

MHD-Instabilitäten im Verdampfungsstadium elektrisch stoßaufgeheizter Drähte

H. Jäger und H. J. Siebke

Institut für Experimentalphysik der Universität Kiel
(Z. Naturforsch. **28 a**, 1738–1739 [1973]; eingegangen
am 19. Juli 1973)

The well known striation effect observable during the evaporation process of exploding wires is of MHD-origin even in cases of very fine striation structures. This has been proved by application of an axial magnetic field which has a considerable influence on the effect.

Die elektrische Stoßaufheizung metallischer Körper stellt einen sehr einfachen Weg zur Erzeugung und Untersuchung extrem dichter Plasmen dar. Die Erreichung von Temperaturen oberhalb etwa 10^4 Grad bei einigermaßen überschaubaren geometrischen Verteilungen der Plasmamparameter wird wesentlich durch den Effekt der sogenannten „Schichtenbildung“ behindert. Es kommt dabei zu einer Ausbildung von Zonen geringer Dichte an bestimmten Querschnitten des Drahtes, die in annähernd periodischen Abständen längs der Drahtachse liegen (s. Abbildung 2 a). Durch diesen Vorgang wird die Stromleitung und damit die Energieeinkopplung schon in einem Stadium gedrosselt, in dem zwischen den Verdünnungszonen noch Teile flüssigen Materials vorhanden sind. Wenn die anliegende Spannung hinlänglich hoch ist, treten zwar innerhalb der Verdünnungszonen Gasentladungen auf, und es kann auch ein Wiedereinsetzen der Energieeinkopplung stattfinden. Die Dichteunterschiede im entstehenden Plasma sind jedoch dann außerordentlich groß, und das Plasma ist deshalb nicht gut diagnostizierbar. Außerdem ist die Entladungssäule in diesem Stadium schon so weit expandiert, daß keine extrem hohen Teilchengrößen mehr vorliegen.

Für Entladungen mit relativ langen Stromanstiegszeiten sind die Ursachen der Schichtenbildung weitgehend geklärt: Bei Anstiegszeiten im Millisekundenbereich kommt es zufolge der Oberflächenspannung zu periodischen Abschnürungen des Drahtzylinders im flüssigen Zustand¹ und zu bevorzugt einsetzender Verdampfung an den Verengungsstellen.

Bei etwas schnelleren Entladungen treten vor dem Wirksamwerden der Oberflächenspannung Abschnürungen und selektive Verdampfungen ähnlicher Art als Folge einer MHD- ($m=0$)-Instabilität auf².

Bei noch steileren Stromanstiegen ($dI/dt > 10^9$ A/sec) kann man insbesondere bei Verwendung dünner Drähte ($d_0 \leq 0,1$ mm) sehr feine Schichtungen

der Dampfsäule (mittlere Schichtdicke $\approx 0,2$ mm) beobachten, die mitunter sogar in einem späten Expansionsstadium bei Dampfsäulen beträchtlichen Durchmessers auftreten und vielfach mit röntgen-diagnostischen Methoden nicht mehr auflösbar sind. Auf ihr Vorhandensein läßt sich nur aus sekundären Erscheinungen wie z. B. Gasentladungen zwischen den Flüssigkeitsschichten schließen, die mit optischen Kurzaufnahmen guter Abbildungsqualität diagnostizierbar sind.

Das Auftreten dieser feinen Schichtungen wurde von verschiedenen Autoren sehr unterschiedlichen Ursachen zugeschrieben (elastischen Wellen, Schwingungen der Elektronen und Ionen, Oberflächeninhomogenitäten – siehe³).

Kürzlich durchgeführte systematische Untersuchungen über Ausmaß und Einstellzeiten der Schichtenbildung unter verschiedenen Versuchsbedingungen haben gezeigt, daß diese bei sehr rascher Aufheizung des Drahtmaterials nur mehr wenig in Erscheinung tritt. Die Ergebnisse ließen darüber hinaus vermuten, daß auch die feinsten, eben noch nachweisbaren Schichtenbildungen auf die oben schon erwähnte MHD- ($m=0$)-Instabilität zurückzuführen sind⁴.

Die Ausbildung einer derartigen Instabilität muß sich der Theorie nach durch Überlagerung eines axialen Magnetfeldes zeitlich verzögern lassen, wenn ein solches Feld in die Größenordnung des azimuthalen Eigenfeldes der Drahtentladung kommt⁵. Eine experimentelle Überprüfung dieser Aussage bei Drahtexplosionen mit Schichtenbildung hat ergeben, daß die genannte Vermutung richtig ist.

Aluminiumdrähte von 4 cm Länge und 0,5 mm Durchmesser wurden in einem Kondensatorentladungskreis ($U_0 = 2$ bis 25 kV, $C = 40$ bis 108 μ F, $L = 0,36$ bis 18 μ H) explodiert. Zur Erzeugung des Axialfeldes dienten zwei Ringleiter in Helmholtz-Anordnung (8 cm Durchmesser), durch die eine zweite Kondensatorbatterie (102,6 μ F, 25 kV) entladen wurde. Die Stromanstiegszeiten der Drahtentladungen wurden durch Änderung der Kreisparameter variiert. Sie lagen bei diesen Untersuchungen im Bereich $dI/dt = 1,3 \cdot 10^9$ bis $4,6 \cdot 10^{10}$ A/sec. Die Anstiegszeit der Entladung für das Axialfeld betrug $2,6 \cdot 10^{10}$ A/sec. Das Strommaximum dieser Entladung wurde durch entsprechend zeitgerechte Triggerung so gelegt, daß es mit dem Zeitpunkt des Einsatzes der Schichtenbildung zusammenfiel, also kurz nach dem ersten Strommaximum der Drahtentladung auftrat.

Abbildung 1 zeigt die Beeinflussbarkeit des Entladungsstromes durch das Axialfeld. Die maximale Feldstärke betrug in diesem Fall $B_z = 37,2$ kG, entsprechend $B_z \approx B_q/3$. Durch die stabilisierende

Sonderdruckanforderungen an Prof. Dr. H. Jäger, Institut für Experimentalphysik der Universität Kiel, D-2300 Kiel 1, Olshausenstraße 40–60, Neue Universität, Gebäude D6.

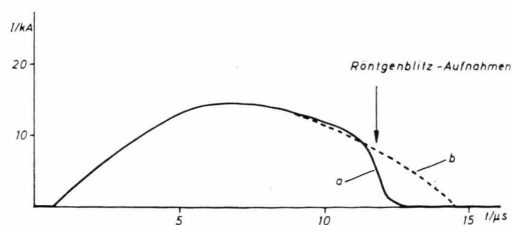


Abb. 1. Verdampfungsstromimpuls bei der Stoßaufheizung eines Aluminiumdrahtes ohne (a) und mit (b) axialem Stabilisierungsfeld.

Wirkung dieses Feldes läßt sich die Drosselung des Entladungsstromes verzögern und damit die Energieeinkopplung länger aufrechterhalten.

Ermittlungen der vom Drahtmaterial aufgenommenen Energie zeigen, daß bei Aufheizung ohne Stabilisierungsfeld weniger Energie eingekoppelt werden kann, als insgesamt zur Verdampfung notwendig ist. Bei Anwendung des Stabilisierungsfeldes hingegen wird vollständige Verdampfung erreicht.

In Abb. 2 sind Röntgen-Blitzaufnahmen (Belichtungszeit 30 nsec) wiedergegeben, die zu den in Abb. 1 angedeuteten Zeiten erhalten wurden. Die Bildungszeit der Schichtung beträgt $5,6 \mu\text{sec}$, der mittlere Schichtabstand $0,2 \text{ mm}$. Die Anwachszeit der zugrunde liegenden $m=0$ -Instabilität ist kleiner. Sie läßt sich experimentell nicht eindeutig bestimmen, da an den Abschnürungsstellen des Metallzylinders die Verdampfung bevorzugt einsetzt.

Bei Vorhandensein des Stabilisierungsfeldes (Abb. 2 b) ist keinerlei Schichtung mehr erkennbar.



Abb. 2 a

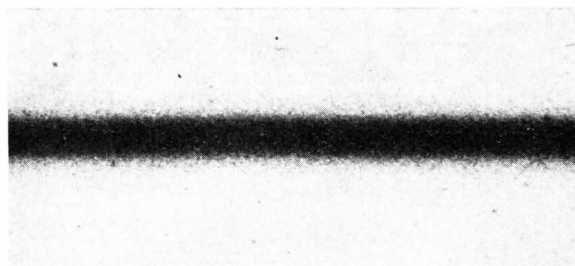


Abb. 2 b

Abb. 2. Röntgen-Blitzaufnahmen zu den beiden Entladungen der Abbildung 1, 7-fache Vergrößerung.

Außerdem ist der Durchmesser der Dampfsäule in diesem Fall kleiner, was mit der zuvor erwähnten geringeren Stromdrosselung im Einklang steht. Die Aufnahmen liefern den Beweis dafür, daß die Schichtung magnetohydrodynamischen Ursprungs ist.

¹ J. Nasilowski, in: Exploding Wires, Hrsg. W. G. Chase u. H. K. Moore, Plenum Press, New York 1964, Vol. 3, p. 295.

² K. B. Abramova, V. P. Valitskii, Yu. V. Vandakurov, N. A. Zlatin u. B. P. Perehud, Sov. Phys.-Dokl. **11**, 301 [1966].

³ H. Jäger, Z. Naturforsch. **27 a**, 1586 [1972].

⁴ H. Jäger, H. J. Siebke u. U. Fischer, Verh. Dtsch. Phys. Ges. **3**, 121 [1972].

⁵ J. R. Tayler, Rev. Mod. Phys. **32**, 907 [1960].