des Stromes. Wie für tierische Zellen, so können wir uns auch für pflanzliche Zellen mit Nernst die Einwirkung des elektrischen Stromes nur erklären durch Auslösung osmotischer Vorgänge. Der elektrische Strom muss auch in der pflanzlichen Zelle Konzentrationsveränderungen hervorbringen, die ihrerseits als Reiz wirken. Wenn diese Anschauung richtig ist, so muss auch für die Reizung sensibler Pflanzen mit Wechselströmen die Nernst'sche Formel $\frac{J}{\sqrt{N}} = C$ Geltung haben.

Obwohl ich mich der angelegentlichen Unterstützung des Herrn Prof. Berthold und des Inspektors des Göttinger botanischen Gartens, Herrn Bonstedt, zu erfreuen hatte — ich danke den genannten Herren auch an dieser Stelle aufs beste —, gelang es mir nicht, die Bedingungen des Treibhauses mit denen des notwendigen physikalischen Instrumentariums zu vereinen. Ich hatte mir im Göttinger Institut für physikalische Chemie ein kleines Treibhaus konstruiert, dem Licht, Luft, Wärme und Feuchtigkeit zugeführt wurden. Ein schönes Exemplar von *Mimosa Speggazini*, das hierin untergebracht wurde, erholte sich schon vom Transport nur unvollkommen und hatte schon in den ersten Tagen so viel von seiner

Reizbarkeit eingebüsst, dass nur die stärksten Ströme, die die Pflanze bereits zugrunde richteten, eine Bewegung der Blätter auslösten. Noch schlechter erging es mir mit einigen sehr empfindlichen jungen Exemplaren von *Mimosa pudica*, die im Institut ihre Reizbarkeit überhaupt nie wiedergewannen. Ich musste daher von der Anstellung quantitativer Versuche absehen. Denn die zur Erzeugung und Messung reiner sinusoidaler Ströme notwendigen Apparate lassen sich nicht leicht transportieren und können auch wegen ihrer hochgradigen Empfindlichkeit gegen Wärme und Feuchtigkeit der Treibhausluft nicht ausgesetzt werden. Man müsste sie schon in einem Raume ausserhalb des Treibhauses zur Aufstellung bringen, und zwei Beobachter wären zu den Versuchen notwendig.

Ich begnügte mich daher mit der Anstellung einiger qualitativer Versuche in einem Treibhaus des Göttinger botanischen Gartens. Ein gutes mittelgrosses Induktorium, das von einem Akkumulator gespeist wurde, diente zur Erzeugung des faradischen Stromes. Durch Verschiebung der Vorschaltwiderstände konnte die Stromstärke variiert werden, mit Hilfe der Schraube des Neef'schen Hammers liess sich die Häufigkeit der Stromumkehrungen einigermaassen verändern. Aus der Höhe des Tones konnte man beurteilen, ob die Schwingungen frequenter oder langsamer wurden. Die Stromzuleitung geschah durch Pinselelektroden, die unter Vermeidung mechanischer Irritation einige Zeit vor dem Versuchsbeginn an Blättchen oder Stengel der Pflanzen (jungen Exemplaren von *Mimosa pudica*) angebracht wurden.

Es zeigte sich, dass bei einer höheren Wechselfrequenz stets auch eine grössere Stromintensität nötig war, um das Zusammenklappen der Blätter herbeizuführen. Damit ist wenigstens der Beweis erbracht, dass das Verhalten der Pflanze gegen den Wechselstrom den Organen des Tierkörpers qualitativ ganz analog ist. Ob sich die Beziehung zwischen Wechselfrequenz und Stromstärke bei der Pflanzenreizung auch quantitativ im Sinne der Nernst'schen Formel regelt, muss indessen erst durch exakte Versuche erwiesen werden. Aus den erwähnten Gründen musste ich mir ihre Ausführung leider versagen.

Wenn durch die im vorstehenden beschriebenen Versuche an motorischen und sensiblen Nerven und am Muskel die von Nernst theoretisch abgeleitete Formel sich als richtig erwiesen hat, und ihre Gültigkeit auch für die Pflanzenreizung wahrscheinlich ist, so liegt die Schlussfolgerung nahe, dass ihr eine allgemeine Bedeutung zukommt. Die eingangs geäußerte Vermutung, dass die elektrische Reizung jedes protoplasmatischen Zellgewebes dem Nernst'schen Gesetz gehorcht, wird der Bewahrheitung erheblich näher gerückt. Den Physiologen interessiert dabei weniger die Formel als die Anschauung, die ihr zugrunde liegt. Die Vorstellung, dass der elektrische Strom durch Konzentrationsveränderungen in der Umgebung der reizaufnehmenden Organe reizauslösend wirkt, ist ausserordentlich klar und einfach, besonders wenn man sie mit den zahlreichen anderen Theorien vergleicht, die im Laufe der Zeit für die elektrische Reizung aufgestellt worden sind. Auch muss nochmals betont werden, dass es sich nicht um eine empirische Formel handelt, sondern dass sie auf Grund theoretischer Vorstellungen mathematisch abgeleitet wurde und nachträglich ihre experimentelle Bestätigung fand. Ich glaube daher, dass die Experimente nicht nur die Formel, sondern auch die Theorie beweisen. Gegen die Gültigkeit der Nernst'schen Formel sind bereits mehrere Autoren aufgetreten. Einthoven und Wertheim-Salomonson haben andere Formeln für die Nervenreizung mit Wechselströmen durch das Experiment zu erhärten und die Nernst'sche zu widerlegen versucht.

Zu den Versuchen der Herren Einthoven und Salomonson teilt mir Professor Nernst folgende Bemerkung mit: „Die genannten Beobachter haben offenbar den Kernpunkt meiner Theorie nicht richtig erkannt. Einthoven hat mit oszillatorischen Entladungen operiert, von denen bekannt ist, dass sie eine stark wechselnde Dämpfung besitzen und daher nicht als sinusoidal behandelt werden können. Salomonson hat mit dem singenden Lichtbogen gearbeitet, der, wie insbesondere auch neuerdings durch die Untersuchungen von H. Th. Simon (Physikal. Zeitschr. 6, Nr. 10 S. 297—319. 1905) gezeigt ist, ebenfalls nicht entfernt Sinuswellen liefert. Es ist also klar, dass die erwähnten Autoren eine zur Prüfung meiner Theorie völlig unzweckmässige Versuchsanordnung benutzt haben, und ich glaube hinzufügen zu können, dass aus dem Grunde, weil die erwähnten Autoren eben mit undefinierten Strömen gearbeitet haben, ihre Versuche überhaupt für die Frage der elektrischen

Nervenreizung bedeutungslos sind. — Übrigens gibt meine Theorie, wie ich in der Anmerkung am Schluss meiner mit Barratt ausgeführten Untersuchung angedeutet habe, einen Weg, um auch ganz beliebige Stromkurven mittelst einer Vorrichtung zu untersuchen, welche auf das gleiche Gesetz wie die Nervenreizung reagiert. Es wird nicht ohne Interesse sein, auf diesem Wege die Theorie allgemeiner zu prüfen.“

Ausser dem theoretischen Interesse hat die Nernst'sche Formel noch den Wert, dass sie es zum ersten Male ermöglicht, am lebenden Menschen die Reizschwelle sensibler Nerven in einem absoluten Werte einwandfrei anzugeben. Diese letztere Bedeutung der Formel wird vielleicht auch dem medizinischen Praktiker noch einmal Interesse abgewinnen.

Bevor ich schliesse, möchte ich Herrn Geheimrat Nernst meinen aufrichtigen Dank dafür aussprechen, dass er mich mit der vorliegenden Arbeit betraut und sie in allen Punkten durch sein Interesse und seine Unterstützung gefördert hat. Ferner habe ich dankend hervorzuheben, dass mir ohne die dauernde freundschaftliche Unterstützung der Assistenten, Herren Privatdozent Dr. Krüger in Göttingen und von Wartenberg in Berlin, die Ausführung der nicht immer ganz einfachen Messungen nicht möglich gewesen wäre.

Aus den Instituten für physikalische Chemie der Universität in Göttingen und Berlin. (Direktor: Geh. Regierungsrat Prof. Dr. W. Nernst.) Winter 1904/05 und Frühjahr 1906.

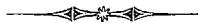


Tabelle I.
Vergleichende Antwortung der Gegenfarbe, der Kompensationsfarbe und der Kontrastfarbe für urfarbige Reize bei an Tageslicht adaptiertem Auge.

Nummer	Datum	Reizfarbe		Gegenfarbe		Kompensationsfarbe ¹⁾		Kontrastfarbe (negatives Nachbild)		Vergleich des Farbtones charakteristischer Seitenverhältnisse Kompensationsfarbe (cpb) und Kontrastfarbe (ctb)	
		A. Sub- jektiver Bilddruck	B. Objektive Zusammensetzung des Reizes	A. Sub- jektiver Ein- druck	B. Objektive Zusammensetzung des Reizes	A. Sub- jektiver Ein- druck	B. Objektive Zusammensetzung des Reizes	A. Sub- jektiver Ein- druck	B. Objektive Zusammensetzung des Reizes	A. Objektive Werte	B. Bemerkungen
I.	12. Januar 1901	Urgelb	Gr: Gr = 287 : 29 = 2,9 : 1	Urbau	B: Gr = 288 : 291 = 2,91 : 1	B: 329 Gr 74 S 46 S 41	B: 329 : 44,5 Gr 70 : 3,5 : 1 Bau	schwach rötlich Bau	B: Gr = 139 : 44,5 = 3,5 : 1	B: R = 193 : 13 = 14,8 : 1	Gr: B: Gr = 291 : 1 CpB: B: Gr = 2,9 : 1 CtB: B: R = 14,8 : 1 CpB noch Gr-haltig CtB sagt E-Addition, bzw. zunehmend röt- lich
II.	fehlt	Urgelb	Gr: Gr = 297,4 : 62,6 = 4,75 : 1	Urbau	B: Gr = 316,6 : 43,4 = 7,28 : 1	Gr 95 Gr 29 B 146 S 49	B: 311 K 22 W 72,5 S 154,5	sehr dunkel rötlich Bau	B: Gr = 300 : 0 B: Gr = 300 : 0	B: R = 111 : 22 = 5 : 1	CpB: B: Gr = 7,5 : 1 CpB B allein CtB: B: R = 5 : 1 CpB ohne Gr, Cpf sogar E-Addition, sehr deut- lich zunehmend röt- lich
III.	13. November 1900 (Beobachtung)	Urgelb	Gr: Gr = 333 : 25 = 13,4 : 1	Urbau	fehlt	B 140 Gr 65 W 60 S 29	B: 167 K 22 W 129 S 52	deutlich rötlich Bau	B: Gr = 140 : 21 = 6,67 : 1	B: Gr = 167 : 12 = 13 : 1	CpB: B: Gr = 6,6 : 1 CtB: B: Gr = 13 : 1 CpB relativ Gr-ärmer als Cpf bzw. rötlich
IV.	24. November 1900	Urgelb	Gr: Gr = 338 : 27 = 12,5 : 1	Urbau	fehlt	B 141 Gr 66 W 61 S 28	B: 178 K 23 W 129 S 28	deutlich rötlich Bau	B: Gr = 143 : 66,5 = 2,15 : 1	B: Gr = 178 : 39 = 4,56 : 1	CpB: B: Gr = 2,15 : 1 CtB: B: Gr = 4,56 : 1 CpB relativ Gr-ärmer als Cpf bzw. rötlich

V.	12. Januar 1901	Urblau	B: Gr = 298 : 92 = 2,9 : 1	Urgelb	Ge: Gr = 267 : 93 = 2,9 : 1	B 63 Gr 74 W 70 S 41	schwach rötlich Gelb	Ge: Gr = 74 : 12,8 = 5,8 : 1	deutlich rötlich Gelb	Gr 71 R 8 S 212	Ge: R = 71 : 8 = 8,9 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 5,8 : 1 Opf Ge: R = 8,9 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 5,8 : 1 Opf Ge: R = 8,9 : 1
VI.	fehlt	Urblau	B: Gr = 310,6 : 43,4 = 7,3 : 1	Urgelb	Ge: Gr = 297,4 : 62,6 = 4,7 : 1	B 46 Gr 90 W 90 S 82	schwach rötlich Gelb	Ge: Gr = 90 : 16 = 5,6 : 1	sehr deutlich Gelb	Gr 99 R 90 W 90 S 81	Ge: R = 90 : 16 = 5,6 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 5,6 : 1 Opf Ge: R = 11 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 5,6 : 1 Opf Ge: R = 11 : 1
VII. (=N.X.D. Tab. II)	22. November 1900	Urblau	B: Gr = 270 : 92 = 3 : 1	Urgelb	fehlt	B 59 Gr 89 W 89 S 44	schwach rötlich Gelb	Ge: Gr = 89 : 16 = 5,6 : 1	sehr deutlich Gelb	Gr 113 R 122 W 177 S 47	Ge: R = 113 : 22 = 5,1 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 5,1 : 1 Opf Ge: R = 5,2 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 5,1 : 1 Opf Ge: R = 5,2 : 1
VIII.	1. Dezember 1900 A. zentral [6 cm B. exzentrisch]	Urblau	B: Gr = 286 : 91 = 2,9 : 1	Urgelb	fehlt	B 168 Gr 83 W 83 S 84	schwach rötlich Gelb	Ge: Gr = 86 : 50,1 = 3,4 : 1	sehr deutlich Gelb	Gr 90 R 90 W 66 S 194	Ge: R = 90 : 10 = 9 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 9 : 1 Opf Ge: R = 9 : 1	Opf noch Gr-haltig Opf sagt R-Addition Opf Ge: R = 9 : 1 Opf Ge: R = 9 : 1
IX.	17. August 1900	Urrot	R: B = 204,4 : 55,6 = 3,67 : 1	Urgrün	Gr: B = 205 : 55 = 3,7 : 1	R 116 Gr 68 W 68 S 241	schwach bläulich Grün	Gr: B = 180 : 44 = 4,1 : 1	deutlich bläulich Grün	fehlt	fehlt	Opf relativ Gr-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf	Opf relativ Gr-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf
X.	15. Oktober 1900	Urrot	R: B = 208 : 92 [B 102 eben bläulich] [B 82 eben gelblich]	Urgrün	Gr: B = 289 : 90 = 3,2 : 1	R 50 Gr 63 W 87 S 20	schwach bläulich Grün	Gr: B = 198 : 46 = 4,3 : 1	deutlich bläulich Grün	fehlt	fehlt	Opf relativ Gr-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf	Opf relativ Gr-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf
XI.	22. November 1900	Urgrün	Gr: B = 300 : 60 = 5 : 1	Urrot	fehlt	Gr 120 R 68 W 87 S 20	schwach bläulich Rot	R: B = 68 : 61 = 1,1 : 1	deutlich bläulich Rot	fehlt	R: B = 72 : 77 = 1,1 : 1	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf
XII.	27. November 1900	Urgrün	Gr: B = 274 : 86 = 3,2 : 1	Urrot	fehlt	Gr 135 R 76 W 90 S 30	schwach bläulich Rot	R: B = 90 : 37,6 = 2,4 : 1	deutlich bläulich Rot	R 95 B 93 W 79 S 153	R: B = 95 : 33 = 2,9 : 1	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf
XIII.	17. August 1900	Urgrün	Gr: B = 205 : 55 = 3,7 : 1	Urrot	R: B = 204,4 : 55,6 = 3,67 : 1	Gr 130 R 65 W 87 S 241	schwach bläulich Rot	R: B = 115 : 32,3 = 3,6 : 1	deutlich bläulich Rot	fehlt	fehlt	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf
XIV.	15. Oktober 1900	Urgrün	Gr: B = 280 : 90 = 3,1 : 1 [B 100 eben bläulich] [B 70 eben gelblich]	Urrot	R: B = 298 : 92 = 3,2 : 1	Gr 163 R 90 W 90 S 30	schwach bläulich Rot	R: B = 90 : 40,4 = 2,2 : 1	deutlich bläulich Rot	fehlt	fehlt	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf	Opf relativ R-ärmer Opf relativ B-reicher als Opf
XV.	12. Januar 1901	Urgrün	Gr: B = 295 : 65 = 4,5 : 1	Urrot	R: B = 292 : 108 = 2,7 : 1	Gr 160 R 78 W 78 S 22	schwach bläulich Rot	R: B = 96 : 49,7 = 1,9 : 1	deutlich bläulich Rot	R 115 B 93 W 74 S 108	R: B = 115 : 68 = 1,7 : 1	Opf noch mehr Opf-R- Opf noch mehr Opf-B- Opf relativ R-ärmer als Opf relativ B-reicher als Opf	Opf noch mehr Opf-R- Opf noch mehr Opf-B- Opf relativ R-ärmer als Opf relativ B-reicher als Opf

1) Die Berechnung des Farbtonwertes bzw. des charakteristischen Sehtungsverhältnisses für die Kompositionen erfolgte nach folgender Weise: Auf Grund des für die farbige charakteristische Sehtungsverhältnis, z. B. in Nr. I, Gr: Gr = 2,9 : 1, wurde jener Gr-Sektor berechnet, welcher dem Gr-Sektor z. B. 74° in der Gleichung mit dem Gr-Grad entspricht, also 74 Gr: 4 Gr = 2,9 : 1, x = 8,3° Gr. Die Differenz des Gr-Betrages in der Gleichung und des so berechneten Gr-Sektors z. B. 70° - 29,5° = 40,5°, wird nun in Relation gesetzt zum B-Sektor in der Gleichung z. B. 70 Gr: 10 B = 7 : 1, und damit der Faktor der Kompositionen charakterisiert.

Tab. II z. Artikel: A. v. Tschernak, über das Verhalten von Gegenständen etc.

Tabelle II.

Vergleichende Auswertung der Kompressionsfarbe und der Kontrastfarbe für mischfarbige Reizlichter bei an Tageslicht adaptiertem Auge.

Nummer	Datum	Reizfarbe		Gegensfarbe		Grundergleichung des Reizes bzw. objektive Zusammensetzung des Reizes	Kompressionsfarbe		Kontrastfarbe (negatives Nachbild)			Vergleich des Perceptus aus dem charakteristischen Kompressionsverhältnis für Kompressionsfarbe (OpP) und Kontrastfarbe (ZSP)
		A.	B.	A.	B.		A.	B.	A.	B.	C.	
		Subjektiv aktiver Eindruck	Objektive Zusammensetzung des Reizes	Subjektiv aktiver Eindruck	Objektive Zusammensetzung des Reizes		Subjektiv aktiver Eindruck	Objektive Zusammensetzung des Reizes	Subjektiv aktiver Eindruck	Objektive Zusammensetzung des Reizes	Farbton bzw. dafür charakteristisches Verhältnis	
I	30. Nov. 1930											
A.	zentral	schwach rötlich Gelb	G-Scheibe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	Ge 75 Gr 77 S 43	schwach grünlich Blau	B:Gr = 165 : 177 = 2,12 : 1	Blau	B:Gr = 157 : 137 = 4,31 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 4,31 : 1
B.	6 cm exzentrisch	schwach rötlich Gelb	G-Scheibe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	Ge 75 Gr 77 S 43	schwach grünlich Blau	B:Gr = 157 : 177 = 2,17 : 1	Blau	B:Gr = 139 : 114 = 13,5 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 13,5 : 1
II	29. Nov. 1930											
A.	zentral	schwach rötlich Gelb	G-Scheibe	schwach rötlich Gelb	nicht bestimmbar	Ge 90 Gr 78 S 10	schwach grünlich Blau	B:Gr = 139 : 178 = 2,88 : 1	schwach rötlich Blau	B:Gr = 139 : 114 = 13,5 : 1		OpP relativ B-Scheibe gegenüber OpP OpP B:Gr = 2,88 : 1
B.	6 cm exzentrisch	schwach rötlich Gelb	G-Scheibe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	Ge 88 Gr 78 S 10	schwach grünlich Blau	B:Gr = 158 : 178 = 2,97 : 1	Blau	B:Gr = 139 : 114 = 13,5 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 13,5 : 1
III	24. Nov. 1930											
A.		schwach rötlich Gelb	G-Scheibe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	schwach grünlich Blau	B:Gr = 145 : 111 = 2 : 1	Blau	B:Gr = 176 : 132 = 3,4 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 3,4 : 1
B.		Urgelb	G:Gr = 238 : 27 = 12,3 : 1	Urgelb	fehlt	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	Urgelb	B:Gr = 145 : 111 = 2,18 : 1	Blau	B:Gr = 176 : 132 = 3,4 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 3,4 : 1
C.		zunehmend grünlich Gelb	Ge 300 Gr 60	zunehmend rötlich Blau	nicht bestimmbar	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 145 : 174 = 2,49 : 1	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 152 : 134 = 5,85 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 5,85 : 1
D.		zunehmend grünlich Gelb	Ge 270 Gr 90	zunehmend rötlich Blau	nicht bestimmbar	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 145 : 174 = 2,49 : 1	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 152 : 134 = 5,85 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 5,85 : 1
E.		zunehmend grünlich Gelb	Ge 240 Gr 120	zunehmend rötlich Blau	nicht bestimmbar	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 145 : 174 = 2,49 : 1	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 152 : 134 = 5,85 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 5,85 : 1
F.		zunehmend grünlich Gelb	Ge 210 Gr 150	zunehmend rötlich Blau	nicht bestimmbar	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 145 : 174 = 2,49 : 1	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 152 : 134 = 5,85 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 5,85 : 1
G.		zunehmend grünlich Gelb	Ge 180 Gr 180	zunehmend rötlich Blau	nicht bestimmbar	B 145 Ge 68 Gr 71 S 23	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 145 : 174 = 2,49 : 1	zunehmend rötlich Blau	B:Gr = 152 : 134 = 5,85 : 1		OpP relativ Gr-ärmer als OpP OpP B:Gr = 5,85 : 1

IV.	11. August 1900	schwach rötlich Gelb	G-Schiebe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	Ge 95,5 B 100 Gr 109,5 S 109,5 W 110	B:Gr = 128,5 : 56,5 = 2,24 : 1	rötlich Blau	B 100 R 6 S 226 W 28	B:R = 100 : 6 = 16,7 : 1	OpF B:Gr = 2,24 : 1 OpF B:R = 16,7 : 1 OpF sogar R-Addition erfordernd gegenüber OpF	
V.	4. Juli 1900	schwach rötlich Gelb	G-Schiebe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	Ge 109 B 139 Gr 22 S 70	B:Gr = 139 : 22 = 7,23 : 1	rötlich Blau	B 320 R 22,5 S 17,5	B:R = 320 : 22,5 = 14,2 : 1	OpF B:Gr = 7,23 : 1 OpF B:R = 14,2 : 1 OpF sogar R-Addition erfordernd gegenüber OpF	
VI.	5. Juli 1900	schwach rötlich Gelb	G-Schiebe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	Ge 95,5 B 131 Gr 12 S 109,5	B:Gr = 121 : 12 = 10,1 : 1	rötlich Blau	B 302 R 47 S 11	B:R = 302 : 47 [42 etwas zu wenig] [52 zu viel R]	OpF B:Gr = 10,1 : 1 OpF B:R = 6,4 : 1 OpF sogar R-Addition erfordernd gegenüber OpF	
VII.	8. Juli 1900	schwach rötlich Gelb	G-Schiebe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	fehlt	fehlt	rötlich Blau	B 301 R 59	B:R = 301 : 59 [64 oben zu viel R]	OpF B:R = 5,1 : 1 OpF sogar R-Addition erfordernd gegenüber OpF	
VIII.	13. November 1900 (Beobachtung)	schwach rötlich Gelb	G-Schiebe	schwach grünlich Blau	nicht bestimmbar	B 140 Gr 88 S 69 W 69	B:Gr = 140 : 88 = 9,2 : 1	schwach rötlich Blau	B 240 Gr 9 W 111	B:Gr = 240 : 9 = 26,7 : 1	OpF B:Gr = 9,2 : 1 OpF B:R = 26,7 : 1 OpF Gr-kürzer, Brecher als OpF	
IX.	30. November 1900 zentral	schwach rötlich Blau	B-Schiebe	schwach grünlich Gelb	nicht bestimmbar	R 168 Ge 75 B 75 S 45	Ge:Gr = 75 : 77 = 0,97 : 1	rötlich Gelb	Ge 81 R 30 S 235	Ge:R = 81 : 10 = 8,1 : 1	OpF Ge:Gr = 0,97 : 1 OpF Ge:R = 8,1 : 1 OpF sogar R-Addition erfordernd gegenüber OpF	
B.	6 cm exzentrisch	schwach rötlich Blau	B-Schiebe	schwach grünlich Gelb	nicht bestimmbar	Ge 107 B 107 Gr 77 S 41	Ge:Gr = 75 : 77 = 0,97 : 1	schwach rötlich Gelb	Ge 110 W 40 S 210	Ge-Schiebe allein	OpF Ge:Gr = 0,97 : 1 OpF Ge allein	OpF relativ Gr-ärmer als OpF
X.	22. November 1900 (Beobachtung)	schwach rötlich Blau	390 B B-Schiebe allein	schwach grünlich Gelb	nicht bestimmbar	R 165 Ge 80 B 80 Gr 71 W 44	Ge:Gr = 80 : 71 = 1,1 : 1	schwach rötlich Gelb	Ge 144 Gr 19 W 138 S 39	Ge:Gr = 144 : 19 = 7,6 : 1	OpF Ge:Gr = 1,1 : 1 OpF Ge:R = 7,6 : 1 OpF relativ Gr-ärmer als OpF	
B.		schwach rötlich Blau	390 B + 30 Gr	schwach grünlich Gelb	nicht bestimmbar	R 165 Ge 80 B 80 Gr 71 W 44	Ge:Gr = 80 : 56 = 1,43 : 1	schwach rötlich Gelb	Ge 148 Gr 15 W 154 S 50	Ge:Gr = 148 : 13 = 11 : 1	OpF Ge:Gr = 1,43 : 1 OpF Ge:R = 11 : 1 OpF relativ Gr-ärmer als OpF	
C.		schwach rötlich Blau	390 B + 60 Gr	schwach grünlich Gelb	nicht bestimmbar	R 165 Ge 80 B 80 Gr 71 W 44	Ge:Gr = 80 : 38 = 2,1 : 1	deutlich rötlich Gelb	Ge 135 R 17 S 41	Ge:R = 135 : 9 = 15 : 1	OpF Ge:Gr = 2,1 : 1 OpF Ge:R = 15 : 1 OpF bereits R-Addition erfordernd gegenüber OpF	
D. (= N. VII auf Tab. I)		Urban	B:Gr = 920 : 90 = 10,2 : 1	Urban	fehlt	R 165 Ge 80 Gr 71 W 44	Ge:Gr = 80 : 16 = 5 : 1	deutlich rötlich Gelb	Ge 114 R 22 W 177 S 47	Ge:R = 114 : 22 = 5,2 : 1	OpF Ge:Gr = 5 : 1 OpF Ge:R = 5,2 : 1 OpF bereits R-Addition erfordernd gegenüber OpF	

Tabelle IIa m. Artikel: A. v. Tschernak, Über das Vorkommen der Gucklars etc.

Tabelle II (Fortsetzung).

Nummer	Datum	Reizfarbe		Gegenfarbe		Komplementärfarbe		Kontrastfarbe (negatives Nachbild)			Vergleich des Farbetones bzw. des charakteristischen Sättigungsverhältnisses für Komplementärfarbe (Opf) und Kontrastfarbe (Chf)	
		A. Subjektiver Eindruck	B. Objektive Zusammensetzung des Reizlichtes	A. Subjektiver Eindruck	B. Objektive Zusammensetzung des Gegenlichtes	A. Subjektiver Eindruck	B. Objektive Zusammensetzung des Gegenlichtes	A. Subjektive Zunahme des damit verbundenen Sättigungsverhältnisses des Lichtes	B. Objektive Zunahme des damit verbundenen Sättigungsverhältnisses des Lichtes	C. Partikulation bzw. dafür charakteristisches Sättigungsverhältnis		
N. P.	22. November 1900	zunehmend grünlich-blau	240 B. + 120 Gr	abnehmend rötlich-gelb	nicht bestimmbar	zunehmend gelblicher Gelb	165 B. 80 Gr 71 W 44	zunehmend gelblicher Gelb	Ge 95 W 72 S 46	Ge: R = 95 : 42 W: R = 243 : 1	Chf Ge: R = 236 : 1	
F.		zunehmend grünlich-blau	910 B. + 140 Gr	abnehmend rötlich-gelb	nicht bestimmbar	zunehmend gelblicher Gelb	165 B. 80 Gr 71 W 44	zunehmend gelblicher Gelb	Ge 71 W 59 S 39	Ge: R = 71 : 59 W: R = 12 : 1	Chf Ge: R = 12 : 1	
G.		Blaugrün	150 B. + 180 Gr	Gelbrot	nicht bestimmbar	Gelbrot	165 B. 80 Gr 71 W 44	Gelbrot	Ge 45 W 74 S 35	Ge: R = 45 : 74 W: R = 1 : 1,64	Chf Ge: R = 1 : 1,64	
IL.		Blaugrün	150 B. + 210 Gr	Gelbrot	nicht bestimmbar	Gelbrot	165 B. 80 Gr 71 W 44	Gelbrot	Ge 10 W 91 S 50	Ge: R = 10 : 91 W: R = 1 : 9,1	Chf Ge: R = 1 : 9,1	
J.		bläulich-Grün	140 B. + 230 Gr	abnehmend gelblich-Rot	nicht bestimmbar	abnehmend gelblich-Rot	120 B. 68 Gr 85 W 87	abnehmend gelblich-Rot	R 43 W 93 S 49	B: R = 43 : 93 W: R = 1 : 7,13	Opf R-reicher, Barmer als Chf Chf B: R = 1 : 7,9 Chf B: R = 1 : 7,15	
K.		bläulich-Grün	120 B. + 230 Gr	abnehmend gelblich-Rot	nicht bestimmbar	abnehmend gelblich-Rot	120 B. 68 Gr 85 W 87	abnehmend gelblich-Rot	R 39 W 90 S 53	B: R = 39 : 90 W: R = 1 : 5,9	Opf B-reicher, Barmer als Chf Chf B: R = 1 : 5,95 Chf B: R = 1 : 5,9	
L.		bläulich-Grün	100 B. + 240 Gr	abnehmend gelblich-Rot	nicht bestimmbar	abnehmend gelblich-Rot	120 B. 68 Gr 85 W 87	abnehmend gelblich-Rot	R 23 W 92 S 51	B: R = 23 : 92 W: R = 1 : 5,14	Opf B-reicher, Barmer als Chf Chf B: R = 1 : 5,22 Chf B: R = 1 : 5,14	
M.		bläulich-Grün	110 B. + 250 Gr	abnehmend gelblich-Rot	nicht bestimmbar	abnehmend gelblich-Rot	120 B. 68 Gr 85 W 87	abnehmend gelblich-Rot	R 20 W 91 S 52	B: R = 20 : 91 W: R = 1 : 4,55	Opf B-reicher, Barmer als Chf Chf B: R = 1 : 4,69 Chf B: R = 1 : 4,74	

O. (= N. XI auf Tab. I)		40 B + 270 Gr	bläulich Grün	nicht bestimmbar	Gr 120 R 85 W 87	grün bläulich Rot	B: R = 45 : 68 = 1 : 1,51	grün bläulich Rot	D 55 R 194 W 38	B: R = 55 : 70 = 1 : 1,26	Opf. Reicher, B-amer als Opf.
P.		60 B + 280 Gr B: Gr = 1 : 5	Urgrün	fehlt	Gr 120 R 85 W 87	grün bläulich Rot	B: R = 61 : 68 = 1 : 1,1	deutsch bläulich Rot	R 77 W 174 S 37	B: R = 77 : 72 = 1,07 : 1	Opf. Reicher, B-amer als Opf.
R.		30 B + 380 Gr	zunehmend gelblich Grün	nicht bestimmbar	Gr 120 R 68 W 87	schwach bläulich Rot	B: R = 74,1 : 68 = 1,09 : 1	sehr deutsch bläulich Rot	R 96 R 70 S 42	B: R = 96 : 70 = 1,37 : 1	Opf. Reicher, B-amer als Opf.
R. (= N. XXVII auf Tab. II)		300 Gr Gr: Scheibe allein	zunehmend gelblich Grün	nicht bestimmbar	Gr 120 R 68 W 87	schwach bläulich Rot	B: R = 85 : 68 = 1,26 : 1	Blaurot	R 100 W 141 S 41	B: R = 100 : 69 = 1,45 : 1	Opf. Reicher, B-amer als Opf.
XI.	8. Juli 1900	R-Scheibe d. h. N. 134 S 144	schwach gelblich Blau	nicht bestimmbar	fehlt	schwach gelblich Gelb	fehlt	deutsch gelblich Gelb	Gr 298 R 79 S 33	Gr: R = 298 : 79 = 3,74 : 1	Opf. R-Addition er- fordernd
XII.	11. August 1900	R-Scheibe	schwach rötlich Blau	nicht bestimmbar	R 120,5 Gr 66,5 W 95,5 S 103,5	schwach grünlich Gelb	Gr: Gr = 66,5 : 56,5 = 1,18 : 1	deutsch rötlich Gelb	Gr 56,5 R 51 S 84,5 S 124	Gr: R = 56,5 : 51 = 1,1 : 1	Opf. R-Addition gegen- über Opf. erforderlich
XIII.	2. Juli 1900	R-Scheibe besonderer Art (Papierpapier)	schwach grünlich Gelb	nicht bestimmbar	R 122 Gr 66 S 18	Gelb	Gr: Scheibe allein besonderer Art (Papierpapier)	deutsch rötlich Gelb	Gr 232 R 112 S 16	Gr: R = 232 : 112 = 2,07 : 1	Opf. R-Addition gegen- über Opf. erforderlich
XIV.	13. November 1900 (andere Beobachtung)	D-Scheibe	schwach rötlich Blau	nicht bestimmbar	R 138 Gr 70 W 46	schwach grünlich Gelb	Gr: Gr = 58 : 70 = 1,22 : 1	schwach rötlich Gelb	Gr 138 R 56 W 151	Gr: R = 138 : 56 = 2,46 : 1	Opf. relativ Gr-amer als Opf.
XV.	26. November 1900 (andere Beobachtung)	B-Scheibe	schwach gelblich Blau	nicht bestimmbar	R 138 Gr 74 S 55	schwach grünlich Gelb	Gr: Gr = 73 : 74 = 1 : 1	deutsch gelblich Gelb	Gr 66 R 56 W 88 S 172	Gr: R = 66 : 56 = 1,18 : 1	Opf. gegen R-Addition erfordernd
XVI.	9. Februar 1901	R-Scheibe	schwach rötlich Blau	nicht bestimmbar	B 174 Gr 91 W 82 W 7	schwach grünlich Gelb	Gr: Gr = 91 : 88 = 1,03 : 1	schwach rötlich Gelb	Gr 128 R 52 S 119	Gr: R = 128 : 52 = 2,46 : 1	Opf. relativ Gr-amer als Opf.
XVII. A.	10. November 1900 zentral	R-Scheibe	schwach gelblich Rot	nicht bestimmbar	R 80 Gr 72 W 59	schwach bläulich Grün	Gr: R = 172 : 80 = 2,15 : 1	deutsch bläulich Grün	Gr 115 R 45 W 102	Gr: R = 115 : 45 = 2,56 : 1	Opf. relativ B-reicher als Opf.
B	6 cm exzentrisch	R-Scheibe	schwach gelblich Rot	nicht bestimmbar	R 68 Gr 65 B 96	schwach bläulich Grün	Gr: R = 106 : 65 = 1,63 : 1	deutsch bläulich Grün	Gr 115 R 56 W 29 S 77	Gr: R = 115 : 56 = 2,05 : 1	Opf. relativ B-reicher als Opf.
XVIII. A.	28. November 1900 zentral	R-Scheibe	schwach gelblich Rot	nicht bestimmbar	R 84 Gr 64 B 70 W 39 S 94	schwach bläulich Grün	Gr: R = 113 : 70 = 1,61 : 1	deutsch bläulich Grün	Gr 125 R 60 W 82 S 55	Gr: R = 125 : 60 = 2,08 : 1	Opf. relativ B-reicher als Opf.
B.	6 cm exzentrisch	R-Scheibe	schwach gelblich Rot	nicht bestimmbar	R 84 Gr 64 B 70 W 39 S 94	schwach bläulich Grün	Gr: R = 113 : 70 = 1,61 : 1	deutsch bläulich Grün	Gr 125 R 60 W 82 S 55	Gr: R = 125 : 60 = 2,08 : 1	Opf. relativ B-reicher als Opf.

Tabelle IIb zu Artikel A. v. Trautmann, über das Verhältnis der Helligkeit etc.

Tabelle II (Fortsetzung).

Nummer	Datum	Beirfarbe		Gegentfarbe		Grundgleichung mit dem Grunde	Komplementärfarbe		Kontrastfarbe (negatives Nachbild)		Vergleich des Farbtonen charakteristischen Sektorenverhältnisses für Komplementärfarbe (QpF) und Kontrastfarbe (QpF)	
		A.	B.	A.	B.		A.	B.	A.	B.		
		Subjektiv Eindr.	Objektiv Zusammensetzung des gegenständig erscheinenden Lichtes	Subjektiv Eindr.	Objektiv Zusammensetzung des gegenständig erscheinenden Lichtes	bezw. objektiv Zns.	Subjektiv Eindr.	Objektiv Zusammensetzung des gegenständig erscheinenden Lichtes	Subjektiv Eindr.	Objektiv Zusammensetzung des gegenständig erscheinenden Lichtes	A.	B.
XIX A.	26. November 1900	schwach gelblich Rot.	R-Scheibe	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 100 G 125 B 58	schwach bläulich Grün	Gr: B = 175 : 85 = 2,06 : 1	Gr 124 B 126 W 45 S 102	Gr: B = 124 : 90 = 1,37 : 1	QpF Gr: B = 2,06 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
B.	6 cm exzentrisch	schwach gelblich Rot	R-Scheibe	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 98 G 108 B 54	schwach bläulich Grün	Gr: B = 168 : 94 = 1,79 : 1	Gr 126 B 126 W 45 S 102	Gr: B = 126 : 90 = 1,40 : 1	QpF Gr: B = 1,79 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
XX	8. Juli 1900	schwach gelblich Rot	R-Scheibe [d. h. R 127 W 112 S 112]	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 100 G 125 B 58	schwach bläulich Grün	Gr: B = 175 : 85 = 2,06 : 1	Gr 124 B 126 W 45 S 102	Gr: B = 124 : 90 = 1,37 : 1	QpF Gr: B = 2,06 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
XXI	11. August 1900	schwach gelblich Rot	R-Scheibe	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 100 G 125 B 58	schwach bläulich Grün	Gr: B = 175 : 85 = 2,06 : 1	Gr 124 B 126 W 45 S 102	Gr: B = 124 : 90 = 1,37 : 1	QpF Gr: B = 2,06 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
XXII	13. November 1900 (unklare Beobachtung)	schwach gelblich Rot	R-Scheibe	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 72 G 104 B 57 W 47 S 17	schwach bläulich Grün	Gr: B = 134 : 70 = 1,91 : 1	Gr 188 B 107 W 115 S 152	Gr: B = 188 : 107 = 1,76 : 1	QpF Gr: B = 1,91 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
XXIII	26. November 1900 (unklare Beobachtung)	schwach gelblich Rot	R-Scheibe	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 86 G 106 B 53 W 43 S 86	schwach bläulich Grün	Gr: B = 136 : 69 = 2,26 : 1	Gr 145 B 95 W 45 S 102	Gr: B = 145 : 90 = 1,61 : 1	QpF Gr: B = 2,26 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
XXIV A.	9. Februar 1900	schwach gelblich Rot	300 R	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 85 G 105 B 72 W 12 S 41	schwach bläulich Grün	Gr: B = 147 : 72 = 2,04 : 1	Gr 151 B 95 W 49 S 104	Gr: B = 151 : 76 = 1,97 : 1	QpF Gr: B = 2,04 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
B.		schwach gelblich Rot	300 R	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 85 G 105 B 72 W 12 S 41	schwach bläulich Grün	Gr: B = 147 : 72 = 2,04 : 1	Gr 151 B 95 W 49 S 104	Gr: B = 151 : 76 = 1,97 : 1	QpF Gr: B = 2,04 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF
C.		schwach gelblich Rot	300 R	schwach bläulich Grün	nicht bestimmbar	R 85 G 105 B 72 W 12 S 41	schwach bläulich Grün	Gr: B = 147 : 72 = 2,04 : 1	Gr 151 B 95 W 49 S 104	Gr: B = 151 : 76 = 1,97 : 1	QpF Gr: B = 2,04 : 1 als QpF	QpF relativ B-reicher als QpF

XXV A.	30. November 1900 zentral	schwach gelblich Gru	Gr-Scheibe	schwach bläulich Rot	nicht bestimmbar	R 99 Gr 172 B 59	R: B = 69 : 89 1,11 : 1	deutlich bläulich Rot	R 77 W 57 S 153	R: B = 77 : 78 1,06 : 1	CpF R: B = 1,11 : 1 CpF R: B = 1,05 : 1 als Cyp	CpF relativ B-reicher als Cyp
B.	6 cm exzentrisch	schwach gelblich Gru	Gr-Scheibe	schwach bläulich Rot	nicht bestimmbar	R 99 Gr 166 B 95	R: B = 99 : 95 1,04 : 1	deutlich bläulich Rot	R 76 W 97 S 142	R: B = 76 : 97 1 : 1,28	CpF R: B = 1 : 1,28 als Cyp	CpF relativ B-reicher als Cyp
XXVI	29. November 1900 6 cm exzentrisch	schwach gelblich Gru	Gr-Scheibe	schwach bläulich Rot	nicht bestimmbar	R 98 Gr 168 B 94	R: B = 98 : 94 1,04 : 1	deutlich bläulich Rot	R 90 W 107 S 120	R: B = 90 : 107 1 : 1,19	CpF R: B = 1,04 : 1 CpF R: B = 1 : 1,10 als Cyp	CpF relativ B-reicher als Cyp
XXVII	8. Juli 1900	schwach gelblich Gru	Gr-Scheibe [d. h. Gr 177 W 103 S 113]	schwach bläulich Rot	nicht bestimmbar	R 106 Gr 144 W 103 S 53	R: B = 106 : 137 1,28 : 1	deutlich bläulich Rot	R 220 W 145 S 150 deutlich mit bläulichem Schattenschein	R: B = 220 : 140 1,57 : 1	CpF R: B = 1,58 : 1 CpF R: B = 1,57 : 1 als Cyp	CpF relativ B-reicher als Cyp
XXVIII	22. November 1900	schwach gelblich Gru	Gr-Scheibe	schwach bläulich Rot	nicht bestimmbar	R 68 Gr 120 W 87	R: B = 68 : 85 1,25 : 1	sehr deutlich bläulich Rot	R 69 W 109 S 141	R: B = 69 : 109 1 : 1,58	CpF R: B = 1 : 1,25 CpF R: B = 1 : 1,28 als Cyp	CpF relativ B-reicher als Cyp

Tabelle III.
Vergleichende Auswertung der Gegenfarbe, der Kompensationsfarbe und der Kontrastfarbe für unfarbige Reize bei für Gelblichgrün adaptiertem Auge.

Nummer	Datum	Reize		Gegenfarbe		Grau- gleichung mit dem Geräte	Kompensationsfarbe		Kontrastfarbe (gegenges. Neutralität)		Vergleich des Farbtonen bzw. der charakteristischen Schatteneinheiten für Gegenfarbe (GF), Kompensationsfarbe (CpF) und Kontrastfarbe (CtF)	
		A.	B.	A.	B.		A.	B.	A.	B.		
		Sub- jektiver Licht- druck	Objektive Zusammensetzung des Reizlichen des Reizlichen	Sub- jektiver Licht- druck	Objektive Zusammensetzung des gegenwärtig erreichbaren Lichtes		Sub- jektiver Licht- druck	Farbton bzw. d. d. h. charakteristisches Schatteneinheits	Sub- jektiver Licht- druck	Objektive Zusammensetzung des damit gleichberechtigten Lichtes		
I	30. April 1901	Urblau	B: Gr = 319 : 48 6,5 : 1	Urgelb	Gr: Gr = 293 : 97 = 2,7 : 1	fehlt	fehlt	fehlt	grünlich Gelb	Gr 85 Gr 74 W 98 S 106	CpF Gr: Gr = 2,7 : 1 CpF Gr: Gr = 1,15 : 1	CpF relativ Gr-reicher als GF
II	27. März 1901	Urblau	B: Gr = 293 : 25 13,4 : 1	Urgelb	fehlt	R 114 Gr 45 Gr 47 W 154	schwach gelblich	Gr: Gr = 45 : 39,5 1,17 : 1	grünlich Gelb	Gr 105 Gr 105 W 94 S 68	CpF Gr: Gr = 1,17 : 1 CpF Gr: Gr = 1 : 1 als Cyp	CpF relativ Gr-reicher als Cyp

Tabelle IIc und IIIc zu Artikel: A. v. Ferkelmak. Über das Verhalten der Gegenfarbe etc.