

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 4 (1931)  
**Heft:** II

**Artikel:** Zur Frage des auf die Kathode eines Lichtbogens ausgeübten Druckes  
**Autor:** Risch, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-110036>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 25.04.2025

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

## Zur Frage des auf die Kathode eines Lichtbogens ausgeübten Druckes

von R. Risch.

(3. IV. 31.)

Zusammenfassung. R. TANBERG<sup>1)</sup> und E. KOBEL<sup>2)</sup> haben in der *Physical Review* Arbeiten über die Geschwindigkeit des Dampfes veröffentlicht, der der Kupfer- bzw. Quecksilberkathode eines im Vakuum brennenden Lichtbogens entströmt, und Geschwindigkeiten von  $10^6$  bis  $4 \cdot 10^6$  cm/sec erhalten. Die Berechnung dieser Geschwindigkeit erfolgte in beiden Fällen aus der auf die Kathode ausgeübten Kraft und der verdampfenden Kupfer- bzw. Quecksilbermenge. Die gefundenen Geschwindigkeiten entsprechen beim Kupferdampf gaskinetisch einer Temperatur von rund  $500\,000^\circ\text{K}$  und beim Quecksilberdampf von rund  $9\,000\,000^\circ\text{K}$ . Bei der Annahme von einfach geladenen Atomen entsprechen diese Geschwindigkeiten rund 80 bzw. 1000 Volt. Die Höhe dieser Spannungen spricht dagegen, dass die gefundenen Geschwindigkeiten dadurch zustande kommen, dass die Dampfmoleküle geladen sind und im elektrischen Feld beschleunigt werden. Es werden weitere Betrachtungen über das Ergebnis der Versuche von TANBERG und von KOBEL angestellt und eine Erklärung von K. T. COMPTON<sup>3)</sup> über das Zustandekommen der gemessenen an der Kathode auftretenden Kraft zurückgewiesen.

R. TANBERG<sup>1)</sup> hat vor einiger Zeit eine Arbeit über die Geschwindigkeit des Kupferdampfes veröffentlicht, der der Kupferkathode eines im Vakuum brennenden Bogens entströmt. Er berechnet diese Geschwindigkeit auf zwei verschiedene Arten: erstens aus der auf die Kathode ausgeübten Reaktionskraft und der sekundlichen Masse des die Kathode verlassenden Kupferdampfstrahles, die er aus der Gewichtsabnahme der Kathode be-

<sup>1)</sup> TANBERG, Phys. Rev. Bd. **35**, S. 1080 (1930).

<sup>2)</sup> KOBEL, Phys. Rev. Bd. **36**, S. 1636 (1930).

<sup>3)</sup> K. T. COMPTON, Phys. Rev. Bd. **36**, S. 706 (1930).

stimmt, und zweitens aus dem Druck, den eine der Kathode gegenübergestellte Scheibe erfährt, und der sekundlichen Masse des auf diese auftreffenden Kupferdampfstrahles, die er aus der Gewichtszunahme der Scheibe ermittelt. Beide Methoden lieferten ungefähr das gleiche Resultat und zwar eine ausserordentlich hohe Geschwindigkeit: nämlich  $1,5 \cdot 10^6$  cm/sec. Dieser Wert entspricht nach der gaskinetischen Beziehung einer Temperatur von rund  $500\,000^\circ$  K. Dagegen, dass diese hohe Geschwindigkeit auf elektrischem Wege dadurch zustande kommt, dass die Kupfermoleküle negativ geladen sind und daher im elektrischen Feld beschleunigt werden, spricht die Tatsache, dass unter der Annahme von einfach geladenen Kupfermolekülen eine Spannung von rund 80 Volt nötig wäre, um die erforderliche Geschwindigkeit zu erzielen, d. h. eine Spannung, die bei den Versuchen wahrscheinlich nicht vorhanden war. In der Arbeit von TANBERG fehlen leider Angaben über die aufgetretene Bogenspannung, NOTTINGHAM<sup>1)</sup> hat jedoch bei einem Kupferdampflichtbogen eine Bogenspannung von 20,5 Volt gemessen.

Über den gleichen Gegenstand wie TANBERG hat E. KOBEL<sup>2)</sup> Versuche durchgeführt mit dem einzigen Unterschied, dass es sich bei ihm nicht um einen Kupfer-, sondern um einen Quecksilberdampflichtbogen handelte. Er hat die Geschwindigkeit des die Quecksilberkathode verlassenden Quecksilberdampfes in ganz analoger Weise wie TANBERG aus der verdampfenden Quecksilbermenge und dem ausgeübten Reaktionsdruck berechnet und Geschwindigkeiten erhalten, die sogar noch höher sind als diejenigen, die TANBERG gefunden hat. Da die Quecksilbermoleküle rund dreimal schwerer sind als die Kupfermoleküle, so entspricht die von KOBEL gefundene maximale Geschwindigkeit einer gaskinetischen Temperatur von  $9 \cdot 10^6$  K und einer Spannung von rund 1000 Volt. Da ferner der Kathodenfall eines Quecksilberbogens rund 10 Volt beträgt, so müssten Quecksilbermoleküle 100-fach ionisiert sein, um die gefundene Geschwindigkeit durch Beschleunigung in einem elektrischen Feld zu bekommen. Es kann somit mit Sicherheit geschlossen werden, dass die bei den Versuchen von TANBERG und von KOBEL zutage getretene hohe Geschwindigkeit nicht auf diese Weise zustande kommt. K. T. COMPTON<sup>3)</sup> hat die folgende Erklärung für die Befunde von Tanberg veröffentlicht. Er ist der Ansicht, dass auf die Kathode dadurch ein Druck zustande kommt, dass die auf die Kathode zufliegenden positiven Ionen nach der Neutralisation

---

<sup>1)</sup> NOTTINGHAM, J. Frank. Inst. Bd. **207**, S. 301 (1929).

<sup>2)</sup> KOBEL, Phys. Rev. Bd. **36**, S. 1636 (1930).

<sup>3)</sup> K. T. COMPTON, Phys. Rev. Bd. **36**, S. 706 (1930).

beim Aufprall auf dieselbe sie mit einer gewissen Geschwindigkeit wieder verlassen und dadurch eine Reaktionskraft auf sie ausüben. Er rechnet nach, dass wenn die Ionen beim Zusammenprall mit der Kathode auch nur 2% ihrer Energie beibehielten, sie den von TANBERG gemessenen Druck ausüben würden. Die Energie der Ionen berechnet er aus den auf Grund der Messungen von NOTTINGHAM und anderer Versuche gemachten Annahmen, dass der Kathodenfall bei den Versuchen von TANBERG 20 Volt betrug, und dass der Strom an der Kathode zur Hälfte durch positive Ionen getragen wird. Das Grundlegende der Ausführungen von COMPTON ist somit folgendes: TANBERG hat in seiner Rechnung nicht die richtige Masse eingesetzt; die wirkliche auf die Kathode einen Druck ausübende Masse ist viel grösser und ihre Geschwindigkeit daher viel kleiner. Es scheint mir aber, dass COMPTON mit seinen Ausführungen nicht recht hat und die Schwierigkeiten, die die Erklärung der Resultate der Arbeiten von TANBERG und von KOBEL wegen der gefundenen hohen Geschwindigkeit bereiten, nicht beseitigt; und zwar aus folgendem Grunde.

Die von der Kathode mit einer bestimmten Geschwindigkeit wegfliegenden und auf dieselbe eine Reaktionskraft ausübenden Moleküle können in zwei Gruppen eingeteilt werden: die einen (Gruppe 1), kehren nicht mehr auf die Kathode zurück, die anderen (Gruppe 2), hingegen kommen, nachdem sie in der Entladung ionisiert worden sind, wieder zur Kathode zurück. Es gibt natürlich auch Moleküle, die ohne ionisiert zu werden lediglich wegen Zusammenstößen mit anderen Molekülen auf die Kathode zurückkehren und wieder andere, die, trotzdem sie ionisiert werden, nicht zur Kathode zurückkommen, wir wollen aber bei der folgenden Überlegung der Einfachheit halber von diesen beiden letzteren Molekülgruppen absehen, weil dadurch ihre Richtigkeit nicht beeinträchtigt wird. Die folgenden Überlegungen gelten natürlich nicht für jedes einzelne Molekül, weil wegen vielfachen Zusammenstößen mit anderen Molekülen jedes einzelne von ihnen einen vollkommen unübersehbaren Weg zurücklegt, sondern nur für das Mittel der Moleküle. Die Moleküle der Gruppe 1 üben nun tatsächlich eine Reaktionskraft auf die Kathode aus. Diese Moleküle geben den ihnen von der Kathode erteilten Impuls nicht wieder an diese sondern letzten Endes an die der Kathode gegenüberliegende Wand des Entladungsgefässes ab. Ihre Reaktionskraft wird somit nicht wieder kompensiert. Die Reaktionskraft der Moleküle der Gruppe 2, d. h. derjenigen, die zur Kathode wieder zurückkehren, wird jedoch dadurch wieder kompensiert, dass diese Moleküle wegen ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit von der Kathode

weg nach ihrer Ionisation als Ionen eine längere Zeit im Raum vor der Kathode verweilen und als solche länger eine Anziehungskraft auf die letztere ausüben, als wie wenn sie diese Anfangsgeschwindigkeit nicht hätten. Bei Ionen, die bei der Ionisation keine Geschwindigkeit senkrecht zur Kathodenoberfläche haben, kompensiert sich diese Anziehungskraft gerade mit der Kraft, die sie nachher beim folgenden Aufprall auf die Kathode auf diese ausüben, vorausgesetzt, dass sie nach dem Zusammenstoss die Kathode mit der Geschwindigkeit null verlassen. Haben jedoch die Moleküle bei der Ionisation einen von der Kathode weg gerichteten Impuls, so verweilen sie als Ionen länger vor der Kathode, und die dabei auf diese ausgeübte Anziehung ist daher grösser als die Druckkraft, die sie beim folgenden Aufprall auf die Kathode ausüben. Und dieses zu viel an Anziehung ist genau gleich gross wie die Abstossung, die sie vorher auf die Kathode ausgeübt haben, als sie sie mit einer Geschwindigkeit, die grösser als null war, verliessen. Es kann sich somit an der Kathode nur der Reaktionsdruck derjenigen Moleküle bemerkbar machen, die die Kathode verlassen ohne zu ihr wieder zurückzukommen. Die Masse dieser Moleküle kann nun aber, wie es TANBERG und KOBEL gemacht haben, einfach aus dem Materialverlust der Kathode bestimmt werden. Es scheint somit vorderhand, solange keine bessere Deutung dieser Versuchsergebnisse vorliegt, so zu sein, dass die die Kathode verlassenden Moleküle tatsächlich die oben angegebene hohe Geschwindigkeit haben. Wie diese Geschwindigkeit zustande kommt, bedarf allerdings noch einer Erklärung. Der Zweck dieses Artikels ist, weitere Untersuchungen dieses Problems anzuregen.

Das Ergebnis der Messungen von TANBERG wird, wie oben erwähnt, durch seine Messungen des Druckes auf eine der Kathode gegenüberliegende Scheibe bestätigt. Diese letzten Versuche scheinen auf den ersten Blick nicht so einwandfrei zu sein wie diejenigen bezüglich der auf die Kathode selbst ausgeübten Kraft. Denn es ist denkbar, dass lange nicht alle auf die Scheibe gelangenden Kupfermoleküle an ihr sublimieren und haften bleiben, und dass daher die Masse des zu ihr gelangenden Kupferdampfes viel grösser als die aus der Gewichtszunahme bestimmte ist, und die Geschwindigkeit des Dampfes daher viel kleiner ist. Die folgende Nachrechnung liefert jedoch eine Stütze für die Annahme, dass der grösste Teil des zur Scheibe gelangenden Kupferdampfes an ihr tatsächlich sublimiert und haften bleibt. Man kann nämlich annehmen, dass die die Kathode ganz verlassenden Kupfermoleküle annähernd nach dem Cosinusetz verteilt sind. Es lässt sich dann aus der die Kathode verlassenden Kupfermenge diejenige berechnen, die zu



der gegenüberliegenden Scheibe gelangt. Führt man diese Rechnung auf Grund der Angaben von TANBERG durch, so erhält man tatsächlich die sich an der Scheibe niederschlagende Menge. Es scheint somit, dass sich tatsächlich praktisch alles sublimiert, was auf die Scheibe auftrifft.

Es sei noch erwähnt, was für Korrekturen man an der an der Kathode gemessenen Kraft bei der Berechnung der Geschwindigkeit des Dampfes anzubringen hat.

1. Strahlungsdruck. Dieser beträgt jedoch trotz der sehr starken Lichtintensität im Kathodenfleck nach der Untersuchung von TANBERG nur einige Promille des gemessenen Druckes.

2. Elektrodynamische Kraft. Diese setzt sich aus zwei Teilen zusammen: aus der Kraft, die auf die Stromzuführung zur Kathode ausgeübt wird und daher ganz von der Form des Bogenstromkreises abhängig ist, und aus dem Druck, der durch die Verengung des Stromquerschnittes und der dabei auftretenden Divergenz und Konvergenz der Stromfäden im Kathodenfleck verursacht wird. TANBERG hat offenbar nur die erste Kraft berücksichtigt und für sie bei seiner Anordnung durch Rechnung 2,5 bis 8% der gemessenen Kraft erhalten. Die zweite Kraft lässt sich wegen der Unkenntnis des magnetischen Feldes in der Umgebung einer Verengung des Stromquerschnittes nur abschätzen. Die Abschätzung kann etwa so erfolgen, dass man annimmt, der Querschnitt ändere sich plötzlich von demjenigen des Kathodenflecks auf denjenigen des Bogens, und dass das magnetische Feld radial um den Kathodenfleck gleich ist demjenigen in der Umgebung eines Leiters vom Durchmesser des Kathodenflecks, und dass das Feld radial um den Bogen gleich ist demjenigen um einen Leiter vom Durchmesser des Bogens. Die zwischen der Kathode und dem Bogen auftretende Abstossung lässt sich dann aus der Energiezunahme des magnetischen Feldes berechnen, die bei einer Ausdehnung des Kathodenflecks in Richtung des Stromes, d. h. senkrecht zu seiner Ebene, erfolgen würde. Der Durchmesser des Kathodenflecks lässt sich z. B. aus der Angabe von GÜNTHERSCHULZE<sup>1)</sup> für einen Kathodenfleck auf Eisen bei Atmosphärendruck (Stromdichte = 72 Amp/mm<sup>2</sup>) abschätzen. Man bekommt auf diese Weise bei 30 Amp. Bogenstrom rund 5% der von TANBERG gemessenen Kraft. Ferner lässt sich diese Kraft aus derjenigen abschätzen, die aus dem gleichen Grunde wie an der Kathode eines Bogens an den Kontakten von Hochstromschaltern beim Einschalten auf einen Kurzschluss auftritt. Man kommt dabei auf rund 1% der von TANBERG und von KOBEL

<sup>1)</sup> GÜNTHERSCHULZE, Zeitschr. f. Phys. Bd. II, S. 74.

gemessenen Kraft, wobei dieser Wert eher zu hoch ist, weil im Kathodenfleck die Verengung des Stromquerschnittes eher schwächer ist als an den Kontakten von Hochstromschaltern beim Einschalten. Um für die Grösse dieser elektrodynamischen Kraft an der Kathode weitere Anhaltspunkte zu bekommen, sind ferner von mir im Physikal. Laboratorium der A. G. Brown, Boveri & Co., Baden, Kontrollversuche durchgeführt worden, die ebenfalls das Ergebnis zeitigten, dass diese Kraft nur eine unbedeutende Korrektur an der von TANBERG und von KOBEL gemessenen Kraft bedeuten könnte.

3. Reaktionsdruck der von der Kathode wegfliegenden Elektronen. Dieser Druck ist von der sekundlichen Masse ( $m$ ) des Elektronenstroms, vom Elektronenstrom ( $I$ ) und vom Kathodenfall ( $E$ ) wie folgt abhängig:

$$K = \sqrt{2 m I E}.$$

Nimmt man mit COMPTON an, dass der Strom an der Kathode zur Hälfte von Elektronen getragen wird, und dass der Kathodenfall im Falle von TANBERG 20 Volt betrug, so bekommt man für diesen Fall eine Kraft, die rund 5% der von TANBERG gemessenen ausmacht. Bei einem Quecksilberbogen bekommt man bei 10 Volt Kathodenfall rund 1% der von KOBEL gemessenen Kraft.

4. Gasdruck und Druck der positiven Ionen, die aus der positiven Säule in das Gebiet des Kathodenfalles gelangen. Der Gasdruck kommt dadurch zustande, dass die in den Kathodenfleck oder in das Gebiet des Kathodenfalls<sup>1)</sup> mit einer bestimmten Temperaturgeschwindigkeit gelangenden Gasmoleküle dieses Gebiet mit einer grösseren Geschwindigkeit wieder verlassen, weil das Gebiet des Kathodenfalles voraussichtlich wärmer ist als seine Umgebung. Die durch ungeordnete Bewegung aus der positiven Säule in das Kathodenfallgebiet gelangenden positiven Ionen können hier zusammen mit den neutralen Molekülen betrachtet werden, weil sie entsprechend dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnis ungefähr die gleiche Temperatur haben wie die letzteren und einen Teil der letzteren darstellen. Die Rechnung zeigt, dass dieser durch die Gasmoleküle und die Ionen ausgeübte Druck wegen der starken Gasverdünnung bei den Versuchen von KOBEL und von TANBERG noch viel kleiner ist als der oben erwähnte Elektronendruck.

---

<sup>1)</sup> Das ganze Gebiet des Kathodenfalles muss bei dieser Überlegung mechanisch als Kathode betrachtet werden, weil es seine Lage gegenüber der Kathodenoberfläche nicht ändert und allen Verschiebungen der letzteren senkrecht zu sich selbst folgt.

Alle Korrekturen zusammen machen somit höchstens 20% der gemessenen Kraft aus. Da ausser den erwähnten Vorgängen offenbar keine anderen an der Kathode auftreten, die auf dieselbe einen Druck ausüben könnten, so müssen die übrigen mindestens 80% der gemessenen Kraft von dem die Kathode verlassenden Kupfer- bzw. Quecksilberdampf herrühren. Da man jedoch bei der Erklärung der Geschwindigkeit dieses Dampfes als Temperaturgeschwindigkeit auf ungewöhnlich hohe Temperaturen kommt, so ist diese ganze Frage vorläufig noch durchaus nicht abgeklärt.

Herrn Dr. F. LÜDI möchte ich für seine Hilfe bei der Untersuchung dieser Fragen auch an dieser Stelle danken.

---