

Aufstellung der Theorie der elektromotorischen Kraft, so wurde die Thermodynamik durch Aufstellung des dritten Hauptsatzes zu einer auch für den praktischen Chemiker unentbehrlichen Disziplin. Denn es läßt sich jetzt, wenn auch nur näherungsweise, jedes chemische Gleichgewicht aus Wärmetönung und chemischer Konstante vorausberechnen.

Diese erfolgreiche und erfolgversprechende Tätigkeit wurde 1914 durch den Ausbruch des Weltkrieges jäh unterbrochen. Die Schüler, In- und Ausländer, die soeben noch friedlich zusammen gearbeitet hatten, eilten zu den Waffen und standen sich bald zum Teil feindlich gegenüber. Auch Nernst stellte sich der Heeresverwaltung zur Verfügung und wurde, nachdem er kurze Zeit als Automobilfahrer tätig war, mit kriegschemischen Arbeiten betraut. Der Erfolg und die Bedeutung derselben geht wohl am besten daraus hervor, daß sein Name an erster Stelle unter denen stand, deren Auslieferung das feindliche Ausland verlangte. Daneben aber fand er immer noch Muße zu wissenschaftlicher Konzentration, und so schrieb er „in Zeiten von Trübsal und Not“, wie er selbst im Vorwort 1917 sagt, „Die theoretischen und experimentellen Grundlagen des neuen Wärmesatzes“.

Nach dem Kriege wandte er sich wieder rein wissenschaftlichen Arbeiten zu. Er nahm jetzt das Studium photochemischer Erscheinungen auf, und unter seiner Leitung wurden Arbeiten ausgeführt, welche bewiesen, daß der Primärvorgang photochemischer Prozesse dem Einsteinischen Gesetz entsprechend die quantenmäßige Energieaufnahme ist. Außerdem wandte er seine Aufmerksamkeit mehr und mehr kosmischen Fragen zu, worüber an anderer Stelle ausführlich berichtet wird.

Im Jahre 1922 übernahm Nernst als Nachfolger Emil Warburgs das Präsidium der Physikalisch-technischen Reichsanstalt, das er nur zwei Jahre lang inne hatte. Er hat in dieser schwersten Zeit der Geldentwertung sich mit Erfolg bemüht, die nötigen Mittel zu schaffen, um die wissenschaftlichen Arbeiten dieser Anstalt ungestört weiterzuführen. Auch gelang es ihm, die Vereinigung der Phys.-Techn. Reichsanstalt und der Reichsanstalt für Maß und Gewicht durchzusetzen. Für eigene experimentelle und theoretische Tätigkeit blieb ihm dabei nur wenig Zeit. Nernst schätzt seiner ganzen Veranlagung nach die Tätigkeit des Forschers und Lehrers höher als die des Verwaltungsbeamten. Er zog es daher vor, zu Ostern dieses Jahres den durch den Tod von Heinrich Rubens frei gewordenen Lehrstuhl für Physik an der Universität Berlin zu übernehmen.

Die Bedeutung Nernsts für die Entwicklung der Chemie darf nicht nur nach dem beurteilt werden, was in seinem Institut geleistet wurde, sie erstreckt sich noch wesentlich weiter dadurch, daß Nernst, wie selten einer, es verstand, wissenschaftliche Schule zu machen, und daß der Einfluß seines Wirkens sich auch in den späteren Arbeiten seiner Schüler zeigte. Nicht nur viele von denen, welche heute in Deutschland in Wissenschaft und Technik an ersten Stellen stehen, haben ihre Ausbildung durch Nernst erhalten, auch sehr viele der ersten Chemiker und Physiker des Auslandes bezeichnen sich mit Stolz als Nernstschüler.

Schon als junger Dozent — mit 25 Jahren schuf er die Theorie der elektromotorischen Kraft — hat Nernst sich Weltruf erworben. Aber es folgten nicht, wie bei so vielen anderen, denen auch ein großer Wurf gelang, Jahre des Schweigens. Mit sicherem Blick erkannte er, welche Probleme mit den jeweils der Forschung zur Verfügung stehenden Mitteln lösbar seien und ging dann mit rastloser Energie an ihre Bewältigung. So reihte er eine wissenschaftliche Großtat an die andere und hat bis in

die letzten Jahre hinein eine seltene Produktivität bewiesen.

So ziemlich alle Ehrenbezeugungen, welche wissenschaftlichen Größen seines Ranges erteilt zu werden pflegen, hat er erhalten. Er ist Ehrendoktor aller Fakultäten und Mitglied aller bekannten Gesellschaften der Wissenschaften außer denen des feindlichen Auslandes, aus deren Liste er zu Kriegsbeginn gestrichen wurde. Er war Rektor der Universität Berlin, ist Ritter des Ordens Pour le Mérite, Nobelpreisträger usw.

Äußere Ehrungen werden ihm zu seinem 60. Geburtstage kaum mehr geboten werden können. Aber was wir ihm bieten können und wollen, ist der herzlichste Glückwunsch und Dank seiner Freunde und Schüler, aller Fachgenossen in Chemie und Physik und der Ungezählten, die aus dem Aufblühen dieser beiden Wissenschaften und ihrer Technik Nutzen gezogen haben. Das neue Arbeitsgebiet, dem sich der Jubilar jetzt zuwendet, wird neue Aufgaben stellen. Wir wünschen Nernst, daß er sie mit gleichem Erfolg lösen möge wie alle früheren und dadurch die Welt im kommenden Dezenium seines Lebens mit neuen Gedanken beschenke und der Wissenschaft neue Wege weise.

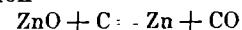
[A. 111.]

Der Mechanismus der hüttenmännischen Zinkgewinnung.

Von MAX BODENSTEIN.

Nach Versuchen von Dr.-Ing. P. Windelband.

Vor einigen Jahren habe ich gemeinsam mit Friedrich Schubart¹⁾ über Versuche berichtet, welche das Gleichgewicht der in der Zinkmuffel sich abspielenden Reaktion

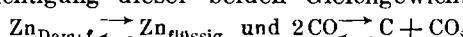


zum Gegenstand hatten. Wir hatten dabei gefunden, daß das System $\text{ZnO} + \text{C}$ in der Muffel weit über die Temperatur erhitzt werden muß, wo der Druck der Gase $\text{Zn} + \text{CO}$ im Gleichgewicht eine Atmosphäre erreicht, daß also zugunsten einer flotten Reaktionsgeschwindigkeit die Gleichgewichtsbedingungen weit überschritten werden müssen.

Das Gleichgewicht ließ sich beobachten in Versuchen, in denen bei tagelang festgehaltenen Temperaturen der Druck der entwickelten Gase verfolgt wurde, und hier zeigte sich, daß der Druck einer Atmosphäre bei etwa 770° schon erreicht wird — während die Temperatur der flotten Reduktion je nach der Kohlesorte zwischen 1030 und 1080° liegt.

Bei dieser niedrigen Temperatur ist aber auch das ganze Gleichgewichtssystem ein anderes geworden: Es tritt neben dem dampfförmigen auch flüssiges Zink auf, und das Kohlendioxyd, das bei den hohen Temperaturen im Gleichgewicht über Kohlenstoff völlig zurücktrat, hat hier erhebliche Konzentrationen angenommen.

Eine genaue Durchrechnung der Beobachtungen mit Berücksichtigung dieser beiden Gleichgewichte



haben wir damals noch nicht vorgenommen, weil für diese letzteren neue experimentelle Bestimmungen in Aussicht standen. Diese liegen zwar jetzt vor²⁾, aber die genannte Durchrechnung mag trotzdem noch zurückstehen, weil seitens des Herrn Dipl.-Ing. Theiß in Hannover noch eine Untersuchung im Gange ist, um die Messungen von Schubart, die ja nur wenig zahlreich sind, zu vertiefen.

¹⁾ Z. Elektroch. 23, 105 [1917]; Metall u. Erz 14, 177 [1917].

²⁾ Insbesondere Braune, Z. anorg. Ch. 111, 109 [1920] (Dampfdrucke des Zinks).

Diese Untersuchungen haben unser Interesse an der Frage geweckt, auf welchem Wege sich denn die Umsetzung vollzieht. Ihre Teilnehmer sind beide fest, und, wenn auch nicht ganz ohne Einschränkung, gilt immerhin das „corpora non agunt nisi fluida“, so daß es mindestens nicht fernlag, einen anderen, als den direkten Weg zu suchen, auf dem sich die Reduktion des Zinkoxyds abspielen könnte.

So habe ich Dr.-Ing. Winkelbahn veranlaßt, eine Reihe Versuche in dieser Angelegenheit anzustellen, und möchte über ihr Ergebnis kurz berichten.

Die Frage ist verständlicherweise nicht neu. Eine gute Zusammenstellung der einschlägigen Literatur findet sich in dem eben im Erscheinen begriffenen ersten Band Zink des neuen Gmelin, Handbuch der anorganischen Chemie³⁾, in dessen Korrekturen Prof. R. J. Meyer mich freundlich Einsicht nehmen ließ, wofür ihm auch hier herzlich gedankt sei. Nach den dort gesammelten Veröffentlichungen ist jetzt noch eine neue erschienen⁴⁾.

Die in diesen Arbeiten diskutierten Möglichkeiten des Reaktionsweges sind die folgenden:

1. Festes Zinkoxyd und feste Kohle reagieren direkt miteinander, also $ZnO + C \rightarrow Zn + CO$.

2. Die gleiche Reaktion findet statt, aber indem das Zinkoxyd dampfförmig zur Kohle gelangt; H₂ und CO befördern den Transport des ZnO, ohne selbst zu reduzieren.

3. Ebenso, nur findet nicht eine Verflüchtigung unzersetzen Zinkoxyds statt, sondern dieses dissoziert.

4. Ebenso, nur wird die Kohle als ein Suboxyd (aus C + CO entstanden) verflüchtigt.

5. Ebenso; aber der Transport der Kohle vollzieht sich durch Bildung und Spaltung von Kohlenoxyd, letzteres nach $2CO \rightarrow C + CO_2$.

6. Kohlenoxyd wirkt reduzierend — $ZnO + CO \rightarrow Zn + CO_2$ — und wird seinerseits wieder von der Kohle reduziert — $CO_2 + C \rightarrow 2CO$.

7. Hierzu haben wir noch eine weitere Möglichkeit ins Auge gefaßt: Wasserstoff reduziert, und der Wasserdampf wird wieder durch die Kohle reduziert.

Die Auswahl ist, wie man sieht, ziemlich groß. Die Gründe, die für die einzelnen Möglichkeiten ins Feld geführt werden, sind zum Teil ernstere, zum Teil solche, die an sich völlig unwahrscheinlich sind, oder sich bei einer Nachprüfung als Irrtum erweisen. Eine recht gute Übersicht findet sich bei Lemarchand⁵⁾ der dann auch viel Eigenes bringt, auf das ich unten noch eingehen muß.

Unser Gedankengang und unsere Versuche waren etwa die folgenden:

Daß festes Zink und feste Kohle miteinander so schnell reagieren sollten, wie sich in der Muffel die Umsetzung vollzieht, ist sehr unwahrscheinlich: Die Geschwindigkeit von Diffusion in festen Stoffen ist auch bei 1000° sehr klein, zudem die Berührung von Kohle und Erz eine mäßige und sicher schnell unterbrochene, sobald aus den unmittelbar einander berührenden Teilen das Zinkoxyd durch Reduktion ausgewaschen ist, und die Verunreinigungen von Kohle und Erz den Kontakt übernehmen.

Für Reaktion der festen Stoffe spricht allerdings ein Versuch, der einmal auf der Wilhelminenhütte O.-S. ge-

macht wurde⁶⁾. Erz und Kohle wurden nicht gemischt chargiert, sondern lagenweise, die Lagen durch Kalkstücke getrennt. Der Erfolg war ein sehr bescheidenes Ausbringen. Aber ein solcher nur unter den Bedingungen des technischen Ofens angestellter Versuch scheint nicht sehr beweisend. Wir haben daher selbst einen ähnlichen gemacht — nur in umgekehrter Richtung.

Zinkoxyd und Graphit wurden einmal lose gemischt, das andere Mal im Mörser miteinander feinst zerrieben und unter 400 Atm. zu Pastillen gepreßt, was natürlich bei der „Schmier“-Fähigkeit des Graphits eine außerordentlich innige Berührung liefert. Bei Eisenoxydul hatte eine solche Behandlung die Reduktion sehr gefördert⁷⁾. Bei unseren Versuchen wurden die Proben in einem evakuierten Apparat auf 800° erhitzt und die Druckzunahme gemessen; sie verlief völlig parallel; z. B. wurde gemessen nach 50 Stunden:

Lose Mischung 163,6 mm
Gepreßte Pastillen 161,1 mm.

Der Versuch ließ uns schließen, daß eine direkte Reaktion der festen Stoffe nicht stattthat. Der Unterschied gegen das Verhalten des Eisenoxyduls ist verständlich: Eisen bleibt in der Mischung und vermittelt durch Lösen des Kohlenstoffs die weitere Umsetzung, Zink nicht.

Der Gedanke an die Möglichkeit 7 — Wirkung des Wasserdampfes, der an Kohle reduziert wird und dann als Wasserstoff das Zinkoxyd reduziert — war uns nahegelegt worden durch Beobachtungen bei den erwähnten Versuchen von Schubart: Es schien hier, als werde die Reaktion durch intensive Trocknung — die natürlich immer noch lange nicht an die Trocknungsgrade von Baker heranreichte — gehemmt. Daß eine solche Reaktionsfolge möglich ist, ist außer Zweifel; Wasserstoff reduziert nach Beobachtungen vieler Forscher Zinkoxyd bei den in Betracht kommenden Temperaturen leicht.

Wir haben eine Reihe von Versuchen gemacht, um zu prüfen, ob feuchte Mischungen von Zinkoxyd und Holzkohle, oder von Zinkoxyd und Graphit schneller reagieren als scharf getrocknete. Die Beobachtungen wurden teils so ausgeführt wie die oben beschriebenen, teils in der Weise, daß die Proben in einem durch konstanten Strom mit immer gleicher Geschwindigkeit angeheizten elektrischen Röhrenofen erhitzt wurden, und die Gasentwicklung ständig beobachtet wurde. Über diese Versuchsanordnung wird weiter unten noch etwas ausführlicher zu sprechen sein. Hier ist nur zu sagen, daß irgendein Unterschied zwischen „trockenen“ und „feuchten Versuchen“ nicht gefunden wurde.

Die Möglichkeit 7 ist daher als Hauptweg der Umsetzung ausgeschlossen.

Überblicken wir kurz die anderen:

2. Flüchtigkeit von Zinkoxyd ist nachgewiesen worden von Doeltz und Graumann⁸⁾. Aber sie ist bei 1300° noch sehr bescheiden (in offenen Schiffchen in zwei Stunden 1,1% Verlust!), sie kann daher ernstlich weder für sich, noch im Verein mit befördernden Gasströmen von Kohlenoxyd, Wasserstoff usw., für die flotte Reaktion bei 1000—1100° verantwortlich gemacht werden.

Zudem ist nachgewiesen⁹⁾, daß auch an Kieselsäure gebundenes Zinkoxyd (Willemit), das ganz gewiß nicht merklich flüchtig ist, wenn auch etwas schwierig, so doch

³⁾ Siehe R. J. Meyer, Z. ang. Ch. 37, 177 [1924].

⁴⁾ A. d'Hooghe, Acad. Roy. de Belgique, Cl. des sciences (5) 9, 232 [1923].

⁵⁾ Revue de Metallurgie 17, Memoires 803 [1920].

⁶⁾ Ich entnehme das der Arbeit von Lemarchand nach einem Zitat aus Ingalls, Metallurgy of Zinc.

⁷⁾ Falche, Z. Elektroch. 21, 37 [1915].

⁸⁾ Metallurgie 3, 212 [1906].

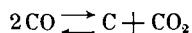
⁹⁾ Liebig, Zink und Kadmium, Leipzig 1913, S. 381.

selbst bei 3 mm Korngröße vollkommen reduziert wird. Die Verflüchtigung des Zinkoxyds kann daher keine irgend nennenswerte Rolle spielen. Die ausgiebigen Rechnungen, die L e m a r e h a n d s (l. c.) der Diffusionsgeschwindigkeit widmet, sind völlig gegenstandslos.

3. Die Dissoziation des Zinkoxyds — das dabei natürlich dampfförmiges Zink und Sauerstoff liefern würde —. Für sie plädiert insbesondere d' H o o g h e in der obenerwähnten Arbeit. Da will er sie nachgewiesen haben durch die Tatsache, daß ein in der Nähe von erhitztem Zinkoxyd befindliches Stück Platin angegriffen wird, und zwar ein wenig stärker, wenn im Stickstoffstrom als wenn im Sauerstoffstrom erhitzt wurde. Das würde allenfalls eine ganz minimale Dissoziation voraussetzen, zumal ja das Zink durch Legierung mit dem Platin in seiner Reaktionsfähigkeit außerordentlich herabgedrückt wäre; aber eine irgend erhebliche Dissoziation beweist das nicht, und eine solche ist nach dem N e r n s t s c h e n Wärmesatz ganz ausgeschlossen, der bei einer Bildungswärme des Zinkoxyds (fest) von 85,4 Cal für 1023° einen Druck der Dissoziationsprodukte von 10⁻⁷ Atmosphären liefert.

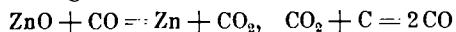
4. Die Annahme einer Verflüchtigung der Kohle als Suboxyd hängt völlig in der Luft.

5. Die durch Bildung und Zersetzung von Kohlenoxyd kann auch in irgend nennenswertem Umfange nicht in Frage kommen, weil das Gleichgewicht



schon bei 1000° praktisch ganz auf der CO-Seite liegt, also die Kohlenoxydspaltung, an sich bekanntlich durch Zinkoxyd wie durch andere Oxyde lebhaft katalysiert, keinen irgend nennenswerten Umfang annehmen kann.

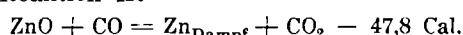
6. So bleibt die Reduktion durch das Kohlenoxyd und dessen Regeneration durch die Kohle:



Gegen diese Folge ist nichts einzuwenden, und ich glaube zeigen zu können, daß sie den Tatsachen durchaus gerecht wird.

Daß zunächst Kohlenoxyd Zinkoxyd reduzieren kann, ist experimentell nachgewiesen, und läßt sich wieder mit dem N e r n s t s c h e n Wärmesatz zeigen.

Die Reaktion ist



Das liefert nach der Näherungsgleichung

$$\log \frac{P_{\text{Zn}} \cdot P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}} = - \frac{47800}{4.571 T} + 1.75 \log T + 1.5 + 3.2 - 3.5$$

und das gibt für 1023° (1300° abs.) den Wert 0,59—2. Daraus berechnet sich, daß 17% Kohlenoxyd, 17% Zinkdampf und 66% Kohlenoxyd miteinander im Gleichgewicht sind, daß also bis zu dieser Zusammensetzung des Gasgemisches das Kohlenoxyd reduzierend wirken kann.

Also diese Reduktion muß leicht möglich sein, und in der Tat konnten D o e l t z und G r a u m a n n¹⁰⁾ bei einstündigem Erhitzen im Kohlenoxydstrom an einem Zinkoxydschiffchen folgende Gewichtsverluste beobachten:

bei 600° 0,8%
700° 14%
800° 60%

während bei 900° alles Zinkoxyd reduziert war.

Die Reaktionsgeschwindigkeit ist danach schon bei 600—900° recht erheblich und steigt stark mit der Tem-

¹⁰⁾ Metallurgie 4, 292 [1907]. Neben älteren Autoren hat insbesondere neuerdings d' H o o g h e (l. c.) die Reduzierbarkeit von ZnO durch CO gezeigt, dabei auf Fehler hinweisend, die in früheren Arbeiten gemacht sind.

peratur; es muß sich daher bei den Muffeltemperaturen von mindestens 1000—1100° die Umsetzung zwischen Zinkoxyd und Kohlenoxyd sehr flott vollziehen.

Es müßte danach als Zwischenprodukt des Gesamtvorgangs Kohlensäure auftreten. Tatsächlich geben alle Analysen der Muffelgase etwas Kohlensäure, und zwar Gehalte, die in den normalen Stadien des Prozesses zwischen etwa 0,5 und wenig über 1% liegen. Das entspricht nahezu dem Gleichgewicht der Reaktion $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$, das bei 1000° etwa 0,5% CO₂ verlangt. Woher immer das Kohlendioxyd stammen mag, ob aus der Reaktion, ob aus dem Carbonatgehalt des Erzes (der oft im Anfang des Abtreibens höhere Kohlensäuregehalte liefert), ob aus den von außen eingedrungenen Heizgasen des Ofens, aber anderseits auch aus dem Zerfall des Kohlenoxyds nach $2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}$: immer müßte der Gehalt den Beobachtungen entsprechen, wenn das Gleichgewicht eingestellt ist, und aus diesen Zahlen kann man für oder gegen ein intermediäres Auftreten der Kohlensäure beim normalen Gang der Entzinkung nichts schließen.

Nun haben aber B o d e n s t e i n und S c h u b a r t (l. c.) auch wesentlich größere Kohlensäuregehalte in ihren Reaktionsgasen gefunden, und zwar waren die um so höher, je schneller das Gas entwich; bei Versuchen unter verminderter Druck stiegen sie bis 18%. Das letztere ist ein Gehalt, der gerade noch mit dem nach dem N e r n s t s c h e n Wärmesatz oben berechneten verträglich ist (da der Zinkdampf ausgeschieden ist, so liefert das Gas von 17% CO₂ 17% Zinkdampf 66% CO 20,1% CO₂). Diese Beobachtungen sprachen doch sehr dafür, daß das primäre Produkt der Umsetzung Kohlendioxyd ist, das nachher wieder zu Kohlenmonoxyd reduziert wird, aber bei schneller Wegführung „gerettet“ werden kann.

Und da nach den Beobachtungen von D o e l t z und G r a u m a n n die Geschwindigkeit der Umsetzung zwischen Zinkoxyd und Kohlenoxyd recht groß ist, so muß der zweite Teil, die Reduktion der Kohlensäure, einen erheblichen Einfluß auf die Gesamtgeschwindigkeit des Prozesses haben.

Nun ist die Temperatur der flotten Reduktion des Zinkoxyds abhängig von der Art der verwendeten Kohle. Schon J o h n s o n¹¹⁾ hatte gefunden, daß die Reduktion mit Holzkohle bei 1022° statt hat, die mit Koks bei 1029° und die mit Graphit bei 1088°. Auch von der Reduktion der Kohlensäure ist anzunehmen, daß sie von den verschiedenen Kohlesorten verschieden schnell ausgeführt werden wird, und wenn zwischen beiden Reaktionsgeschwindigkeiten ein Parallelismus besteht, so ist mindestens außerordentlich wahrscheinlich, daß beiden der gleiche Vorgang zugrunde liegt.

In diesem Sinne haben wir in einer größeren Reihe von Versuchen die Geschwindigkeit der beiden Reaktionen miteinander verglichen.

Für die der Reduktion der Kohlensäure geschah das in der Weise, daß ein senkrecht stehendes Porzellanrohr von etwa 25 mm lichter Weite und 80 cm Länge, dessen unterster Teil von 15 cm durch einen Füllkörper von Quarzglas eingenommen war, beschickt wurde mit gemahlener Kohle von definierter Korngröße — zwischen 2 und 3 mm —. Dann wurde es im mittleren Teil in einem elektrischen Ofen erhitzt, während ein mäßiger Strom von Kohlensäure hindurchstrich, dessen Geschwindigkeit an einem Strömungsmanometer abgelesen und auf Konstanz eingereguliert wurde. Der Kohlenoxyd-

¹¹⁾ Electrochemical Industry 2, 185 [1904].

gehalt hinter dem Kohlerohr wurde erstmalig nach einer Stunde in entnommener Probe dadurch bestimmt, daß die Kohlensäure mit Kalilauge absorbiert wurde.

Dabei wurde der Gasrest als Kohlenoxyd in Rechnung gesetzt; nicht ganz streng, insofern ja aus den verschiedenen Kohlesorten durch geringe Nachverkokung auch andere in Kalilauge nicht absorbierbare Gase entwickelt werden konnten, als auch ein Feuchtigkeitsgehalt der Kohlen durch Wassergasbildung hier als „Kohlenoxyd“ mit gemessen wurde und als ebenso ein Stickstoffgehalt der Kohlensäure die Resultate täuschen würde.

Aber das Verfahren wäre auch mit allen Kautelen nur von bescheidener Präzision¹²⁾: die Kohle verbrennt allmählich, dadurch verringert sich ihre Oberfläche, und so sind von hier aus noch mehr Fehlermöglichkeiten gegeben. Aber all diese kann man einigermaßen ausschließen, wenn man sich auf den Vergleich solcher Versuche beschränkt, bei denen nur die Kohlesorte variiert wird und alles übrige konstant bleibt. Dabei zeigte sich dann, daß Parallelversuche recht befriedigend übereinstimmten, während die drei Kohlesorten sehr große Unterschiede aufwiesen.

Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung der Versuche:
1. Versuchsreihe, mit frischem Material.

Temperatur Grad C	Holzkohle % CO	Steinkohlenkoks % CO	Graphit % CO
700	69,0	18,5	3,6
800	87,0	68,1	7,7
900	—	95,4	15,1
1000	—	96,2	87,0

2. Versuchsreihe, mit demselben aber schon einmal benutztem Material.

700	—	9,4	—
800	—	47,8	4,5
900	—	—	22,7
1000	—	—	95,8

Daraus ergibt sich ganz zweifellos eine erhebliche Verringerung der Reduktionsfähigkeit, wenn man von der Holzkohle zum Steinkohlenkoks und zum Graphit übergeht.

Um nun die analogen Beobachtungen am Gesamtprozeß der Zinkmuffel anzustellen, wurden zunächst einige „thermische Analysen“ ausgeführt in der Weise, wie Bodenstein und Schubart (l. c.) verfahren waren, und wie das auch Mühlhäuser¹³⁾ an der Muffel des technischen Ofens ausgeführt hat: der Moment des Einsetzens der stark endothermen Reaktion läßt sich an einer Verzögerung der Anheizgeschwindigkeit erkennen, wenigstens wenn die Reaktion einigermaßen geschwindig abläuft. Das gab für Holzkohle und Steinkohlenkoks Temperaturen von 972 und 1095°, die indes nicht ganz streng vergleichbar sind, weil beim Steinkohlenkoks, um überhaupt das Nachbleiben des Temperaturanstiegs deutlich werden zu lassen, merklich langsamer angeheizt werden mußte.

In völlig einwandfreier Weise zeigte sich dann aber die verschiedene Reaktionsgeschwindigkeit in einer Reihe von Versuchen, die in der Weise ausgeführt wurden, daß zwei Schiffchen mit Zinkoxyd und zwei verschiedenen Kohlen ganz gleichmäßig angeheizt wurden und dabei an beiden die Umsetzung verfolgt wurde. Das geschah in folgender Weise:

¹²⁾ Versuche, bei konstantem Volum durch Beobachtung der Druckvermehrung die Reduktion der Kohlensäure durch Kohle zu verfolgen, scheiterten an der nebenher laufenden Aufnahme derselben durch den Ätzkalk der Asche.

¹³⁾ Metall u. Erz 17, 209 [1920].

In einen langen Heraeus-Ofen wurden von beiden Seiten glasierte Porzellanröhre, 24 mm lichte Weite, 100 cm lang, eingeführt, deren im Ofen befindliche Enden geschlossen waren. In jedes kam ans geschlossene Ende ein großes Graphitschiffchen mit 8 g Zinkoxyd und 4 g Kohle, in das linke von der einen, in das rechte von der anderen Sorte. Die Röhre wurden in dem weiten Ofenrohr leicht geneigt angebracht, so daß das sich kondensierende Zink nach außen abfloss. Als Wärmeverrichtung für die Kondensation war dann noch über jedes Rohr ein 25 cm langer mit Eisendraht gewickelter Röhrenofen geschoben.

Durch Einregulieren der beiden Ströme dieser „Vorlagen“ konnte erreicht werden, daß die Temperaturverteilung im Hauptofen eine völlig symmetrische war. Das wurde vor den eigentlichen Versuchen kontrolliert durch drei Thermoelemente, von denen eins außerhalb der

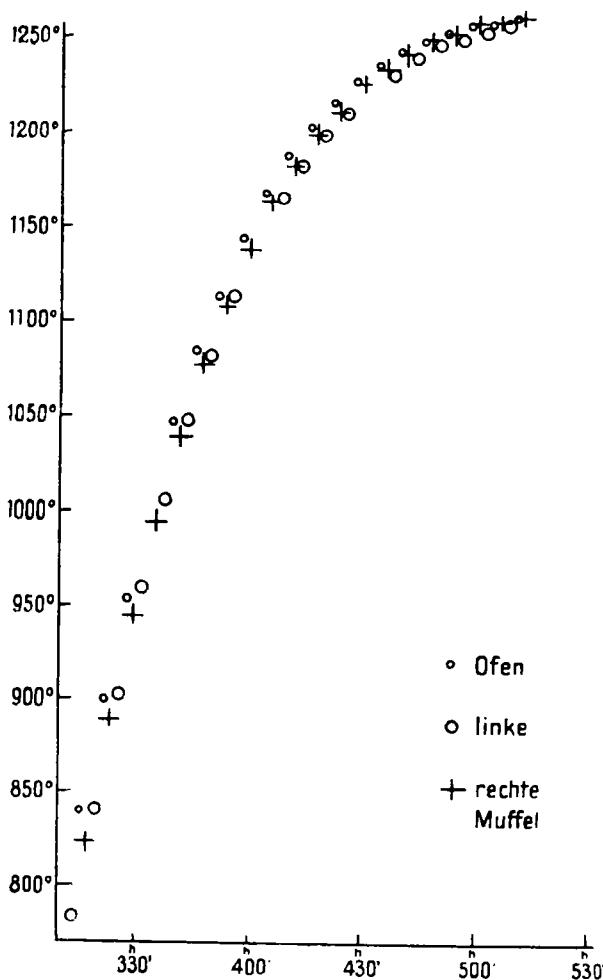


Fig. 1

„Muffeln“ in der Ofenmitte lag, die anderen beiden in den für diesen Versuch mit Sand gefüllten Graphitschiffchen; natürlich waren die drei Thermoelemente geeicht.

Wurde jetzt der Ofen mit konstanter Stromstärke angeheizt, so hinkten die beiden Schiffchentemperaturen natürlich der Ofentemperatur etwas nach, aber beide in gleicher Weise. Diese Eichkurve des Ofens zeigt Figur 1; sie läßt erkennen, daß mindestens bis 1100° die beiden Muffeltemperaturen identisch sind — und höhere Temperaturen kamen bei den eigentlichen Messungen nicht vor.

So konnten die beiden Beschickungen völlig gleichmäßig angeheizt werden; um die eintretende Umsetzung zu verfolgen, wurden die austretenden Gase gemessen,

die — natürlich vom Zinkdampf durch Kondensation befreit — praktisch nur noch aus Kohlenoxyd bestanden. Die Messung geschah durch Einlassen der Gase in wasser gefüllte Flaschen, aus denen das entsprechende Wasservolum in Meßzylinder lief. Der Auslauf des Wassers vollzog sich dabei durch einen Schlauch, dessen Endstück immer auf eine solche Höhe eingestellt wurde, daß das Gas, an einem wasser gefüllten U-Rohr gemessen, denselben Druck hatte, wie die äußere Atmosphäre.

Um hierbei ganz sicher zu gehen, wurden alle Versuche doppelt ausgeführt, indem die einzelnen Kohlemischungen ihre Plätze vertauschten (1. linke Muffel Holzkohle, rechte Steinkohle, 2. linke Muffel Steinkohle, rechte Holzkohle).

Figur 2 gibt ein Beispiel eines solchen Versuchs. Man erkennt die natürlich gleichmäßig steigende Ofen temperatur, man sieht, wie beide Beschickungen bei mäßiger Temperatur etwas Wasserdampf entwickeln — dessen Kondensation gelegentlich nachher wieder einen kleinen Rückgang des Gasvolums hervorrief —, man kann eine leichte Nachverkokung, bei der Holzkohle zwischen 65 und 90 Minuten beobachten, und man sieht dann den

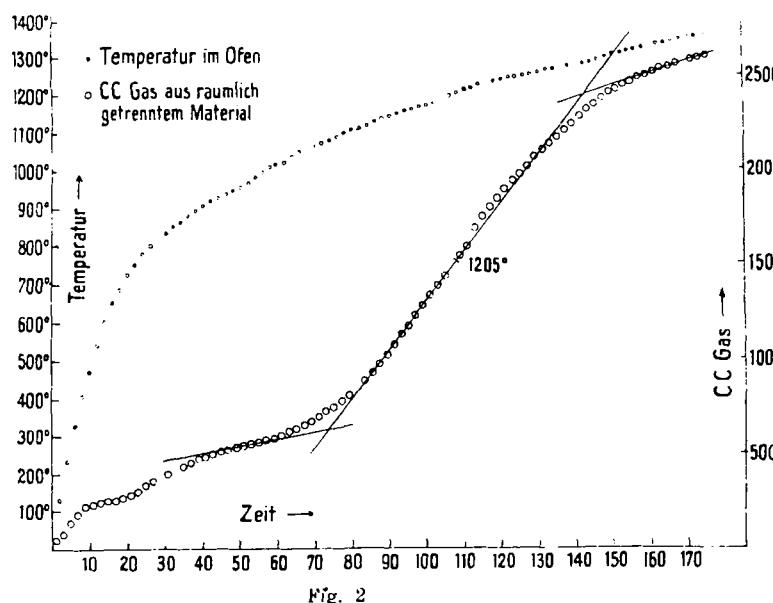


Fig. 2

plötzlich starken Anstieg des Volums, der nach mäßiger Zeit wieder einer ganz bescheidenen Zunahme Platz macht. Der mittleren Zeit dieses Anstiegs entspricht eine Ofentemperatur, die für unsere Vergleichszwecke als Reaktionstemperatur bezeichnet wurde, obschon sie höher liegt als die wahre Temperatur der Schiffchen, die nicht nur wegen des nicht unendlich schnellen Temperaturausgleichs (Eichkurve, Fig. 1), sondern auch wegen des Wärmeverbrauchs der Reaktion hinter jener recht erheblich zurückbleibt.

Derartige Versuchspaare sind im ganzen sieben ausgeführt worden. Ihr Ergebnis zeigt Tabelle 2.

Die Holzkohle war eine bei 1100° ausgeglühte Holzkohle von 86 % C, die Steinkohle ein äußerst gasarmer belgischer Anthrazit, der Steinkohlenkoks irgend welcher, zufällig vorhandener.

Der Unterschied der beiden Kohlensorten ist also sehr erheblich. Natürlich hat er nur auf die Reaktionstemperatur einen Einfluß; die gewonnenen Zinkreguli entsprachen immer der um den Zinkstaub verminderten Menge des als Oxyd angewandten — immer ganz nahe an 90 % —, und die Räumasche in den Schiffchen war immer völlig entzinkt.

Tabelle 2

Versuch	Kohlensorte	Platz	Reduktions temperaturen	Temperaturdifferenz
30	Holzkohle	links	1065	70
	Anthrazit	rechts	1135	
31	Holzkohle	links	1053	77
	Anthrazit	rechts	1130	
32	Holzkohle	links	1065	65
	Steinkohlenkoks	rechts	1130	
33	Holzkohle	links	1075	80
	Steinkohlenkoks	rechts	1155	
34	Holzkohle	links	1055	75
	Anthrazit	rechts	1130	
35	Holzkohle	links	1055	72
	Anthrazit	rechts	1127	
36	Holzkohle	links	1060	60
	Anthrazit	rechts	1120	
Mittel	Holzkohle		1061	75
	Anthrazit		1136	

Versuche mit Graphit in dieser Art sind leider nicht gemacht worden — eine Lücke in unserer „Beweisführung“ entsteht dadurch freilich nicht.

Wenn nun, wie nach obigem sicher erscheint, das Kohlenoxyd es ist, das das Zinkoxyd reduziert, um nachher seinerseits wieder von der Kohle reduziert zu werden, so muß es auch möglich sein, die Reduktion so auszuführen, daß Zinkoxyd und Kohle einander gar nicht direkt berühren. Das ließ sich leicht in unserem Ofen versuchen, indem in ein Porzellanrohr ein Schiffchen mit Kohle und eins mit Zinkoxyd eingeführt wurde. Das war, um jede Berührung etwa durch Überkriechen mit der Schiffchensubstanz verschlackten Zinkoxyds zu vermeiden, so auszuführen, daß beide Schiffchen hintereinander eingeschoben wurden, wobei freilich lange Gaswege zwischen den beiden Reaktionen in Kauf genommen werden mußten.

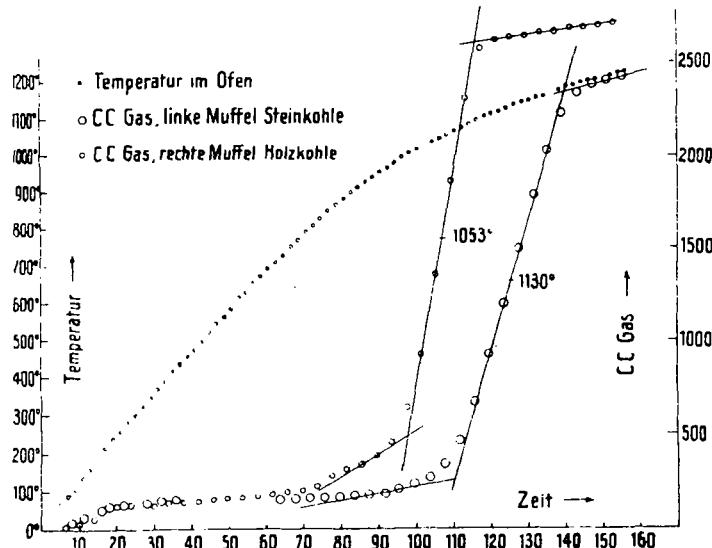


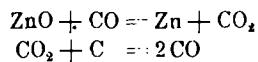
Fig. 3

Den Erfolg eines solchen Versuchs zeigt Figur 3. Die Reaktionstemperatur (1205°) ist erheblich verschoben — kein Wunder bei den langen Gaswegen —

aber die Reaktion hat sich im übrigen völlig normal vollzogen; ein Parallelversuch ergab ein ähnliches Resultat, 1210°. Die Ausbeute war bei beiden Versuchen nicht vollkommen, es fehlten etwa 20 % am Gas und am Zink statt wie oben 10 %, entsprechend dem Teil des Oxyds, das vom Schiffchen verschlackt und dadurch natürlich schwerer zugänglich geworden war.

Das Resultat dieses Versuchs scheint im Widerspruch zu stehen mit dem oben (Seite 440) erwähnten, wonach in der Wilhelminenhütte eine Muffel mit schichtweiser Chargierung von Erz und Kohle eine minimale Ausbeute ergab. Aber der Widerspruch ist scheinbar. Die Zinkhütte arbeitet 20 Stunden, danach wird geräumt und neu beschickt, und was bis dahin nicht fertig ist, ist eben verloren. Nun läuft natürlich jeder Zinkofen so, daß in normalem Betriebe die Muffeln (und ihr Inhalt, was bei der schlechten Wärmebewegung im Innern gar nicht dasselbe ist) gerade warm genug werden, um 90 % des Zinks abzutreiben, und wenn eine, wie das nach unseren Versuchen für diese Versuchsmuffel natürlich auch der Fall gewesen sein muß, langsamer arbeitet, so kommt sie eben nicht mit. Und daß sie langsamer arbeiten muß, ist bei den längeren Gaswegen ganz natürlich, und so beweist dieser Versuch gar nichts, er ist mit untauglichen Mitteln ausgeführt worden.

Ich komme damit zum Schluß, daß die Reaktionsfolge



den Vorgang in der Zinkmuffel wiedergibt. Gewiß können dabei in bescheidenem Maße andere Prozesse verlaufen, der analog mit Wasserstoff als Reduktionsmittel in dem Umfange als Wasserdampf vorhanden ist oder aus den Ofengasen eindringt, eine Verdampfung des Zinkoxyds und eine Reaktion dampfförmigen Zinkoxyds mit der Kohle, endlich der der direkten Umsetzung der beiden festen Reaktionsteilnehmer.

Aber alle diese Prozesse treten im Ausmaß völlig zurück gegen jenen, er ist der, der praktisch allein erfolgt.

Es ist nicht möglich und nicht nötig, diese Auffassung, die natürlich durchaus nicht neu ist, zu verteidigen gegen alle anderen Ansichten, die im Laufe der Jahre in älteren Arbeiten vorgebracht worden sind; nur gegen eine neuere Arbeit möchte ich mich wenden, die in ganz bestimmter Weise erklärt, daß dieser Bruchteil des Zinkoxyds durch Kohlenoxyd, jener durch festen Kohlenstoff reduziert werde.

Das ist die schon mehrfach genannte Untersuchung von L e m a r c h a n d s. Seine Versuchsanordnung ist folgende. Er erhitzt in einer Atmosphäre von „reinem“ getrockneten Stickstoff ein Schiffchen mit gewogenen Mengen von Zinkoxyd und Kohle, fängt die entstandene Kohlensäure in Kalilauge auf, oxydiert durch Kupferoxyd das hindurchgegangene Kohlenoxyd und wägt nun dies als Kohlensäure in Kalilauge. Eine Wägung des Schiffchens nach der Abkühlung ergibt den Verlust an $\text{ZnO} + \text{C}$, eine weitere Wägung nach Verbrennung der Kohle die im Schiffchen zurückgeblieben gewesene Kohle.

Zählung der Blasen während der Anheizung gibt ihm in jedem Augenblick ein Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit, und die graphische Vereinigung von Zeit, Temperatur und Blasenzahl liefert ganz ähnliche Kurven wie unsere Versuche, die freilich recht unregelmäßig sind und meist weit vor der Reaktion sonderbar große Gasentwicklungen aufweisen.

Zu unserer Frage erklärt er zunächst: da die Reaktion auch im Stickstoff stattfindet, so muß festes Zinkoxyd mit fester Kohle reagieren können — sonst kann nämlich zunächst gar kein Kohlenoxyd auftreten, und die Sache kann nicht losgehen. Das ist an sich richtig; aber es ist so gut wie unmöglich, Kohle in irgendeiner Atmosphäre auf 1000° zu erhitzen, ohne daß sich eine Spur Kohlenoxyd bildet, und jede Spur des Gases würde ja autokatalytisch unsere Reaktionsfolge auslösen. Jedenfalls fehlen in der Arbeit alle Kautelen, die hierfür nötig wären.

Weiter glaubt nun der Verfasser, aus seinen Versuchen direkt ableiten zu können, welcher Anteil des Kohlenstoffs Zinkoxyd reduziert hat in Form von C, welcher in Form von CO, und dies auf folgende Weise:

Die Wägungen seines Schiffchens geben das verschwundene Zinkoxyd und den verschwundenen Kohlenstoff¹⁴⁾, und zwar ist für 1 Mol Zinkoxyd verschwunden:

Versuch Nr.	3	4	5	6	7	8	9
Grammatome C	0,756	0,915	0,625	0,416	0,619	0,602	0,694
Dazu erklärt der Verfasser, daß diese Anteile als Kohlenstoff, ihre Ergänzungen zu 1 als Kohlenoxyd reduziert hätten — also: „Das Zinkoxyd wird gleichzeitig von Kohlenstoff und Kohlenoxyd reduziert“.							

So bestimmt diese Angabe ist, so muß ich gestehen, daß es mir nicht gelungen ist, zu ermitteln, was der Verfasser eigentlich damit meint. Ich kann nur finden, daß seine Zahlen Unmögliches aussagen.

Im krassesten Versuch 6 haben 0,416 Grammatome C 1 Mol ZnO reduziert — und diese Zahlen stimmen zu den mitgeteilten unmittelbaren Wägungsergebnissen. Das ist nur möglich, wenn der Kohlenstoff dabei in ein höheres Oxyd als CO₂ übergeht, denn die Reaktion 2 ZnO + C = 2 Zn + CO₂ verlangt immerhin 0,5 Grammatome C auf 1 Mol ZnO. Wie also jene 0,416 Grammatome ausreichen sollen, ist vollkommen unverständlich.

Aber auch die Verwendung der anderen Zahlen ist nicht richtig. Denn die angegebenen Zahlen können doch nur aussagen, daß gewisse Mengen Kohlenstoff bis CO, gewisse bis CO₂ reduziert haben müssen. Diese ergeben sich bei richtiger Rechnung:

Versuch Nr.	3	4	5	6	7	8	9
CO	0,512	0,830	0,250	—	0,238	0,204	0,388
CO ₂	0,488	0,170	0,750	>1,0	0,762	0,796	0,612

Versuch 4 müßte daher einen Kohlensäuregehalt des Gases liefern, der allenfalls bei plötzlichster Entfernung des Gases denkbar wäre, alle andern völlig unmögliche, Versuch 6 gar ein weit über 100%iges Kohlendioxyd. Und trotzdem die aus dem Reaktionsgas erhaltenen Mengen Kohlensäure im Verhältnis zum Kohlenoxyd durchweg auffallend hoch sind, so erreichen sie doch längst nicht diese Beträge. Die Daten sind:

Versuch Nr.	3	4	5	6	7	8	9
CO ₂ aus CO ₂	—	0,062	0,0689	0,0365	0,0333	0,024	0,0164 g
CO ₂ aus CO	—	0,2561	0,1984	0,1475	0,2226	0,6792	0,2036 g
% CO ₂	—	19,5	25,8	19,5	13,0	23,3	7,4

Auch diese Zahlen sind unmöglich hoch, zumal nach etwaigen rückläufigen Vorgängen bei der Abkühlung.

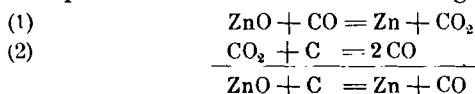
¹⁴⁾ Zu diesem Verhältnis ist zu bemerken, daß es 1 Grammatom Kohlenstoff auf 1 Mol Zinkoxyd sein muß; denn die Reaktionssumme ist immer $\text{ZnO} + \text{C} \rightleftharpoons \text{Zn} + \text{CO}$ (außer in den Seite 440 erwähnten Fällen, wo durch besonders geschwunde Entfernung des Gases etwas mehr als das übliche Prozent Kohlensäure abgesaugt werden konnte). Also auch bei dem Verhältnis 1:1 kann die ganze Reduktion durch CO erfolgt sein, so gut wie sie ganz durch festen Kohlenstoff stattgefunden haben kann.

Aus alledem folgt, daß in diesen Versuchen von Lemarchands irgendwelche ganz grobe Fehlerquellen stecken, jedenfalls, daß sie in keiner Weise irgend etwas beitragen zu unserer Frage.

Ich bedaure, daß ich dieser Richtigstellung so viel Raum widmen mußte. Aber die Arbeit von Lemarchands ist natürlich bereits in die Sammelliteratur übergegangen, und bei der Bestimmtheit, mit der diese Behauptungen aufgestellt sind, ist es nicht jedermanns Sache, ihre Unsinnigkeit zu erkennen.

Eine Zusammenfassung des Vorstehenden ergibt folgendes:

Die Reduktion des Zinkerzes in der Muffel vollzieht sich praktisch ausschließlich nach folgenden Reaktionen:



Der Beweis liegt in der nachgewiesenen erheblichen Geschwindigkeit von 1, in der Tatsache, daß für 2 wie für den Gesamtprozeß die Geschwindigkeit mit der Kohlesorte (Holzkohle, Steinkohlenkoks) sich in gleicher Weise ändert, und in der Tatsache, daß auch vom Zinkoxyd räumlich getrennte Kohle reduzierend wirkt, mit einer bescheidenen Verzögerung, die den verlängerten Gaswegen zugeschrieben werden kann.

Die anderen in Betracht gezogenen Reaktionswege werden ablehnend diskutiert und zum Teil durch neue Versuche als nicht in Betracht kommend nachgewiesen.

Die sehr bestimmt ausgesprochene Behauptung von Lemarchands, daß ein gewisser Teil Kohle bei seinen Versuchen als C, ein anderer als CO reduziert habe, beruht auf Versuchen, die weder an sich richtig sein können, noch richtig gedeutet sind.

Die Arbeit wurde im elektrochemischen Institut der Technischen Hochschule Hannover von Ostern 1920 bis Winter 1922 ausgeführt.

Herrn Dr.-Ing. Windelband danke ich auch an dieser Stelle für seine verständnisvolle und ausdauernde Mitarbeit.

Berlin, Physikalisch-chemisches Institut der Universität.
[A. 82.]

Die Entwicklung der elektrischen Lichtquellen seit der Zeit der Nernstlampe.

Von Dr. FRANZ SKAUPY, Berlin.

1. Einleitung. Für den Wettbewerb der verschiedenen elektrischen Lichtquellen untereinander ist bis zum heutigen Tage im wesentlichen ein einfacher Gesichtspunkt maßgebend geblieben. Es erweist sich diejenige Lichtquelle als überlegen, die bei einer Nutzlebensdauer von mindestens mehreren hundert Stunden den geringsten Stromverbrauch, bezogen auf die Einheit der erzeugten Lichtmenge, oder wie man sagt, die günstigste Ökonomie (meist ausgedrückt in W/HK) aufweist. Ein zweites wesentliches Moment ist die Einfachheit des Zündvorganges der Lichtquelle. Andere Eigenschaften, wie die Lichtfarbe, die Verteilung des Lichtes nach den verschiedenen Richtungen des Raumes, die diffuse Verteilung und Blendungsfreiheit, haben im Wettkampf der Lichtquellen bisher eine relativ geringe Rolle gespielt, obwohl sie eine rasch zunehmende Beachtung finden. Die Nernstlampe konnte sich gegenüber der Kohlefadenlampe durch ihre wesentlich bessere Ökonomie (1,5 W/HK gegenüber 3,4 W/HK) durchsetzen und es gelang ihr dies trotz der umständlichen Zündung durch einen besonderen selbsttätig sich abschaltenden Heizkörper, der den Leuchtkörper der Lampe erst auf die für die Stromleitung

nötige Temperatur bringen mußte, und trotz des überdies noch nötigen Vorschaltwiderstandes. Vermutlich hätte die Nernstlampe, auch wenn ihr eine längere Entwicklungszeit und die damit Hand in Hand gehende Vereinfachung der Zündung und des Vorschaltwiderstandes vergönnt gewesen wäre, die Kohlefadenlampe doch nur teilweise verdrängen können, so schwerwiegend erwiesen sich die genannten Komplikationen gegenüber der Einfachheit einer Glühlampe mit metallisch leitendem Leuchtkörper. Es ist daher nicht verwunderlich, daß die Erfindung der Metallfadenlampe mit ihrer mindestens gleichen Lichtausbeute die Entwicklung der Nernstlampe sofort zum Stillstande brachte, übrigens ein Umstand, der die hohe Bedeutung der Nernstlampe für die Entwicklung der Lichttechnik nicht beeinträchtigen kann.

2. Die Osmium- und Tantallampe, beide mit einer Ökonomie von etwa 1,5 W/HK und einer Lebensdauer von mehr als tausend Stunden, tauchten ziemlich gleichzeitig am Horizonte der Lichttechnik auf, der endgültigen Siegerin, der Wolframlampe, vorausgehend. Man kann die Osmiumfadenlampe, deren Leuchtkörper aus dem überaus seltenen Metall Osmium bestand, als den Vorläufer der Wolframfadenlampe, die Tantallampe als Vorläufer der Wolframdrahtlampe bezeichnen. Während nämlich der Tantalleuchtkörper von Anfang an aus einem fortlaufenden gezogenen Draht bestand, hatte der Osmiumlampe und der Wolframfadenlampe die Gestalt spröder, bügelförmiger Fäden, die in einer der Lampenspannung entsprechenden Anzahl und Länge in Serie geschaltet wurden. Es sei hier in Erinnerung gebracht, daß sowohl der Osmium- wie der Wolframfaden durch Herstellung einer Paste aus dem pulverförmigen Metall, Spritzen durch feine Düsen und Sinterung der so gewonnenen Fäden bei hoher Temperatur in einer das Bindemittel wegnehmenden Atmosphäre erzeugt wurden.

3. Die Wolframfadenlampe mit ihrer günstigen Ökonomie von etwa 1 W/HK verdrängte naturgemäß sehr rasch die Osmiumlampe, indes die Tantallampe mit ihrem duktilen mechanisch widerstandsfähigen Leuchtkörper sich noch längere Zeit neben der Wolframfadenlampe behaupten konnte. Aus dem Dilemma: Wolframfadenlampe mit wesentlich besserer Ökonomie, aber zerbrechlichem, aus einzelnen Bügeln zusammengesetzten Leuchtsystem, oder Tantallampe, mit unterlegener Lichtausbeute, aber duktilem, fortlaufenden, gezogenen Leuchtdraht, schien es keinen Ausweg zu geben. Wissenschaftlich wenig aussichtsreich war der Versuch, der dahingehend, die Belastung und damit die Lichtausbeute des Tantaldrahtes zu steigern oder den Wolframleuchtkörper mechanisch ebenso widerstandsfähig zu machen, wie den Tantaldraht, womöglich ihn ebenfalls in Drafform zu bringen. Hier muß darauf hingewiesen werden, daß in jener Zeit (bis 1909) Wolfram nur als vollkommen sprödes Metall bekannt war, ja, daß die Sprödigkeit geradezu als eine individuelle Eigenschaft des Wolframmetalls angesehen wurde. Die Herstellerin der Tantallampe, erfahren in der Herstellung sehr dünner Drähte, fand, daß geringe Mengen Nickel (etwa 10%) das Wolfram vollkommen zu duktilisieren vermögen, so daß aus dieser Legierung ohne Schwierigkeit Drähte gezogen werden können. Da aber die Nickel-Wolframlegierung leicht schmelzbar ist, mußte der aus ihr gezogene Draht vor dem Einbau in die Lampe wieder von Nickel befreit werden, und es zeigte sich, daß der dann resultierende Leuchtkörper wieder fast ebenso spröde war, wie die bekannten Wolframfäden. Man hatte also eine einfachere, auf das Drahtziehen begründete