

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 9 (1918)

Heft: 11

Artikel: Ueber die technische Nutzbarmachung des Luftstickstoffes mit Hilfe des elektrischen Flammwegens

Autor: Andriessens, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059612>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A.S.E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Telephon: Hottingen 37.08
Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone Hottingen 36.40

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A.S.E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

IX. Jahrgang
IX^e Année

Bulletin No. 11

November 1918
Novembre

Ueber die technische Nutzbarmachung des Luftstickstoffes mit Hilfe des elektrischen Flammbogens.

Von Ing. H. Andriessens, Zürich.

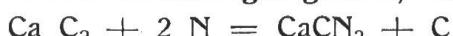
Die untenstehenden Ausführungen beziehen sich auf einige allgemeine Gesichtspunkte bei der elektrischen Luftverbrennung. Es herrscht in Fachkreisen noch vielfach die Ansicht vor, dass es, unter Verwendung magnetisch verlängerter Lichtbögen für den Prozess nützlich sei, die Erzeugung einer möglichst ausgedehnten Flammenscheibe pro kW-Einheit anzustreben. Dieser Auffassung wird entgegengetreten und gleichzeitig ein neues Luftverbrennungsverfahren angegeben, bei dem das Verhältnis der verwendeten Flammenscheibe zur Energieaufnahme unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen wesentlich geringer ist als bisher möglich war. Das neue Verfahren eignet sich für die Verwertung von Abfallkräften mit ständig starkem Belastungswechsel und ergibt auch bei sehr kleinen Energiemengen bis herab zu 50 kW günstige Resultate.

* * *

Die Hauptbestandteile der uns umgebenden Luft sind die Elemente N₂, der freie Stickstoff und O₂, der freie Sauerstoff, beides farblose Gase, die im Verhältnis von etwa 80 Teilen Stickstoff und 20 Teilen Sauerstoff zu 100 Teilen Luft miteinander mechanisch vermengt sind. Das freie Element N₂ ist als solches wertlos und unbegehrte; mit Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff usw. chemisch verbunden, gebundener Stickstoff, wird dieser dagegen von der Landwirtschaft in von Jahr zu Jahr ansteigenden, praktisch unbegrenzten Mengen benötigt.

Die bekanntesten technisch durchgeföhrten Stickstoffverbindungen sind:

1. *Kalkstickstoff*, Ca CN₂. Ueber glühendes, in eisernen Retorten zerkleinertem Kalzium Karbid (Ca C₂) wird reines Stickstoffgas geföhrt, das sich nach der Formel



mit dem Karbid zu Kalzium Cyanamid (= sogenannter Kalkstickstoff) verbindet.

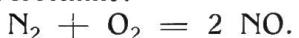
2. *Ammoniak*, NH_3 . Die Gase Stickstoff und Wasserstoff verbinden sich, wenn sie in Gegenwart eines Kontaktkörpers im Volumverhältnis von 1 : 3 bei einer Temperatur von 500° C und unter einem Druck von 200 Atm. zusammengebracht werden, zum Teil zu NH_3 , d. h. es stellt sich unter diesen Bedingungen zwischen den drei Gasen Stickstoff, Wasserstoff und Ammoniak ein Gleichgewichtszustand ein, der bei 500° C einem Volumanteil von etwa 8% Ammoniak entspricht. (Der Begriff Gleichgewichtszustand ist dadurch charakterisiert, dass die Reaktion in der einen Richtung, im vorliegenden Fall zur Ammoniakbildung hin, so schnell verläuft wie in der anderen, also dem Ammoniakzerfall in Stickstoff und Wasserstoff, und nicht dadurch, dass überhaupt kein Umsatz mehr erfolgt.)

Die Ammoniaksynthese beruht auf den folgenden physikalischen Tatsachen. Wenn man Ammoniak langsam von 15° C an immer höher erhitzt, so zerfällt es allmählich von ca. 100 Vol.-% Ammoniak ausgehend wieder zu Stickstoff und Wasserstoff (bei 800° C verbleiben nur noch 0,5 Vol.-% Ammoniak), d. h. die Reaktion verläuft nach dem Sinne der Ammoniakbildung exotherm, es wird Wärme dabei frei und der Ammoniakanteil des Gasgemisches im Gleichgewicht ist bei niederen Temperaturen grösser als bei hohen. Es bildet sich aber bei Zimmertemperatur aus Stickstoff und Wasserstoff nicht ohne weiteres Ammoniakgas, weil die Reaktionsgeschwindigkeit (der stets gleichzeitig vor sich gehenden Bildung und Zersetzung) des chemischen Umwandlungsprozesses bei dieser Temperatur zu gering ist. Die obengeschilderte Massnahme, das Gasgemisch zu komprimieren, sowie die Einführung eines Kontaktkörpers, der Verdienst von Haber und le Rossignol, bewirken nun eine beträchtliche Erhöhung derjenigen Reaktionsgeschwindigkeit, die dem chemischen System bei 500° C unter normalen Verhältnissen entsprechen würde und die

an sich zu gering wäre; die angegebenen Werte der Arbeitstemperatur und -Druckes stellen einen Kompromiss zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und einem technisch noch verwertbaren Ammoniakgleichgewicht (dasselbe entspricht, wie erwähnt, bei 500° C etwa 8 Vol.-% NH_3) dar; dieselben, sowie die Wahl des Kontaktkörpers, ergaben sich aus empirischen Laboratoriums-Versuchen als günstig für den technischen Betrieb.

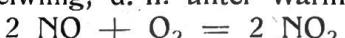
Bei dem Verfahren wird der Wasserstoff durch die Reaktion $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{H}_2 + \text{CO}$ gewonnen. (Die amerikanische General Chemical Company hat neuerdings ein, dem Haber'schen ähnliches, aber mit geringerer Temperatur und Kompression arbeitendes Verfahren angegeben.)

3. *Luftverbrennung*: Atmosphärische Luft wird im Hochspannungslichtbogen zu Stickoxyd verbrannt:



In der Fig. 1 ist ein solcher für die Luftverbrennung geeigneter Hochspannungslichtbogen dargestellt; derselbe wird in einem im wesentlichen aus zwei Chamottewänden gebildeten Ofen eingebaut und die Luft durch diesen hindurchgeleitet.

Nach Austritt aus dem Ofen bindet sich das gebildete Stickoxyd mit einem Teil des überschüssigen Luftsauerstoffs freiwillig, d. h. unter Wärmeabgabe zu Stickstoffdioxyd.



(Der eigentümliche Geruch nach Salpetersäure, den man bei Kurzschlüssen mit Flammbögen häufig wahrnimmt, ist durch die Bildung von Stickstoffdioxid veranlasst.)

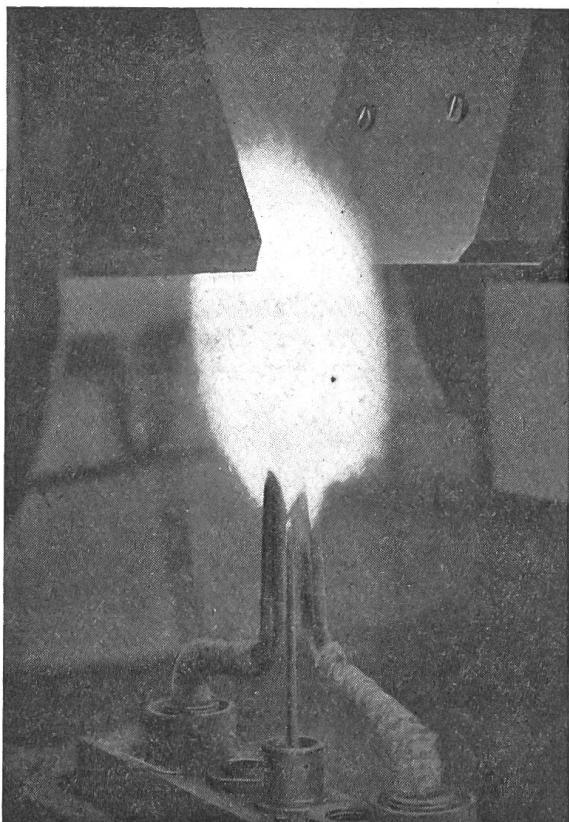
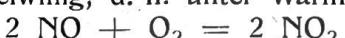


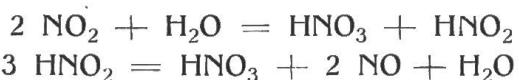
Fig. 1.

überschüssigen Luftsauerstoffs freiwillig, d. h. unter Wärmeabgabe zu Stickstoffdioxyd.



(Der eigentümliche Geruch nach Salpetersäure, den man bei Kurzschlüssen mit Flammbögen häufig wahrnimmt, ist durch die Bildung von Stickstoffdioxid veranlasst.)

Durch Wasser geleitet, bildet das Stickstoffdioxyd mit diesem Salpetersäure und salpetrige Säure:



und diese, also die Salpetersäure, mit Kalk versetzt, den sogenannten Kalksalpeter. (Die Salpetersäure wird mit Kalksteinen neutralisiert und eingedampft):



Die Fig. 2 zeigt schematisch eine kleine Salpeterfabrik wie eben besprochen, die mit einfachen Hilfsmitteln im Laboratorium zusammengestellt werden kann; dieselbe entspricht im Prinzip dem Birkeland'schen in Norwegen bis zu 400 000 kW ausgebauten und in Nordamerika in noch grösserem Maßstabe projektierten Verfahren.

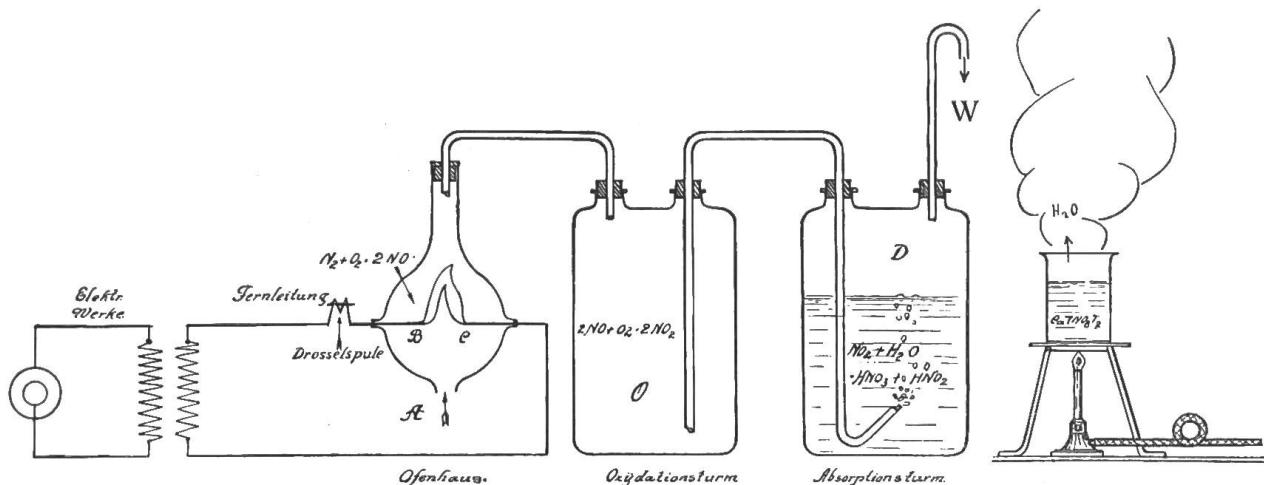


Fig. 2.

Vermittels einer Wasserstrahlpumpe W wird atmosphärische Luft durch A in einen Glaskolben (den elektrischen Ofen) gesaugt und in der Hochspannungsentladung B—C zu 1–2 Vol.-% NO verbrannt. In der Technik wird die Luft vermittelst grosser Ventilatoren durch den Ofen geblasen. In der Oxydationskammer O wird das farblose NO mit dem überschüssigen Sauerstoff der Luft selbstätig zu NO₂, einem braunen Gase oxydiert. Dieses verbindet sich in dem mit Wasser gefüllten Absorptionsapparat D zu HNO₃ und HNO₂. In dem daneben stehenden Becherglas (in der Technik eiserne Pfannen) wird eine mit Ca neutralisierte HNO₃-Lösung eingedampft.

Im Grossbetriebe bieten sowohl die restlose Absorption der nitrosen Gase, sowie auch die Oxydation der salpetrigen Säure bzw. Salze zu Salpetersäure und Nitrat ausserordentlich grosse Schwierigkeiten.

* * *

Von diesen drei Methoden zur technischen Verwertung des atmosphärischen Stickstoffs eignet sich für die Schweiz die Luftverbrennung am besten; Professor Ph. A. Guye¹⁾ kommt gelegentlich einer eingehenden Besprechung derselben zu dem folgenden Schluss: „De là résulte qu'en Suisse, où l'industrie est dépendante à un haut degré de l'importation du charbon étranger, tous les efforts doivent être faits pour réaliser la fixation de l'azote par le procédé à l'arc, le seul qui permet de faire complètement abstraction de ce combustible.“

* * *

Wenn man bei der Luftverbrennung von einem bestimmten Verfahren spricht, so ist damit eigentlich nur der Ofen selbst, sein charakteristisches Arbeitsprinzip, gemeint.

¹⁾ „Le problème de l'azote en Suisse“. — Schweizerische Chemiker-Zeitung, Januar 1918. Verlag: Meyer & Cie., Oerlikon-Zürich.

In der Folge sind einige der bekanntesten technischen Luftverbrennungsverfahren kurz geschildert.

Pauling verwendet eine Art Hörnerblitzableiter, der zwischen zwei Chamotteplatten (den Ofenwänden) angeordnet ist. Die Hochspannungsflamme zündet an der engsten Stelle zwischen den Elektroden und wird durch die Strömung der zu verbrennenden Luft nach oben geblasen und verlängert.

Moscicki hat ein Verfahren angegeben, bei dem ein Lichtbogen zwischen zwei ringförmigen, konzentrisch und in einer Ebene angeordneten Elektroden magnetisch beeinflusst und in Rotation gebracht wird.

Hessberger und Schönherr verwenden einen 5—6 m langen Hochspannungslichtbogen, der dadurch in einem eisernen Rohr zustande kommt und brennend gehalten wird, dass die Luft am unteren Teil des Rohres tangential eingeblasen wird und somit in der gesamten Rohrlänge einen Wirbel bildet, in dessen Ruhezone (der Rohrachse) die Flamme ruhig brennt. Es ist dies offenbar eine der interessantesten und schönsten Hochspannungserscheinungen.

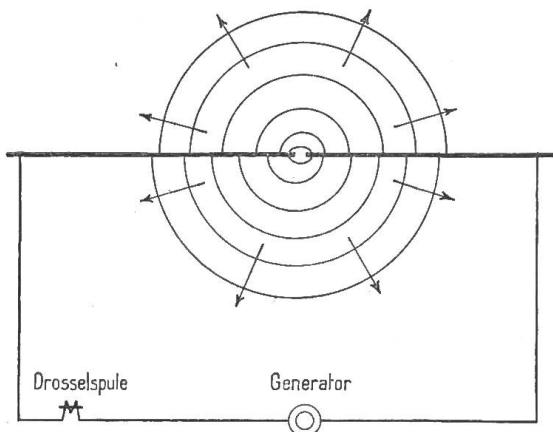


Fig. 3.

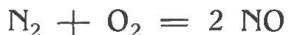
Von den heute in grossem Maßstab betriebenen Verfahren hat sich das bereits erwähnte *Birkeland'sche* als das beste erwiesen. In der Fig. 3 ist eine *Birkeland'sche* Flammenscheibe schematisch dargestellt. Zwischen zwei bis zu etwa 1 cm genäherten Elektroden wird ein Hochspannungslichtbogen gezündet und dieser unmittelbar nach der Zündung durch ein magnetisches Kraftfeld, das senkrecht zur Papierebene gedacht ist, wie ein flexibler, stromdurchflossener Leiter in der Form von Halbkreisen in der Richtung der Pfeile verbreitert.

Entsprechend der jeweiligen Stromrichtung des

Wechselstromes erfolgt diese Verbreiterung des Lichtbogens unter dem Einfluss eines Gleichstrom-Magnetfeldes einmal nach oben und einmal nach unten. Da dieser Wechsel bei 50 periodischem Wechselstrom 100mal pro Sekunde erfolgt, so sieht man nur eine einzige kreisrunde, ähnlich der in Fig. 1 gezeigten, jedoch wesentlich grössere Scheibe; der Durchmesser derselben beträgt bei einer Ofenbelastung von 1000 kW etwa 2 m.

* * *

Es ist nun für den Elektrotechniker interessant, zu wissen welche besondere Anforderungen an eine für den fraglichen chemischen Prozess geeignete Lichtbogenentladung gestellt werden; hierzu sei vorerst auf die Bedingungen, unter denen die endotherme Reaktion



vor sich geht und, unter Berücksichtigung dieser Bedingungen, auf die Physik des Energieausgleiches in der Form eines Lichtbogens hingewiesen.

Im Gegensatz zur Ammoniakbildung verläuft die Bildung von Stickoxyd aus Stickstoff und Sauerstoff endotherm, d. h. so, dass im Gleichgewichtszustand zwischen diesen drei Gasen der Anteil an Stickoxyd bei hohen Temperaturen grösser ist als bei niederen. Wenn man ein bestimmtes Volumen Luft auf 3000° C erhitzt, so stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der einer Stickoxydkonzentration von etwa 4 Vol.-% des gesamten Volumens der drei zusammen reagierenden Gase entspricht; bei Zimmertemperatur ist das Stickoxydgleichgewicht gleich 0. Um aus Luft Stickoxyd zu erzeugen, muss man daher diese aus zwei Gründen hoch erhitzen, nämlich es soll nicht nur eine möglichst hohe Gleichgewichtskonzentration erreicht werden, sondern es muss auch, genau wie bei der Ammoniakbildung, die Reaktionsgeschwindigkeit der miteinander reagierenden Stoffe Stickstoff und Sauerstoff, die bei normaler Temperatur unendlich klein ist, erhöht werden.

Ueber die Begriffe Gleichgewicht und Reaktionsgeschwindigkeit kann man sich mit Hilfe der kinetischen Gastheorie durch eine einfache Ueberlegung ein klares Bild machen. Im vorliegenden Fall reagieren Stickstoff und Sauerstoff zusammen. Wenn sich ein Stickstoff- und ein Sauerstoffmolekül, die je aus zwei Atomen bestehen, zu Stickoxyd verwandeln sollen, so ist es vor allem notwendig, dass sich die beiden Moleküle in einem Punkte treffen. (Bei den Gasen ist der Abstand der Moleküle ein im Vergleich zu ihrer Grösse sehr grosser; es folgt dies schon aus dem Umstände, dass man das Volumen eines Gases leicht durch Kompression reduzieren kann. Nach der kinetischen Gastheorie bewegen sich die Moleküle in dem ihnen zur Verfügung stehenden Raum mit grosser Geschwindigkeit und üben somit einen Druck auf die Wände des sie einschliessenden Gefäßes aus, indem sie auf diese aufprallen; die Geschwindigkeit mit der sich ein bestimmtes Molekül bewegt, ändert sich wegen der Zusammenstöße mit andern Molekülen andauernd; die mittlere Geschwindigkeit hängt von der Temperatur ab, daher wächst auch mit der Temperatur der Gasdruck, oder was dasselbe ist, es wächst die Stärke und Zahl der Stöße der Moleküle gegen die Gefässwände. Die mittlere Geschwindigkeit eines Stickstoffmoleküles bei 0° C ist der Größenordnung von 500 m pro Sekunde.). Aber es braucht nicht jeder Zusammenstoss zu einer Umlagerung der Atome zu führen; vielmehr muss der betreffende Zusammenstoss ein so heftiger sein, dass die Kraft, durch die die Atome im Molekül zusammengehalten werden, überwunden wird; das Molekül muss gespalten werden. Dies gilt sowohl für die Sauerstoff- wie ganz besonders für die Stickstoffmoleküle bei denen, eine physikalische Eigenschaft des Stickstoffs, die beiden Atome sehr fest zu einem Molekül aneinanderhaften. Unter einer grossen Anzahl von Zusammenstössen wird also nur ein bestimmter mit einem Umsatze im Sinne des oberen Pfeiles der Reaktionsgleichung



verbunden sein. Ein solcher Zusammenstoss sei ein „wirksamer“ genannt. Es ist nun leicht einzusehen, dass bei einer bestimmten Temperatur die Zahl der wirksamen Zusammenstöße in einer Sekunde von der Anzahl der Stickstoffmoleküle, die sich in der Volumeneinheit befinden, d. h. von der Konzentration des Stickstoffs abhängig ist, und zwar besteht zwischen diesen beiden Grössen direkte Proportionalität. Je mehr wirksame Zusammenstöße in einer Sekunde erfolgen, um so grösser ist die Anzahl der Stickoxydmoleküle, die sich in dieser Zeit bilden. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist also proportional¹⁾ der Konzentration des Stickstoffs. Was von den Stickstoffmolekülen gesagt wurde, gilt in gleicher Weise von den Sauerstoffmolekülen. Es sei nun die Konzentration des Stickstoffs, die Anzahl von Gramm-molekülen¹⁾ pro Liter C_{N_2} , diejenige des Sauerstoffes C_{O_2} , so kann man die Reaktionsgeschwindigkeit, in diesem Fall also die Bildungsgeschwindigkeit,

$$v_1 = k_1 \cdot C_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{O}_2}$$

setzen. Der Wert des Geschwindigkeitskoeffizienten k_1 vergrössert sich, wie aus dem Obengesagten hervorgeht, mit der Temperatur.

Es stossen aber auch die entstandenen Moleküle des Stickoxydes zusammen, und es wird unter einer gewissen Anzahl von Zusammenstössen einen so heftigen geben, dass die Zusammenhaftung zwischen dem Stickstoffatom und dem Sauerstoffatom in den beiden gegeneinanderprallenden Stickoxydmolekülen so sehr gelockert wird, dass es zu einer Umlagerung kommt, dass also die Reaktion im Sinne der Gleichung von rechts nach links, entsprechend dem untern Pfeil der Reaktionsgleichung erfolgt. Bezeichnet man die Geschwindigkeit mit der diese Zersetzung des Stickoxydes verläuft mit v_2 und die augenblickliche Konzentration des Stickoxydes mit C_{NO} , so ist v_2 wie leicht zu beweisen wäre proportional $C_{\text{NO}} \cdot C_{\text{NO}}$

$$v_2 = k_2 \cdot C^2_{\text{NO}}$$

wobei v_2 die Zerfallsgeschwindigkeit, bzw. Rückbildungsgeschwindigkeit zu Stickstoff und Sauerstoff darstellt.

¹⁾ Unter einem Grammolekül oder Mol einer Substanz versteht man so viele Gramm der betreffenden Substanz, wie das Molekulargewicht angibt. Das Molekulargewicht des Stickstoffs ist gleich 28, mithin ist ein Grammolekül Stickstoff gleich 28 Gramm Stickstoff, ein Grammolekül Sauerstoff = 32 Gramm und ein Grammolekül Stickoxyd = 14 + 16 = 30 Gramm dieser Substanz.

Die Geschwindigkeit, mit welcher die Reaktion verläuft, ist

$$v = v_1 - v_2 = k_1 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2} - k_2 \cdot C_{NO}^2$$

und zwar im Sinne einer Zu- oder Abnahme des Stickoxydes je nachdem v_1 grösser oder kleiner v_2 ist. Im Falle des Gleichgewichtes wird schliesslich:

$$v_1 = v_2; v = 0; \frac{k_1}{k_2} = K = \frac{C_{NO}^2}{C_{N_2} \cdot C_{O_2}}$$

K , der Quotient der beiden Geschwindigkeitskonstanten heisst die Gleichgewichtskonstante; dieselbe stellt für eine gegebene Temperatur das Verhältnis der Konzentration der beteiligten Stoffe dar.

Der Wert von K ist eine von der Temperatur unmittelbar abhängige Grösse, die für den Luftverbrennungsprozess von der grössten Bedeutung ist. Die Gleichung zeigt vorerst, dass bei gleichbleibender Temperatur also bei gleichem K die Stickoxydkonzentration dann ein Maximum wird, wenn $C_{N_2} = C_{O_2}$ wird, d. h. in die Technik übertragen, dass ein Stickoxydofen, bei gleicher Wärme- also Energiezufuhr, bei Verwendung eines hälftigen Stickstoff-Sauerstoffgemisches die höchsten Ausbeuten gibt, und zwar um zirka 20% mehr als bei Verwendung atmosphärischer Luft. Es seien $(NO)_1$ und $(NO)_2$ die Stickoxydkonzentration bei der Verwendung von atmosphärischer Luft, bezw. eines hälftigen Stickstoff- und Sauerstoffgemisches; es ist dann

$$\frac{(NO)_1}{(NO)_2} = \frac{\sqrt{K \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{5}}}{\sqrt{K \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}}} = \frac{4}{5}$$

Die Bereicherung von Luft mit Sauerstoff lohnt sich aber nur dann, wenn der letztere als Nebenprodukt (z. B. bei der Kalkstickstofffabrikation) aus einer bereits bestehenden Luftpdestillationsanlage gewonnen wird; es empfiehlt sich dann, das wertvolle Gasgemisch nach der Absorption des im Ofen gebildeten Stickoxydes diesem wieder im Kreislaufe zuzuführen und den chemisch verbrauchten Gasanteil, etwa 3 % der Gesamtmenge durch Zuleitung eines frisch erzeugten hälftigen Gemisches vor dem Ofen dauernd zu ergänzen.

Die Grösse des Einflusses der Temperatur erhellt aus einer von van't Hoff abgeleiteten äusserst wichtigen Gleichung.

$$\frac{d \ln K}{d \Theta} = - \frac{Q}{R \Theta^2}; \text{ integriert; } \ln \frac{K_2}{K_1} = \frac{Q}{R} \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_1 \cdot \Theta_2}$$

hierin sind Θ die absolute Temperatur ($= 273 + \vartheta$, wenn ϑ die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$) Q die Wärmetönung¹⁾ des Prozesses und R die Gaskonstante ($= 1,985$).

Mit Hilfe einer im Prinzip von St. Claire Deville für seine bekannten Untersuchungen über den Zerfall des Kohlendioxides und schweflige Säure angegebenen Versuchsanordnung, den sog. heisskalten Raum, in diesem Fall ein hocherhitztes Iridiumrohr, an dessen Ausflussende ein von kaltem Wasser durchströmtes Platinrohr angeordnet ist, sowie durch Extrapolation, bestimmte Nernst die Beziehungen zwischen den Werten K und Θ bei Temperaturen bis nahe am Schmelzpunkte des Iridiums, indem er Luft durch die Röhre leitete und die Stickoxydkonzentration, die dem Gleichgewichtszustande der jeweiligen Rohr-Temperatur entspricht, analysierte.

Die Fig. 4 veranschaulicht graphisch das Ergebnis dieser wichtigen Arbeit und zeigt den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Temperatur (Θ = absolute Temperatur in Celsiusgraden) und der Gleichgewichtskonzentration in Volumprozenten des Stickoxydes (NO), von atmosphärischer Luft ausgehend. Die Darstellung zeigt, dass es zur Erzielung hoher Stickoxydausbeuten zweckmässig ist, die Luft möglichst hoch zu erhitzen: die Kurve ver-

¹⁾ Unter Wärmetönung versteht man bekanntlich die Änderung der gesamten Energie eines chemischen Systems in Kalorien ausgedrückt; im vorliegenden Fall ist die Wärmetönung negativ, da der Prozess endotherm verläuft: zur Bildung von 1 Mol NO aus Stickstoff und Sauerstoff sind 21 600 Gramm Kalorien aufzuwenden. Die thermochemische Gleichung schreibt sich: $N_2 + O_2 = 2 NO - 2 \times 21 600$ Kalorien.

läuft nämlich nicht geradlinig; bei einer Arbeitstemperatur von nur 1700° C abs., die man technisch leicht durch elektrisch geheizte Platinröhren oder noch besser durch Röhren aus Oxyden, z. B. Aluminiumoxyd, Zirkonoxyd usw. realisieren könnte, ist die Stickoxydkonzentration etwa 25 mal geringer als bei 3800° C abs., die Grössenordnung der Lichtbogentemperatur; d. h. im ersten Fall müsste, um die gleichen Stickoxydmengen zu erzielen, von 15° C ausgehend, eine $25 \cdot \frac{1700 - (273 + 15)}{3800 - (273 + 15)} = 10$ mal grössere Energie angewendet werden.

Höhere Arbeitstemperaturen und Stickoxydausbeuten als mit, in festen Stromleitern erzeugter Joule'scher Wärme kann man zwar mit explosiven Gasgemischen erreichen, wie aus eingehenden Versuchen von Nernst, Häuser und anderen bekannt wurde; diese Arbeiten haben aber nicht zu einem technisch in grossem Massstabe verwertbaren Ergebnis geführt und dürften außerdem eher das Interesse von Ländern mit billigen brennbaren industriellen Abgasen oder Oelquellen beanspruchen.

In jedem Falle ist die Temperatur des elektrischen Lichtbogens weitaus die höchste, die man mit allen bis heute bekannten wissenschaftlichen und technischen Methoden zu erreichen vermag, und die Mittel zur Erzeugung eines für den Luftverbrennungsprozess geeigneten elektrischen Flammabogens sind im Prinzip die denkbar einfachsten. Die Temperatur eines Licht- oder Flammabogens liegt, wie bereits erwähnt, zwischen den Werten 3600° C und 4000° C abs., und zwar ist diese Temperatur vollkommen unabhängig von der Energieaufnahme desselben; so ist die Temperatur eines kleinen, mit wenigen Watt, z. B. an der Unterbrechungsstelle eines Schalters erzeugten Lichtbogens ebenso hoch als die Temperatur der Flammenscheibe eines technischen Stickoxydofens von einer Leistung von etwa 3000 kW.

Es sind aber trotzdem nicht alle Lichtbogenentladungen für den Prozess der Luftverbrennung gleich gut geeignet; das liegt daran, dass gerade durch die Verwendung der sonst günstigen, extrem hohen Arbeitstemperatur die Verwertung der gewonnenen, verhältnismässig hochprozentigen nitrosen Gase nur in mangelhafter Weise gelingt: Es wächst nämlich gleichzeitig mit der Temperatur auch die Reaktionsgeschwindigkeit des Prozesses (die oben besprochenen Werte v , v_1 und v_2) in unerwünschtem Masse an, wie aus der folgenden einfachen Ueberlegung über diese Grössen bei verschiedenen Temperaturen hervorgeht: Es war

$$v = v_2 - v_1 = k_2 \cdot C_{NO}^2 - k_1 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2}$$

Es sei zur Zeit $t = 0$ die Ausgangskonzentration des Stickoxydes mit a bezeichnet, und angenommen, es habe sich zur Zeit t bereits eine Menge x (Mol pro Volumeinheit) Stickoxyd wieder zersetzt; dann ist offenbar

$$v = \frac{dx}{dt} = k_2 (a-x)^2 - k_1 \left(C_{N_2} + \frac{x}{2} \right) \left(C_{O_2} + \frac{x}{2} \right)$$

Wenn nun v_1 sehr klein gegen v_2 ist, dass also die Reaktion wesentlich einseitig verläuft, ergibt sich:

$$v = \frac{dx}{dt} = k_2 (a-x)^2$$

$$k_2 = \frac{1}{t} \cdot \frac{x}{a(a-x)}$$

Jellinek bestimmte die Werte von k_2 und k_1 in Funktion von der Temperatur mit einer ähnlichen Apparatur, wie oben angegeben. In den Figuren 5 und 6 sind die Ergebnisse dieser Arbeit ebenfalls graphisch dargestellt.

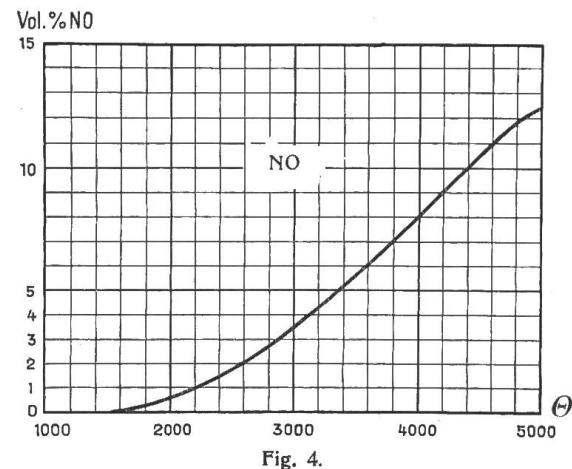


Fig. 4.

Die Fig. 5 stellt die Bildungsgeschwindigkeit von Stickoxyd aus atmosphärischer Luft bei verschiedenen Temperaturen Θ dar. Hierin bedeuten $t =$ die Zeiten in Minuten, die erforderlich sind, um in Luft von Atmosphärendruck die Hälfte des möglichen Stickoxydes zu bilden. Fig. 6 zeigt die Zerfallsgeschwindigkeit von reinem Stickoxyd bei verschiedenen Temperaturen Θ . Hierin bedeuten t die Zeiten in Minuten, die erforderlich sind, um reines Stickoxyd von Atmosphärendruck auf die Hälfte zu reduzieren.

Die Kurven zeigen, dass die kontinuierliche gleichzeitige Zersetzung und Neubildung des Stickoxydes im Gleichgewichtszustande bei Lichtbogentemperatur mit ausserordentlich

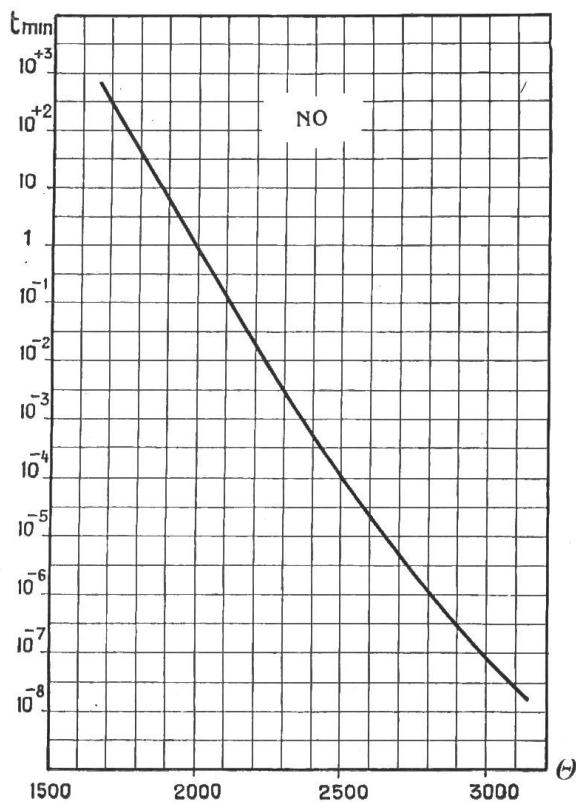


Fig. 5.

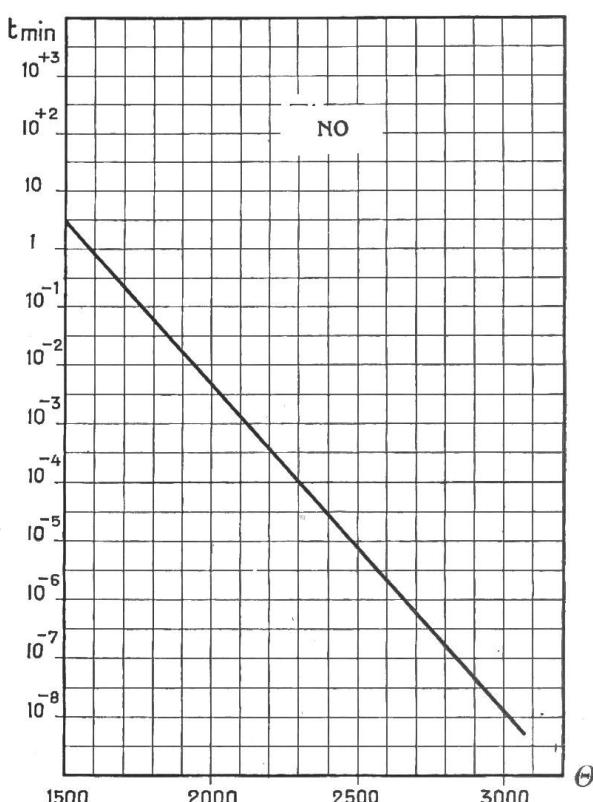


Fig. 6.

grossen Geschwindigkeiten erfolgen, so z. B. bei 3000° C abs., also einer Temperatur noch weit unter der Lichtbogentemperatur, sind diese Reaktionsgeschwindigkeiten schon der Grössenordnung 10^{-7} bis 10^{-8} Minuten. Es müssten also in einem Ofen zur Erzeugung von Stickoxyd in der Technik die Gase das Temperaturintervall von nur 3000° bis zu einer praktisch nicht mehr reaktionsfähigen Temperatur (nach Fig. 4 etwa 1500° abs.) in noch kürzerer Zeit als 10^{-8} Minuten durchlaufen, wenn ihr Gehalt an Stickoxyd nicht beträchtlich herabgesetzt werden soll. Strenggenommen müsste diese Abkühlung in unendlich kurzer Zeit erfolgen. Das ist natürlich unmöglich.

Bei näherer Betrachtung der Vorgänge, die sich in technischen Oefen im Allgemeinen zur Erzeugung von Stickoxyd abspielen, ergibt sich nun, dass die Einrichtung und Arbeitsweise dieser Oefen nur in mangelhafter Weise dem chemischen Prozess angepasst sind. Als ein Beispiel hierfür sei auf das besprochene *Birkeland'sche* Verfahren hingewiesen, das im wesentlichen in der Ausbreitung eines Hochspannungslichtbogens über eine ausserordentlich grosse, kreisrunde Scheibe von etwa 2 m Durchmesser beruht. Diese elektrische Flamme ist in einem entsprechend grossen Reaktionsraume untergebracht, durch den die zu behandelnde Luft hindurchgeführt wird. Man ist wohl vorerst bei oberflächlicher Betrachtung dieser imposanten, eine bläuliche, durchsichtige Scheibe darstellenden Erscheinung geneigt, das gesamte Volumen der Flamme als kontinuierlich chemisch aktiv zu bezeichnen. Diese Auffassung ist jedoch unzutreffend und lässt sich nicht mit den oben geschilderten Bedingungen vereinbaren, denn in reaktionskinetischem Sinne stellt

die Flamme einen sich, im Vergleich zu den grossen Reaktionsgeschwindigkeiten des Stickoxydes im Gleichgewichtszustande bei Lichtbogentemperatur, ausserordentlich langsam nach aussen dehnenden, wandernden Lichtbogen dar, dessen maximale lineare Ausdehnung in der Praxis eine Länge bis zu etwa 3—3,5 m erreicht. Dieser Lichtbogen, den man sich, vom thermodynamischen Standpunkt aus betrachtet, als einen äusserst hoch temperierten Faden vorstellen kann, bildet vorwiegend allein das aktive Element bei der Stickoxydbildung, dadurch, dass die diesen Lichtbogen bildenden Luftteilchen ausserordentlich hoch temperiert werden. (Gasanalytische Ausbeutebestimmungen an Stickoxyd-Ofen, bei denen die Gasprobe unmittelbar aus der Flamme oder aus dem Flammensaum entnommen werden, können daher keinen Anspruch auf Zuverlässigkeit machen; derartige, manchmal in der Praxis gemachte Bestimmungen der sogenannten „Flammenausbeute“ besagen gar nichts und führen zu Trugschlüssen über die wirkliche Ofenausbeute. Die Entnahmestelle der Gasproben ist zweckmässig in einer Entfernung von mindestens 5 m hinter dem Ofen im Abzugskanal anzuordnen.) Während der Reaktionszeit 10^{-8} Minuten hat derselbe, wie eine einfache Rechnung zeigt, bei einem Wechselstrom von 50 Perioden pro Sekunde nur etwa $\frac{1}{20\,000}$ seines einmaligen Weges über die sogenannte Flammenfläche zurückgelegt.

Es stellen also sowohl diese Flamme als auch der verbreiterte technische Lichtbogen im allgemeinen nichts wesentlich anderes dar, als eine optische Täuschung, die als solche, in ihrer räumlichen Ausdehnung betrachtet, mit dem synthetischen Aufbau des Stickoxydes nichts zu tun hat; im Gegenteil: je grösser unter sonst gleichen Verhältnissen das Flammenvolumen — die Fläche, über die sich der Lichtbogen verbreitert — ist, um so mehr wird das bereits gebildete Stickoxyd wieder zerstört.

* * *

Die obigen Ausführungen zeigen, dass es für die technische Luftverbrennung günstig ist eine grosse Lichtbogenenergie auf eine kleine Reaktionsfläche zu konzentrieren.

Um diesen Grundsatz in die Technik zu übertragen, ist noch zu berücksichtigen, dass für einen technischen Luftverbrennungsöfen, der zwecks Erzielung einer möglichst grossen Energie-Konzentration praktisch bis zu unbegrenzten Energiemengen belastbar sein soll, nur die Verwendung von Hochspannung in Frage kommt, da bei niedergespannten Starkstrom-Lichtbögen, zufolge der ausgedehnten Elektrodenflächen und der übermässigen Erhitzung des Elektrodenmaterials, dieses, durch Verdampfung und Zerstäubung, mit an der Reaktion Anteil nehmen und dieselbe in unerwünschter Weise beeinträchtigen würde. Die Verwendung von hochgespanntem Gleichstrom verbietet sich ebenfalls aus naheliegenden Gründen; es ist nämlich vorerst die Beschaffung dieser Stromart an sich schwieriger als die von hochvoltigem Wechselstrom; vor allem aber bedingt das ruhige Brennen des Gleichstrom-Lichtbogens bekanntlich die Vorschaltung eines ohm'schen Widerstandes der im günstigen Fall etwa 30 % der Maschinenergie nutzlos in Joule'sche Wärme umsetzt, wogegen der effektive Energieverbrauch einer zur Stabilisierung des Wechselstromlichtbogens verwendeten Drosselpule nur wenige Prozent der Ofenleistung beansprucht.

Die technischen Mittel, die zur Ausbildung eines energieführenden Hochspannungs-Wechselstrom-Lichtbogens und zur räumlichen Begrenzung der Entladungsfläche geeignet sind, ergeben sich, wie aus dem Nachstehenden hervorgeht, als eine natürliche Folgerung aus der Physik des Lichtbogens.

* * *

Wenn man die Augenblickswerte der Spannung e_1 eines Wechselstromlichtbogens und des Stromes i_1 , z. B. mittels eines Oscillographen, während der Zeitdauer einer Periode aufnimmt, so erhält man die in der Fig. 7 gezeigte *dynamische Charakteristik* des Wechselstromlichtbogens, d. h. das dem Wechselstromlichtbogen eigene und ihn daher „charakterisierende“ Verhältnis zwischen den Spannungs- und Stromwerten in einem beliebigen Zeitpunkt der Periode.

Jeder Stromleiter, ob fest, flüssig oder gasförmig, hat eine besondere Wechselstrom-Charakteristik; so zeigen z. B. die reinen Sinus-Kurven e_2 und i_2 (Fig. 7) das Verhältnis

zwischen der Klemmenspannung eines induktionsfreien ohm'schen Widerstandes, etwa eines metallischen Leiterstückes und der Stromstärke in jedem beliebigen Zeitpunkte der Periode. Es ist vorerst augenfällig, dass der Spannungsausgleich in der Form eines Lichtbogens wesentlich verwickelteren Gesetzmässigkeiten unterliegt als beim einfachen Widerstand, dessen Charakteristik sich ohne Schwierigkeit aus dem ohm'schen Gesetz deuten lässt.

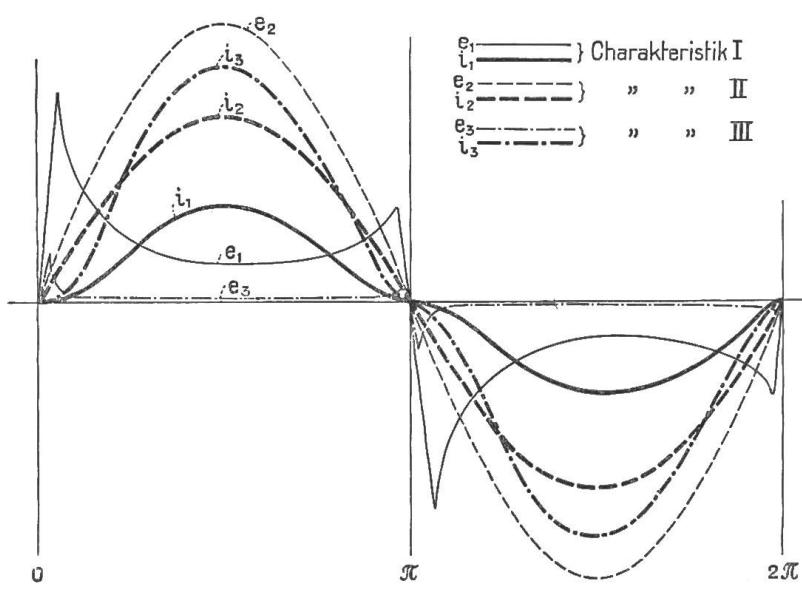


Fig. 7.

Mrs. Ayrton hat auf Grund eingehender Messungen die folgende empirische Beziehung zwischen der Spannung V und dem Strom I eines Lichtbogens aufgestellt:

$$V = a + \frac{b}{I}$$

(a und b sind Konstanten); aus derselben geht hervor, dass der Wert von V einen bestimmten Betrag a nicht unterschreiten soll, damit der Lichtbogen bestehen bleibt und ausserdem dass, im Gegensatz zum metallischen Leiter, bei zunehmender Stromstärke I die Lichtbogenspannung V abnimmt.

Man erklärt diesen Unterschied zwischen dem ohm'schen Stromleiter und dem Lichtbogen durch das Wesen der Elektrizität selbst. Nach der atomistischen Anschauung desselben gibt es bekanntlich, ausser den kleinsten, unteilbaren Bausteinen der chemischen Materie, den *Atomen*, noch als kleinste Teilchen die Elementarquanten der Elektrizität, die *Elektronen*, die sich von den chemischen Atomen neben ihrer wesentlich geringeren Masse ausserdem dadurch auszeichnen, dass sie eine bestimmte Elektrizitätsmenge (Ladung) darstellen; die Ladung eines Elektrons ist der Grössenordnung von $3 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten, und seine Masse wird als $8 \cdot 10^{-28}$ g angenommen.

Den elektrischen Stromdurchgang oder Spannungsausgleich in einem metallischen Leiterstück stellt man sich als einen Elektronenstrom, von der negativen Klemme ausgehend zur positiven, vor, wobei dem Durchströmen der Elektronen durch die Zwischenräume zwischen den chemischen Molekülen, aus denen das Leitermaterial besteht, ein Reibungswiderstand entgegenwirkt, der im ohm'schen Gesetz als ohm'scher Widerstand in die Erscheinung tritt; der dabei auftretende Reibungseffekt setzt sich in Wärme (= die Joule'sche Wärme) um. Die Grösse der Stromstärke ist von der Anzahl und der Geschwindigkeit der bewegten Elektronen, und die letztere unmittelbar von der angelegten Klemmenspannung abhängig, deren Feldstärke den Elektronen die zur Ueberwindung des Reibungswiderstandes notwendige Beschleunigung erteilt; d. h. der Strom wächst direkt proportional mit der Spannung; daher die einfache Charakteristik des metallischen Leiters.

Die Vorstellung über den Elektrizitätsdurchgang durch eine Luftstrecke in der Form eines Lichtbogens stützt sich auf die bekannte Annahme, dass die neutralen Gasmoleküle aus entgegengesetzt elektrisch geladenen Teilen bestehen, und zwar die negativen, die *Elektronen*, und die positiven, die mit der chemischen Masse des Atoms untrennbar verbunden sind und stets bleiben, die positiven *Jonen*.

Wenn man neutrale Moleküle durch irgend eine äussere Kraft in Elektronen und Jonen trennt, so wandern unter der Kraftwirkung eines elektrischen Feldes, z. B. wenn das Gas zwischen zwei Elektroden angeordnet ist, die negativen Ladungen zur positiven Elektrode, der Anode und die positiven Jonen zur negativen Elektrode, der Kathode.

Es sei schliesslich noch auf eine besondere Eigenschaft aller hellglühender Körper hingewiesen, nämlich dass dieselben nach dem bestimmten Gesetze $a\sqrt{T} e^{\frac{b}{T}}$ (a, b Kon-

stanten) Elektronen ausstrahlen. Wenn man sich jetzt als eine solche Elektronenquelle die hellglühende Spitze einer Kathode vorstellt, so gelangt man ohne weiteres zu der nachfolgenden Deutung des Lichtbogens und seiner Charakteristik.

In nächster Umgebung der Elektroden des Lichtbogens besteht eine durch Spannungsmessungen festgestellte ausserordentlich dünne, die Elektrodenspitzen umgebende Schicht, in der das Spannungsgefälle (Anoden- und Kathodenfall) im Verhältnis zum gesamten übrigen Teil der Gasstrecke sehr gross ist. Die von der vorerst als glühend angenommenen Kathode ausgestrahlten Elektronen erlangen nun unter dem Einfluss des Feldes der an den Elektroden angelegten Spannung eine hohe Geschwindigkeit und speichern beim Durchlaufen des Kathodenfalles so viel kinetische Energie auf, dass sie vom Ende dieser Schicht ab durch Stoss neutrale Moleküle der Gasstrecke in positive und negative Teile zu spalten vermögen (das Gas wird ionisiert, leitend); die positiven Jonen wandern, dem elektrischen Felde folgend, mit einer der Feldstärke desselben entsprechenden Geschwindigkeit, zur Kathode; beim freien Durchlaufen des Kathodenfalles erlangen dieselben ebenfalls einen Betrag an kinetischer Energie, der beim Aufprallen dieser Jonen auf die Kathode in Wärme umgesetzt wird und somit zur Erhaltung der für das Bestehen des Lichtbogens, also für die Emmission neuer, freier Elektronen notwendigen Glühtemperatur beiträgt. Die negativen Teile diffundieren nach der Anode hin und erhitzten dieselbe, ähnlich der oben geschilderten Weise, durch Abgabe ihrer beim Durchlaufen des Anodenfalls aufgespeicherten kinetischen Energie. (Die Temperatur der Anode ist eine für das Bestehen des Lichtbogens un wesentliche Grösse.)

Der Vorgang des Elektrizitätsdurchgangs durch eine Gasstrecke in der Form eines Lichtbogens wird dadurch noch wesentlich kompliziert, dass die, durch den Stoss eines Elektrons auf ein neutrales Molekül, neugebildeten elektrisch geladenen Teile, unter dem Einfluss des Spannungsfeldes, ihrerseits auf freie Weglängen kinetische Energie erlangen und durch Anprallen mit anderen neutralen Molekülen diese wieder zu spalten vermögen. Reaktionskinetisch ist diese Tatsache insofern von Bedeutung, als bei den kurzwelligen Elektronenschwingungen im ultravioletten Licht durch Elektronenstoss das Sauerstoffmolekül gespalten wird und daher anzunehmen ist, dass vermittels Jonenstoss auch eine Spaltung des Stickstoffmoleküls und die Bindung desselben zu NO oder noch hochwertigeren Oxydationsstufen, ohne Zufuhr äusserer Temperaturen durchaus im Bereiche der Möglichkeit liegt. Auf eine derartige, rein elektrische Wirkung deuten auch die bereits nachgewiesene Darstellung von $N_2 O_5$ durch stille Entladung in Gegenwart eines Kontaktkörpers, sowie die erfolgreichen Arbeiten des Engländer R. J. Strutt¹⁾ über eine mögliche Polymerisation des Stickstoffs zu N_8 hin.

Die in Fig. 7 gezeigte Wechselstrom-Lichtbogen-Charakteristik I (e_1 i_1) ergibt sich nun wie folgt: vom Anfang der Periode, die Zeitlinie 0, ausgehend, steigt die Elektroden spannung bis zu einem bestimmten Betrag, der sogenannten Durchbruchsspannung an, d. h. bis zur notwendigen Höhe, damit die vom vorhergehenden Stromwechsel noch vorhandenen Jonen eine genügend hohe Geschwindigkeit und somit kinetische Energie erlangen, um die jeweilige Kathode an irgend einer Stelle ihrer Oberfläche derart zu erhitzten, dass die Elektronenemission in verstärktem Masse einsetzt; diese wächst durch den nun spontan erfolgenden Jonenstoss zu derart hohen Werten an, dass die Leitfähigkeit der Gasstrecke plötzlich ansteigt und somit das Spannungsgefälle, das im inversen Verhältnis zur Leitfähigkeit der Gasstrecke steht, gleichzeitig abnimmt; da die Temperatur der nunmehr hocherhitzten Kathode vermöge ihrer Wärmekapazität nicht den momentanen Stromschwankungen folgen kann, also die Kathode gegen Ende des Stromwechsels noch Elektronen ausstrahlt und die Gasstrecke leitend erhält, so entspricht der gleichen Stromstärke gegen Ende des Stromwechsels ein niedrigeres Spannungsgefälle als vor dem Einsetzen der Elektronenemission beim Beginn des Stromwechsels.

Die eben besprochene Charakteristik I (e_1 , i_1) entspricht den typischen Verhältnissen einer mit Niederspannung gespeisten Wechselstrombogenlampe.

Wenn man nun die zwischen zwei festen Elektroden herrschende Feldstärke immer mehr erhöht, so steigt gleichzeitig hiermit die den Jonen erteilte Beschleunigung und dadurch die

¹⁾ R. J. Strutt, Proc. Roy. Soc. A. 85, 219, 377, 1911; 86, 56, 262; 87, 179, 1912.

Zahl der in der Zeiteinheit durch Stoss neu erzeugten Jonen: die Gasstrecke wird besser leitend und der scheinbare Widerstand des Lichtbogens sinkt zu immer kleineren Werten herab, und zwar bis zur annähernden Erreichung des Elektrodenfalles (Kathoden- und Anodenfall), der beim Wechselstromlichtbogen unter Verwendung von Metallelektronen etwa 150 Volt beträgt. Dieser Annahme entspricht die in Figur 7 gezeigte Charakteristik III (e_3, i_3); dieselbe ist die typische Charakteristik eines unter Lichtbogenbildung erfolgenden Kurzschlusses und ergibt sich stets dann, wenn die den Elektroden zugeführte Spannung den Betrag des Elektrodenfalles wesentlich überschreitet.

Die Erhöhung der Wattleistung des Lichtbogens erfordert also in diesem Fall die Erhöhung des scheinbaren Widerstandes des Bogens oder im Sinne der obigen Ueberlegung die Entionisierung der Gasstrecke, z. B. durch die bereits eingangs erwähnte elektromagnetische Beeinflussung oder Luftverblasung des Lichtbogens. Als praktisch weitaus wirksamstes Mittel hierfür hat sich die elektromagnetische, lineare Ausdehnung des Lichtbogens zu möglichst grossen Längen während der Dauer eines Stromwechsels erwiesen.

* * *

Zusammenfassend ergeben sich aus den obigen Ausführungen die folgenden Richtlinien für die Darstellung einer für die Zwecke der technischen Luftverbrennung geeigneten hochgespannten Wechselstromlichtbogens.

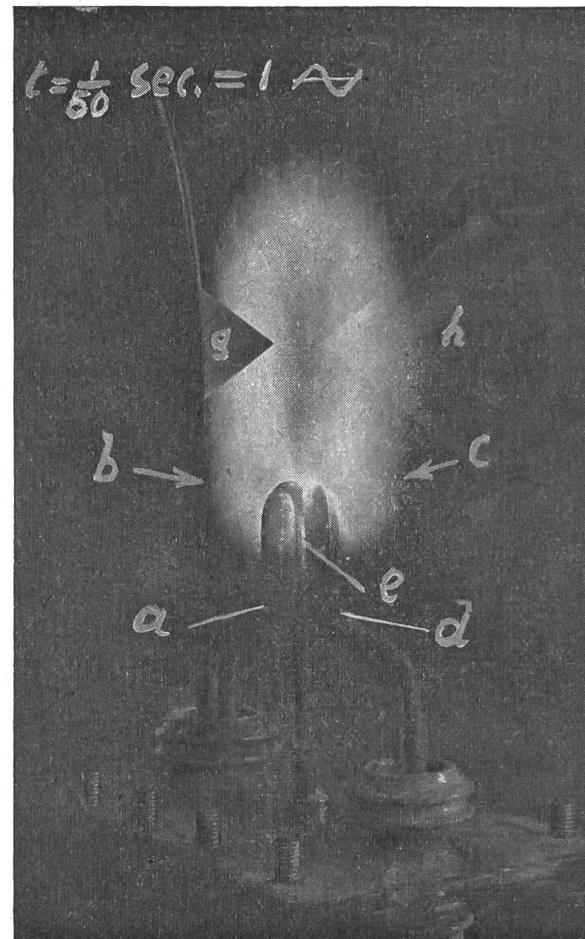
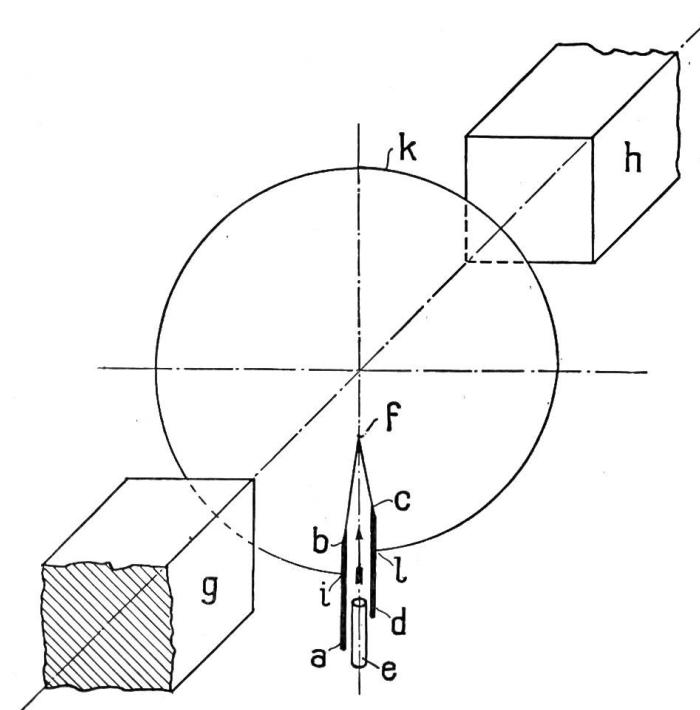


Fig. 8.

Es ist aus reaktionskinetischen Gründen günstig, um hohe Ausbeuten zu erzielen, das Verhältnis der Reaktionsfläche, über die sich der Lichtbogen während der Dauer einer Periode verbreitert, zur Lichtbogenenergie möglichst klein zu gestalten.

Anderseits ist es wünschenswert, den Wechselstrom-Lichtbogen während der Dauer eines Stromwechsels durch magnetische Beeinflussung linear möglichst lang auszuziehen,

um die Klemmenspannung des Lichtbogens nach erfolgter Zündung zu vergrössern und somit durch die Unterdrückung der kurzschiessenden Wirkung desselben zu brauchbaren elektrischen Betriebsverhältnissen zu gelangen.

In diesen beiden Anforderungen liegt ein Widerspruch, denn ein Lichtbogen lässt sich durch magnetische Beeinflussung nur dann zu grossen Längen ausziehen, wenn auch ein grosser Reaktionsraum, über den sich der Lichtbogen senkrecht zu seinen einzelnen Linienelementen verbreitern kann, zur Verfügung steht, d. h. unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen wächst mit der durch die Magnetwirkung erhöhten Lichtbogenspannung auch die Grösse des Reaktionsraumes. Von zwei magnetisch verlängerten und über eine Fläche verbreiterten Lichtbögen ist daher derjenige für die Zwecke der Luftverbrennung der besser geeignete, bei dem das Verhältnis der linearen Lichtbogenausdehnung zur Reaktionsfläche unter sonst gleichen Umständen am grössten ist.

Mit dem nachfolgend beschriebenen Verfahren ist eine technisch in grossem Massstabe durchführbare Möglichkeit gezeigt, einen hochgespannten Wechselstromlichtbogen zu beliebigen Längen linear auszuziehen und denselben über eine kleine Reaktionsfläche zu verbreitern.

Die Aufgabe wurde wie folgt gelöst:

Zwischen den sehr nahe zusammengeführten Elektroden ab und cd (Fig. 8 — siehe auch Fig. 1) wird ein hochgespannter Wechselstrom-Lichtbogen gezündet. Vermittels eines durch die Düse e geführten Luftstromes wird der Lichtbogen angeblasen und in den beiden Teilen bf und fc ausgezogen. In geeigneter Entfernung von den Elektrodenenden ist ein kräftiger Gleichstrom-Elektromagnet gh derart angeordnet, dass die Achse desselben parallel zu der Verbindungsleitung bc verläuft. Es wird dabei stets die relativ gegenseitige Stromrichtung der beiden Lichtbogenteile bf und fc in bezug auf die Kraftlinienrichtung des Magnetfeldes entgegengesetzt sein, unabhängig davon, ob die Elektroden an eine Gleich- oder an eine Wechselspannung gelegt sind.

Durch die Einwirkung des Magnetfeldes wird nun der so deformierte Lichtbogen bfc in der Form einer ausgedehnten, durch eine schraubenförmige Linie ikl begrenzten Fläche auseinander gebreitet. Entsprechend der jeweiligen Polarität der Elektroden wird sich diese Linie einmal rechtsgängig und einmal linksgängig in bezug auf die Kraftlinienrichtung ausbilden. Man hat es nun in der Hand, durch geeignete Wahl der Verhältnisse (Luftführung usw.), die Elektrodenenden b und c derart nahe aneinander zu bringen, dass der Schraubengang dieser Entladungsausbreitung nur wenige Millimeter beträgt, so dass man die ganze auf diese Weise gebildete Lichtbogenentfaltung in einem entsprechend engen Reaktionsraum unterbringen kann.

Im Hinblick darauf, dass die Flächenausdehnung der Entladungerscheinung bei gleicher linearer Lichtbogenausdehnung um das vierfache kleiner ist als bei einem Ofen nach dem Birkeland'schen System, wird man bei gleicher Breite des Reaktionsraumes und gleichbleibender, pro Zeiteinheit zu verarbeitender Luftmenge, mit der vierfachen Luftschnelligkeit durch den Reaktionsraum arbeiten können. Es wird also, mit anderen Worten, bei einer gegebenen Energie und Lichtbogenausbreitung die erstere auf einen vierfach kleineren Raum konzentriert, wodurch ein entsprechend steileres Temperaturgefälle und wirksamere Abkühlung der Reaktionsprodukte ermöglicht sind.

Vergleichende Messungen an einer unter den gleichen Bedingungen eingebauten Birkeland'schen Scheibe haben gezeigt, dass die Ausbeuten mit dem geschilderten Verfahren wesentlich höher sind.

Bisher wurde das Verfahren bis zu einer Dauerbelastung von nur 50 kW untersucht, da die elektrischen, an der Betriebsstelle zur Verfügung gestandenen Einrichtungen für grössere Belastung nicht geeignet waren.

Der in Fig. 1 gezeigte Lichtbogen wurde während einer Energieaufnahme von 60 kW bei 30 Sekunden Belichtung mit kleiner Objektiv-Blende, entsprechend 3000 Stromwechsel, photographisch aufgenommen. Die Flamme hat gegenüber der im Durchmesser doppelt

so grossen Birkeland'schen Scheibe ausserdem den Vorzug der wesentlich grösseren Stabilität, da sie von dem magnetischen Kraftfeld enger umschlossen wird; es gelingt z. B. ohne besondere Vorsichtsmassregeln, die Flamme dauernd zwischen zwei Chamottewänden, die nur 3 cm voneinander entfernt sind, in Betrieb zu halten; das ist für den technischen

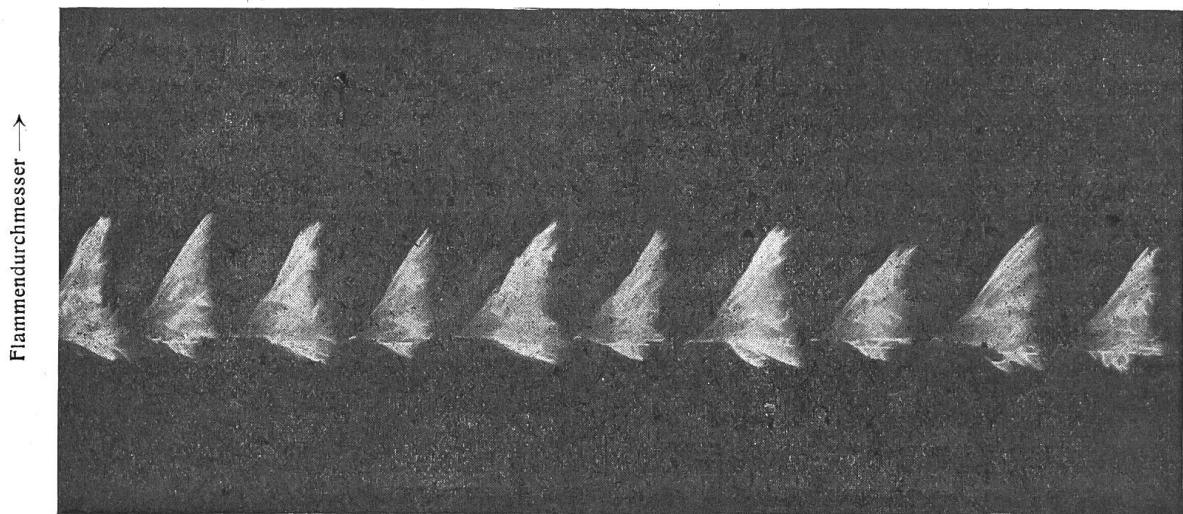


Fig. 9.

Zeit →

Betrieb insofern wichtig, als durch den engeren Einbau der Reaktionsraum noch erheblich verkleinert wird.

Der Durchmesser der Flammenscheibe beträgt bei einer Energieaufnahme von 60 kW etwa 50 cm; das entspricht einer linearen Lichtbogenausdehnung von $0,5 \pi = \text{ca.}$

1,6 m. Es hat sich gezeigt, dass das Verhältnis zwischen Energieaufnahme und Flammendurchmesser von der Netzspannung nicht wesentlich beeinflusst wird; es war nämlich der Durchmesser sowohl bei 5000 Volt als auch bei 10,000 Volt Netzspannung, und zwar bei gleicher Energieaufnahme und Phasenverschiebung der gleiche. Bei kurz andauernden Ueberlastungen der Nebenapparate wurde dem Lichtbogen bis 95 kW zugeführt; hierbei vergrösserte sich der Durchmesser der Flammenscheibe bis zu etwa 70 cm, entsprechend einer Lichtbogenlänge von $0,7 \pi = 2,2 \text{ m.}$ — Es ist zu erwarten, dass bei einer Lichtbogenbelastung von 1000 kW der Flammendurchmesser etwa 1 m betragen wird. —

Ueber die Verlängerung des Lichtbogens während der Dauer eines Stromwechsels geben die Figuren 9 und 10 Aufschluss. Die

erste stellt die photographische Aufnahme eines 45 kW Lichtbogens dar, durch einen drehenden Spiegel gesehen, dessen Drehachse in der gleichen Ebene der Flammenscheibe angeordnet war. Die Aufnahme zeigt in idealer Gleichmässigkeit den vollkommenen Ver-

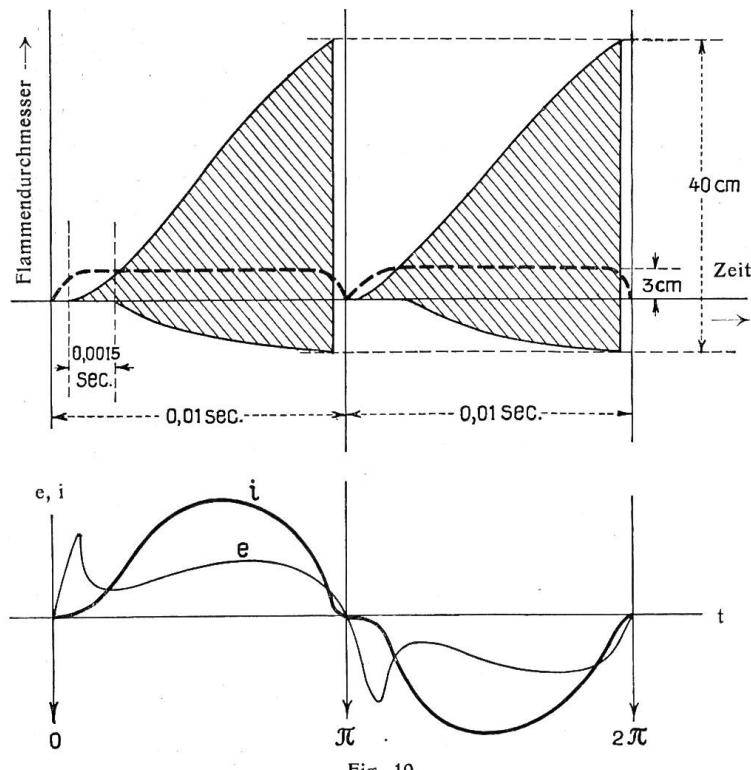


Fig. 10.

lauf der Lichtbogenzündung, der Verlängerung und des Erlöschens während der Zeitdauer von 10 Stromwechseln. Die Fig. 10 zeigt das gleiche Bild, während der Dauer von zwei Stromwechseln zeichnerisch vergrössert und unterhalb desselben, die durch eine gleichzeitige oscillographische Aufnahme während dieser Zeitdauer ermittelte dynamische Charakteristik des Lichtbogens. In der letzteren ist vorerst der unterschiedliche Verlauf der Spannungslinie e zu der oben besprochenen Spannungskurve ei der Charakteristik einer

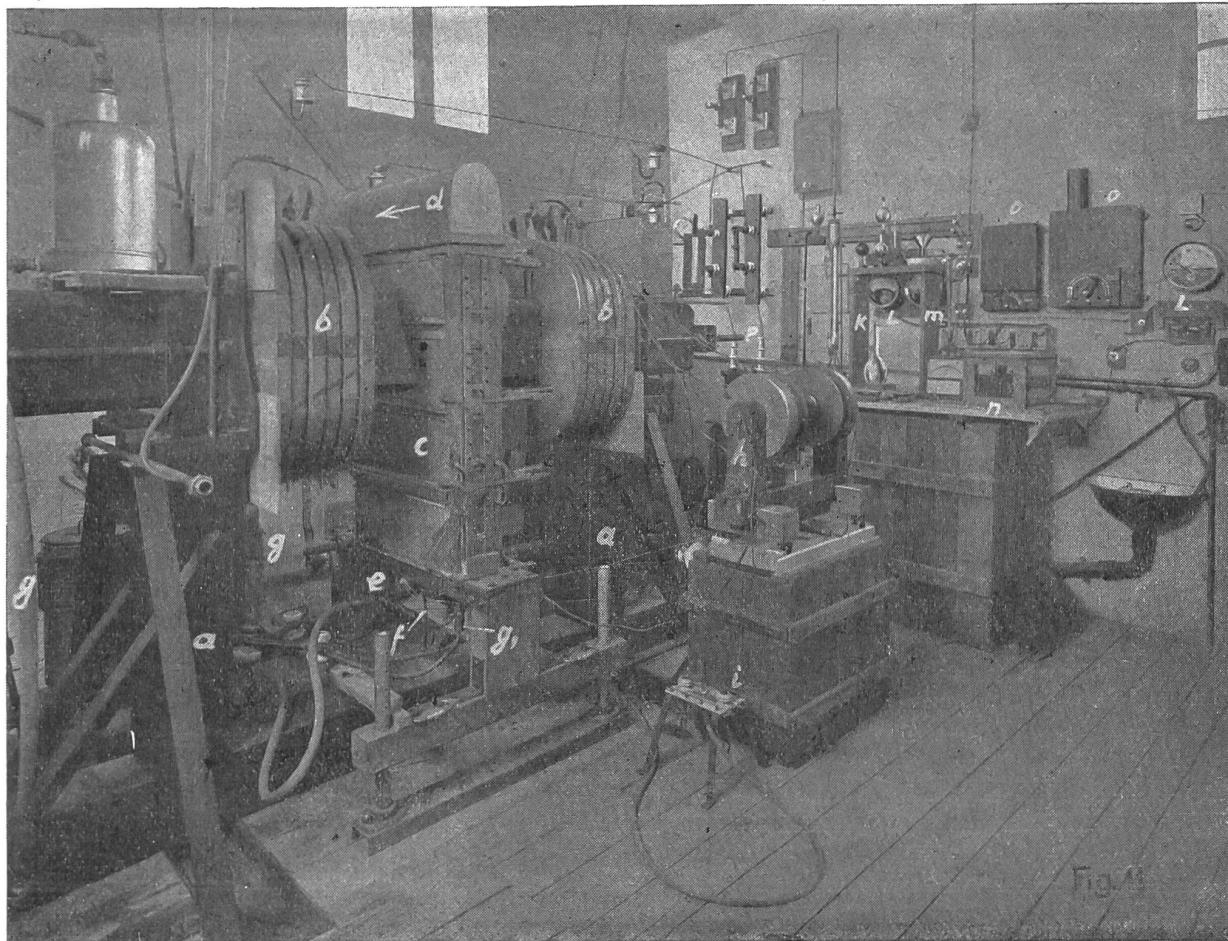


Fig. 11.

a = Magneteisen; b = Magnetspulen (blankes Aluminiumband); c = Ofen (die Chamottesteine sind in Messingrahmen zusammengehalten); d = Gasabzugskanal; e = Hauptluftzufuhr; f = Düsenluft; g = Wasserwiderstände für Elektrodenkühlung g^1 ; h = kleiner Laboratoriumsmagnet; i = Elektoden-gestell zu h; k = Gasanalytische Apparate; l = Spannungsmesser; m = Strommesser; n = Wattmeter (an die Hochspannung gelegt); o = Widerstände zur Regelung des Nebenschlusses der Gleichstromdynamo zur Speisung der Magnetspulen; p = Spannungswandler.

Wechselstrombogenlampe I (e_1 , i_1) in Fig. 7 auffallend; es fehlt nämlich darin die gegen das Ende des Stromwechsels ausgesprochene kurze Spannungserhöhung, dagegen steigt die Spannung des magnetisch verlängerten Lichtbogens nach der sprungweisen Ueberwindung der Durchbruchspannung, durch die dauernde Vergrösserung des scheinbaren Lichtbogenwiderstandes veranlasst, stetig zu beträchtlichen Werten an.

In der schematischen Wiedergabe des Spiegelbildes wurde parallel zur Abscisse eine gestrichelte Linie eingezeichnet; diese stellt das, ebenfalls durch eine photographische Aufnahme ermittelte, Spiegelbild des Lichtbogens dar, wenn unter sonst gleichbleibenden Betriebsverhältnissen der die Entladung beeinflussende Magnet gh (Fig. 1 und 8) ausgeschaltet wurde. Die gestrichelte Linie zeigt die Höhe f bis zu welcher die Düsenluft den bei b—c gezündeten Lichtbogen in der für die magnetische Einwirkung notwendigen spitzen Form

verbläst; mit Hilfe der Ordinate des Schnittpunktes dieser Linie mit derjenigen, welche die jeweilige Flammenhöhe unter normalen Betriebsverhältnissen anzeigt (die Hypotenuse der schraffierten Dreiecke), lässt sich die Zeitdauer zwischen der Lichtbogenzündung und der magnetischen Beeinflussung desselben graphisch bestimmen (etwa 0,0015 Sekunde), ein Faktor, der für die Projektierung grösserer Ofentypen dieser Art von wesentlicher Bedeutung ist.

Die, durch den unsymmetrischen Spannungsverlauf während eines Stromwechsels bedingte, sogenannte Lichtbogenhysterese führt bekanntlich bei allen Wechselstrom-Lichtbögen zu einem bestimmten Verhältnis S der Wattleistung W des Lichtbogens zu dem Produkt der effektiven Lichtbogenspannung E_e mit der Stromstärke I_e ; $(S = \frac{W}{E_e \cdot I_e} < 1)$. Dieser Wert S ,

der in der Praxis manchmal irrtümlicher Weise als gleichbedeutend mit dem cosinus eines, in Wirklichkeit nicht vorhandenen, Phasenverschiebungswinkel zwischen der Lichtbogenspannung und dem Strom bezeichnet wird, liegt bei dem Flammbo gen der geschilderten Art zwischen den Zahlen 0,96 — 0,98.

Es mögen noch die nachfolgenden elektrotechnischen Angaben, die sich auf die Figuren 9 und 10 beziehen, interessieren. Es waren hierbei:

Die Flammenenergie = 45 kW.

Die Netzspannung = 10,000 Volt.

Die Lichtbogenspannung = 5600 Volt.

Der durch die, dem Lichtbogen vorgesetzten, Drosselpule bedingte Leistungsfaktor der gesamten Anlage (Phasenverschiebung zwischen Netzspannung und Strom) $\cos \varphi = \text{ca. } 0,6$.

Die Stärke des Magnetfeldes in der Achse gemessen: $B = 5500 \text{ pro cm}^2$.

Eine Gleichstromkomponente ist nicht vorhanden.

Die Fig. 11 zeigt ein für Messungen an magnetisch beeinflussten Lichtbögen geeignetes, verstellbares Magnetgestell. Zur Zeit der Aufnahme war ein Ofen der oben beschriebenen Art in demselben eingebaut. Der gezeigte Magnet eignet sich für eine Lichtbogenleistung bis zu 1500 kW.

Miscellanea.

Inbetriebsetzung von schweizerischen Starkstromanlagen. (Mitgeteilt vom Starkstrominspektorat des S. E. V.) In der Zeit vom 20. September bis 20. Oktober 1918 sind dem Starkstrominspektorat folgende wichtigere Anlagen als betriebsbereit gemeldet worden:

Hochspannungsfreileitungen.

Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau. Provisorische Leitung zur Transformatorenstation im Fohrenmoos bei Althäusern (Bezirk Muri), Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerk Altdorf, Altdorf. Temporäre Leitungen zu den Transformatorenstationen in Wattingen und beim Pfaffensprung in Wassen, Drehstrom, 14 300 Volt, 48 Perioden. Leitung zur Sauerstofffabrik der Eidg. Munitionsfabrik in Altdorf, Drehstrom, 4150 Volt, 48 Perioden.

Elektrizitätswerk Ursen, Andermatt. Leitung für die Speckstein- und Serpentinausbeutungs-

anlage in der Grube bei Hospenthal, Drehstrom, 3100 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerk des Kantons Thurgau, Arbon. Leitung nach Ristenbühl (Gemeinde Matzingen), Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Azienda elettrica comunale, Bellinzona. Linea ad alta tensione presso la centrale Morobbia (Comune di Camorino), corrente trifase, 5000 volt, 50 periodi.

Bernische Kraftwerke A.-G., Betriebsleitung, Bern. Leitungen zu den Transformatorenstationen Hinter-Schwandbach bei Wasen (Gemeinde Sumiswald) und Hornbach, Drehstrom, 4000 Volt, 40 Perioden.

Società Elettrica delle Tre Valli, S. A., Bodio. Linea ad alta tensione a Cavagnago, corrente monofase, 5000 volt, 50 periodi.

Elektrizitätswerk Lanza, Brig. Leitung zur Stangen-Transformatorenstation beim Alkohollager Visp, Drehstrom, 15 000 Volt, 50 Perioden.