

**7. Über das Schmelzen
des Kohlenstoffs mittels des Jouleschen Effektes;
von M. La Rosa.**

(Aus dem Physikalischen Institut der Kgl. Universität zu Palermo.)

In einer kürzlichen Mitteilung¹⁾ beschäftigen sich die Herren Watts und Mendenhall mit meiner Arbeit²⁾ „Über das Schmelzen des Kohlenstoffs mittels des Jouleschen Effektes“ und glauben auf Grund neuer Versuche zu einem anderen Schluß als dem von mir angegebenen des beginnenden Schmelzens gelangen zu müssen.

Die wesentlichen Punkte ihrer Untersuchung sind folgende:

1. Festzustellen, ob die Krümmung des elektrisch erhitzten Kohlestäbchens nicht von dem Bindematerial abhängig ist.

2. Die Temperaturen zu bestimmen, bei denen diese Erscheinung eintritt.

3. Untersuchung der Entstehungsweise der mehr oder weniger regelmäßigen Rauigkeiten auf der Seitenfläche, sei es, wenn das Kohlestäbchen allmählich und eine gewisse Zeitlang erhitzt wird, sei es, wenn die Erhitzung eine plötzliche ist.

Hinsichtlich des ersten Punktes schließen sie in Übereinstimmung mit meinen Resultaten, daß die Krümmung auch unabhängig vom Bindematerial auftritt.

Was den zweiten Punkt anbelangt, so finden die erwähnten Autoren, daß die Temperaturen, bei denen die Krümmung auftreten kann, niedriger sind als die des Lichtbogens, und kommen daraus zu dem Schluß, daß dieselbe nicht auf beginnendes Schmelzen, sondern auf eine Steigerung der Plastizität der Kohle durch die hohe Temperatur zurückzuführen ist.

Hinsichtlich des dritten Punktes endlich schließen sie, daß die Rauigkeiten durch Kondensation des Kohledampfes erzeugt werden, da sie beobachtet haben, daß die Rauigkeiten sich vorzugsweise auf den für kälter *erachteten* Teilen finden und

1) O. P. Watts u. C. E. Mendenhall, Ann. d. Phys. **35**. p. 783. 1911.

2) M. La Rosa, Ann. d. Phys. **34**. p. 95. 1911.

ähnliche Höcker sich auf den Kohlen zu bilden pflegen, zwischen denen der Lichtbogen hergestellt worden ist.

Auf Grund dieser Resultate meinen die Autoren, die höchste durch Erhitzung eines Kohlestäbchens mittels des Jouleschen Effektes zu erreichende Temperatur sei durch den Sublimationspunkt dieses Körpers bei dem angewandten Druck gegeben und diese Temperatur somit — im Innern des Fadens — höchstens gleich derjenigen des Lichtbogens.

In Wirklichkeit sind die Erscheinungen, auf welche die oben genannten Autoren ihre Aufmerksamkeit gerichtet haben, weder alle noch die wichtigsten von denjenigen, die ich meiner Ansicht zugrunde gelegt habe.

Ich glaube wohl, daß niemand, ich eingeschlossen, die Krümmung der elektrisch erhitzten Stäbchen einer anderen Ursache als einer durch den erhitzten Körper, welches immer er auch sein mag, erlangten bedeutenden Plastizität zuschreiben kann.

Was genau festgestellt werden mußte, war die Frage, ob diese Plastizität dem Kohlenstoff eigen ist, oder ob die untersuchten Stäbchen dieselbe dank des Herstellungsprozesses besitzen.

In dieser Hinsicht sei mir die Behauptung gestattet, daß meine Versuche bereits eine bessere Gewähr für die Glaubwürdigkeit des Resultates gaben, als diejenigen der Autoren.

Die von mir benutzten Kohlen waren (wie ich in meiner Arbeit sagte) die reinsten, welche die Firma Conradt mir liefern konnte, und wurden, bevor sie einem Versuch unterzogen wurden, weiterhin und zwar sehr sorgfältig gereinigt, indem ich sie über 9 Stunden lang der Einwirkung eines Chlorstromes bei einer Temperatur von über 900° aussetzte. Unter diesen Bedingungen *führt das Chlor sogar die Kieselerde fort* und man brauchte sich sicher keine Gedanken mehr über mögliche Rückstände der Kohlenwasserstoffe zu machen, welche zur Bindung gedient hatten. Die Asche, welche vor der Behandlung 0,33 Proz. betrug, ging nachher auf 0,07 Proz. herab.

Nun ist eine solche Reinigung nicht ohne Einfluß auf die Resultate.

Bekanntlich konnte Moissan feststellen, daß die von Despretz erhaltenen Erscheinungen scheinbaren Schmelzens des Kohlenstoffs (Plastizität, Bildung von Tröpfchen usw.) eben

von der Bildung von Verbindungen des Kohlenstoffs mit den Verunreinigungen abhängig waren. Ich selbst bin gezwungen gewesen, die größtmögliche Reinheit des Versuchsmaterials zu erreichen zu suchen, nachdem ich die große Wichtigkeit konstatiert hatte, welche die Verunreinigungen in dem Phänomen hatten. Eine etwas unreine Kohleprobe mit ca. 1 Proz. Ascherückstand (Eisen und Kieselerde) bog sich mit der größten Leichtigkeit noch bevor sich ringsum dieselbe die leuchtende Aureole gebildet hatte, mit der ich mich in einer anderen Arbeit beschäftigt habe, und blieb nach der Erhitzung spongios und äußerst leicht zerbröckelig, genau wie die Herren Watts und Mendenhall finden. Die gereinigten Proben dagegen konnten eine kleine Krümmung aufweisen, wenn sie auf etwas höhere Temperaturen als diejenige, bei welcher die Aureole entstand, erhitzt wurden, und bewahrten stets eine kompakte Struktur und eine bedeutende Zähigkeit.

All dies führt mich nun zur Annahme, daß, wenn die von den Herren Watts und Mendenhall benutzten Kohlen gereinigt worden wären (was ganz und gar unterlassen wurde), die Resultate verschieden von den mitgeteilten gewesen sein würden. Sie hätten sicher nicht die bedeutenden Krümmungen konstatiert, welche sie mit Leichtigkeit bei Temperaturen von auch unter 2000° erhielten.

Die Temperaturen, bei welchen die Autoren experimentierten, können also etwas niedriger sein als diejenigen, bei welchen ich meine Versuche angestellt habe. Dies wird auch durch die weitere Tatsache bestätigt, daß, während in meinem Fall ein Versuch höchstens ganz wenige Sekunden dauern konnte (nach deren Verlauf das Stäbchen in winzige Trümmer zersprang), bei den Untersuchungen der Autoren ein Versuch 4 oder 5 Minuten konnte.

Ja, in dieser Hinsicht möchte ich hervorheben, daß die Bedingungen meiner Versuche die Erreichung höherer Temperaturen als diejenige der Autoren gestatten, wenn schon diese über 66 Kilowatt haben verfügen können, während ich nur über 15 Kilowatt verfügte.

Während in der Tat bei meinen Versuchen die verfügbare Leistung in einem Kohlestäbchen von 3 cm Länge und 0,2 cm Durchmesser aufgewendet wurde, betrug bei den Versuchen der

Autoren die Länge des Kohlestabes 15 oder 30 und der Durchmesser 0,6 cm.

Die von diesem Stab ausgestrahlte Energie war also — da die Seitenfläche eine größere war — etwas größer als die von meinem ausgestrahlte. Indem wir die übrigen Energieverluste unberücksichtigt lassen, die in dem vorliegenden Fall in bezug auf die ausgestrahlte Portion sehr gering waren, können wir die Größenordnung der Temperaturen, die in den beiden verschiedenen Fällen erreicht werden konnten, dadurch berechnen, daß wir den Wert der Temperatur suchen, durch den die eingebüßte Leistung gleich der empfangenen wurde. Da die Werte von Θ in bezug auf die Zimmertemperatur sehr groß sind, können wir ohne weiteres setzen:

$$\sigma \Theta^4 S = 15000, \quad \sigma \Theta_1^4 S_1 = 66000, \quad \sigma \Theta_2^4 S_2 = 66000,$$

wo σ die Strahlungskonstante ist, Θ die absoluten Temperaturen und S die Seitenflächen bezeichnen. Für letztere haben wir:

$$S = 2\pi \times 0,1 \times 3, \quad S_1 = 2\pi \times 0,3 \times 15, \quad S_2 = 2\pi \times 0,3 \times 30.$$

Aus diesen Gleichungen erhalten wir:

$$\frac{\Theta}{\Theta_1} = \sqrt[4]{\frac{15}{66} \cdot \frac{4,5}{0,3}} = 1,36, \quad \frac{\Theta}{\Theta_2} = \sqrt[4]{\frac{15}{66} \cdot \frac{9}{0,3}} = 1,61.$$

Setzen wir dann $\sigma = 6,39 \cdot 10^{-12}$ *), so finden wir

$$\Theta = 5900^\circ, \quad \Theta_1 = 4300^\circ, \quad \Theta_2 = 3680^\circ \text{ absolut.}$$

Dieses Resultat bestätigt nochmals, daß die Versuche der Autoren in etwas engere Temperaturgrenzen fallen als diejenigen, in welche die meinen getrieben worden sind. Allerdings ließe sich einwerfen, daß, da während der starken Erhitzung der Kohlestab (durch Verdampfung und Verbrennung) dünner wird, die Versuchsbedingungen der Autoren mit den meinen hätten identisch werden müssen. Dies ist aber nicht richtig, weil das Kohlestäbchen infolge der Plastizität, die es durch das Erhitzen erwirbt, unter der Einwirkung schwacher aber lang anhaltender Kräfte, wie des Eigengewichtes oder eines schwachen Innendruckes, nachgibt und zerbricht, noch

*) Dies ist der neueste Wert für den schwarzen Körper und da er größer als der wahre für die Kohle ist, kompensiert er zum Teil die übrigen Verluste, die wir vernachlässigt haben.

bevor es eine hohe Temperatur erreichen kann. Im Fall der Autoren waren die Bedingungen durch die Anwesenheit der Verunreinigungen noch ungünstiger gestaltet.

Was die Höcker anbelangt, die auf der Seitenfläche der Kohle entstehen, so glaube ich, daß dieselben bei den Versuchen der Autoren etwas ganz anderes sind als bei den meinen. Meiner Ansicht nach sind die von den Autoren beschriebenen die gleichen wie die von Despretz beobachteten und auf leichter als dieser Körper schmelzbaren Verbindungen des Kohlenstoffs mit den Verunreinigungen beruhend.

Die Vermutung, daß die von mir beobachteten auf Kondensation beruhen, ist nach mir unhaltbar. Das Aussehen und die Eigenschaften der durch Kondensation der Kohledämpfe erhaltenen Ablagerungen sind ganz und gar verschieden von denjenigen, welche ich auf den der Jouleschen Erhitzung unterzogenen Stäbchen gefunden habe.

Den tiefgehenden Unterschied zwischen diesen Ablagerungen und den durch Sublimation erhaltenen habe ich Gelegenheit gehabt, bei meinen Versuchen über das Schmelzen des Kohlenstoffs im selbsttönenden Lichtbogen eingehender zu studieren und genau festzulegen, so daß ich über diesen Punkt keinen Zweifel mehr hegen kann.

Auf Kondensation beruhend ist hier jene Art von Rinde, von der die Autoren sprechen, welche sich häufig um das Stäbchen nach der Erhitzung findet, oder sich in Form eines äußerst zarten Kohlestreifens in die Luft erhebt, wie es auch bei meinen Versuchen der Fall war. Struktur und Zähigkeit dieser Rinde aber sind recht verschieden von den entsprechenden Charakteren der Graphitkügelchen, die ich beschrieben habe. Überdies entstehen die Kohledampfablagerungen an dem negativen Pol des Lichtbogens stets in Form von inkohärentem Staub, welcher sich rings um die Spitze der Kohle fast unter Bildung einer Art Bart anhäuft¹⁾, während die Höckerchen, die häufig dort beobachtet und von den Autoren erwähnt werden, den von Moissan angegebenen Ursprung haben.

Übrigens sind dies, wie ich bereits erwähnte habe, nicht

1) Die Erscheinung wird sehr schön im selbsttönenden Lichtbogen beobachtet.

die wichtigsten Tatsachen, in denen ich glaubte, Beweiselemente zugunsten des Schmelzens sehen zu können.

Dieselben ergeben sich vielmehr aus der mikroskopischen Beobachtung der winzigen Fragmente, welche nach der durch Herstellung eines plötzlichen Kurzschlusses hervorgerufenen heftigen Explosion des Fadens an den Polen der Energiequelle erhalten werden, und besser noch aus der Beobachtung der Graphitspritzer, welche auf den Wänden des geschlossenen Gefäßes erhalten werden, in dem die Explosion erfolgt. Das Aussehen jener Fragmente und dieser Flecke, ihre Struktur, ihre Zähigkeit, ihr festes Haften an den Wänden, alles spricht in sehr suggestiver Weise für das vermutete Schmelzen.

Und hier beachte man, daß ich nichtsdestoweniger nicht für die Schmelzbarkeit des Kohlenstoffs bei gewöhnlichem (Atmosphären-)Druck geschlossen habe. In der Erörterung, die ich an meine Untersuchungen anschloß, habe ich unter anderem gesagt, daß das Schmelzen innerhalb des Fadens erfolgt, wo sicher eine höhere Temperatur als an der Oberfläche und ein stärkerer Druck als der Atmosphärendruck herrscht (wie durch die ballistische Kraft, die Ursache der heftigen Explosion, bewiesen wird) und *es wohl der Fall sein könnte*, daß an einen solchen, ganz oder größtenteils auf dem Kohledampf beruhenden Druck notwendigerweise die Existenz der flüssigen Phase gebunden wäre.

Ja in meiner Arbeit habe ich gesagt, daß dieser Punkt noch ungewiß bleibt und Versuche unter höheren Drucken zu seiner Aufklärung notwendig und von großem Nutzen gewesen wären.

Erlaubt sei mir noch hervorzuheben, daß mir die Behauptung der Autoren nicht richtig scheint, daß die höchste Temperatur, welche das Innere des Fadens erreichen kann, diejenige des Kraters des Lichtbogens ist; wenn ich auch zugebe, daß die von dem positiven Krater des Lichtbogens erreichte Temperatur diejenige ist, bei welcher die Spannung des Kohledampfes dem atmosphärischen Druck gleichkommt (was nicht ohne weiteres annehmbar ist), ist doch stets anzunehmen, daß im Innern des Fadens höhere Temperaturen erreicht werden, weil hier die Verdampfung nicht ungehindert stattfindet und deshalb größere Dampfspannungen als der atmosphärische Druck entstehen.

Ja, wenn die Erhitzung äußerst schnell erfolgt, kann die der Ausstrahlung ausgesetzte äußere Kruste noch ziemlich kalt und wenig nachgiebig sein, wenn die Achsenpartien bereits sehr heiß sind; die Überdrucke, welche sich im Innern geltend machen, können in diesem Fall ziemlich groß werden und somit könnte die Innentemperatur etwas über diejenige steigen, bei welcher die Dampfspannung dem atmosphärischen Druck gleichkommt. Dies ist höchstwahrscheinlich bei meinen Versuchen der Fall.

Alles in allem glaube ich, meine Ansicht über das Auftreten des flüssigen Zustandes bei den betreffenden Versuchen noch immer aufrecht erhalten zu können. Doch ist die Bemerkung am Platz, daß diese Ansicht nicht mit derjenigen von Watts und Mendenhall in Widerspruch steht, wie diese Autoren anzunehmen scheinen. Der amorphe Zustand wäre nach den modernen Anschauungen (von Tammann und seiner Schule) nichts anderes als eine Erscheinung der Unterkühlung und in diesem Fall wäre das Schmelzen nichts als eine allmähliche Verminderung der Viskosität des Körpers, welcher unverändert in einer und derselben Phase verharzt.

Das Schmelzen im gewöhnlichen Sinne ist also im Grunde nichts weiter als jene Zunahme der Plastizität, von der unsere Autoren sprechen.

Nichtsdestoweniger kann man vielleicht annehmen, daß bei den von mir beschriebenen Versuchen effektiv die notwendigen Bedingungen für wahres Schmelzen erreicht werden, da der Körper (wie es scheint) in bedeutendem Grad jene Charaktere der Fluidität erwirbt, welche nach der älteren Anschauungsweise den flüssigen Zustand auszeichnen, und sich überdies nach dem Erkalten eine Ablagerung mit den Charakteren des kristallisierten Graphits findet — Fall der Graphitspritzer an der Porzellanschale —.

Verhalten sich die Dinge genau in dieser Weise, so läßt sich sagen, daß wir vor einem wahren umgekehrten Übergang aus dem flüssigen (nicht unterkühlten) Zustand in den festen Zustand stehen; dies würde beweisen, daß die Bedingungen des Schmelzens wirklich erreicht werden.

(Eingegangen 25. September 1911.)