Über negative Radiometereffekte und Photophorese.

Von Walther Gerlach.

Mit drei Abbildungen. — (Eingegangen am 18. Juni 1920.)

Vor einiger Zeit haben Westphal und ich¹⁾ Versuche über negative Radiometereffekte mitgeteilt. Es konnte gezeigt werden, daß geeignet gebaute Radiometer sich unter Bestrahlung gegen die Lichtquelle drehen. Eine vollständige theoretische Deutung dieses vorher unbekannten Effektes ließ sich noch nicht geben, da die Erklärung des Überganges des negativen Effektes in den positiven bei bestimmten Drucken Schwierigkeiten macht. Wir wiesen schon damals auf die Möglichkeit hin, daß zwischen diesem Effekt und der von Ehrenhaft als „negative Photophorese“ bezeichneten Erscheinung²⁾ ein Zusammenhang bestehen kann. Einige der damals angestellten Überlegungen sind unter anderem in einer kürzlich erschienenen Notiz Westphals³⁾ enthalten. Nachdem Epstein⁴⁾ nachgewiesen hat, daß weder Michauds⁵⁾ Erklärung der negativen Photophorese, noch überhaupt eine Wirkung der Strahlung als „negativer Lichtdruck“ elektromagnetisch möglich erscheint, tritt das Bestreben nach Auffinden einer anderen Erklärung dieses Effektes an Stelle der Ehrenhaftschen Anschauung „einer neuen Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung“ erneut in den Vordergrund. Im folgenden sollen einige Versuchsergebnisse mitgeteilt werden, welche mit Metallradiometern aus Selen und Molybdänglanz erhalten wurden. Dieselben beweisen, daß bei Bestrahlung sehr dünner Plättchen aus Selen und Molybdänglanz nur solche Bewegungen auftreten, welche zwanglos als Radiometerkräfte zu deuten sind, selbst wenn es Bewegungen gegen die Lichtquelle sind.

1. Der reine negative Radiometereffekt. Die Anordnung der Versuche gibt Fig. 1. Gepumpt wurde mit Quecksilber-Dampfstrahl- und Diffusionspumpe nach Volmer, zur Druckmessung diente ein McLeod'sches Manometer. Die Radiometerflügel waren ungeschwärzt und stets sauber mit Alkohol und Äther gewaschen. Bestrahlt wurden sie möglichst homogen, die Verschlussplatte und die verwendeten Linsen waren aus Quarz. Die Ausschläge wurden mit Spiegelablesung

¹⁾ W. Gerlach u. W. H. Westphal, Verh. d. D. Phys. Ges. **21**, 218, 1919.

²⁾ Z. B. F. Ehrenhaft, Ann. d. Phys. (4) **56**, 81, 1918.

³⁾ W. H. Westphal, ZS. f. Phys. **1**, 256, 1920.

⁴⁾ P. Epstein, Mitt. d. Phys. Ges. Zürich, Nr. 19, 30, 1919.

⁵⁾ F. Michaud, C. R. **168**, 770, 1919.

beobachtet, Skalenabstand 3 m. Die Radiometer wogen etwa 20 mg und hingen an dünnen Quarzfäden. Dünne Selenplättchen waren nur mit großer Schwierigkeit herzustellen. Es wurde das in einem kleinen Röhrchen geschmolzene Selen auf eine Glasplatte geschleudert, der Tropfen möglichst schnell mit einer zweiten Glasplatte platt gedrückt. Nur ganz selten gelang es, brauchbare metallische Blättchen zu erhalten, welche im reflektierten Licht stahlblau erschienen, rotes Licht durchließen. Bei Bestrahlung mit einer Nernstlampe gaben einige dieser Radiometer bei niederen Drucken schwach positive, andere schwach negative, einzelne kaum meßbare Ausschläge. Hierfür waren, wie aus Versuchen geschlossen wurde, wechselnde, fast unkontrollierbare Oberflächenschichten verantwortlich. Da aber Gleichmäßigkeit

Fig. 1.

bei der erwähnten Herstellung der Radiometer mit Sicherheit nicht zu erhalten war, so wurden diese Versuche abgebrochen, und statt Selen der optisch ähnliche Molybdänglanz genommen.

Die Radiometerflügel aus Molybdänglanz wurden von großen Stücken abgespalten und rechteckig zu $5 \times 12 \text{ mm}^2$ geschnitten (Dicke 3 bis 20μ). Sie sehen gleich wie metallisches Selen im weißen Lichte stahlblau aus und lassen rotes und ultrarotes Licht mit beträchtlicher Lichtstärke durch. Es ergab sich, daß beiderseits frisch gespaltene

Blättchen mehr oder weniger große (von wenigen Millimetern bis zu 100 mm) positive Radiometeraussschläge gaben, deren Verlauf als Funktion des Druckes ganz den normalen Kurven von Westphal¹⁾ entspricht. Stanniolfolien gaben viel größere Ausschläge.

War dagegen nur eine Seite des Molybdänglanzblättchens frisch gespalten, die andere ein wenig matt²⁾, wohl oxydiert durch längere Luftteinwirkung, so erhielt man bei Bestrahlung mit dem Nernststift:

Bei Bestrahlung der frischen Spaltfläche **nur** negativen Effekt.

Bei Bestrahlung der matten Fläche **nur** positiven Effekt.

¹⁾ W. H. Westphal, ZS. f. Phys. 1, 92, 1920.

²⁾ Auch die matte Fläche reflektierte noch sehr stark, der Unterschied fiel erst auf bei Vergleich mit einer ganz frischen Spaltfläche.

Fig. 2 gibt eine der gemessenen negativen Radiometerkurven, gezeichnet als Funktion von $\log p$. Die Zeichen $\cdot$ $+$ $\circ$ bedeuten verschiedene Messungsreihen an demselben Flügel, nach mehrmaliger Änderung in der Anordnung, aber bei stets gleicher Bestrahlungsintensität. Die ausgezogene Kurve ist eine normale positive Radiometerkurve, nach den Messungen von Westphal (l. c. S. 94 bis 95, Tabelle 1, Fig. 1), aber negativ gezeichnet. Die Übereinstimmung meiner negativen Kurve mit der Westphalschen normalen Radiometerkurve auf ihrem ganzen Verlauf ist eine so vollkommene, daß die gemessene negative Kurve als auf einem reinen radiometrischen Effekt beruhend gedeutet werden muß. Durch die unter 2. mitgeteilten Versuche mit spektral zerlegtem Licht wird dieser Schluß weiter bewiesen.

Fig. 2.

Wurde die alte (matte) Spaltfläche dieses Radiometerflügels bestrahlt, so fand man nur einen positiven Effekt, in Fig. 2 gleichfalls negativ gezeichnet, mit $\times$ und gestrichelter Linie.

Erwähnenswert scheint bei den sonst sehr durchsichtigen Versuchen eine Besonderheit in der Einstellung des Ausschlages. Der erste Ausschlag bei Bestrahlung der matten Fläche ist größer als der (positive) Endausschlag. Es scheint sich also auch hier über den positiven Effekt ein negativer Radiometereffekt zu überlagern, der aber möglicherweise nur auf die Durchwärmung des Radiometerflügels zurückzuführen ist. Bei Bestrahlung der frischen Spaltfläche (und rückseitiger matter Fläche) geben manche Radiometer im ersten Augenblick einen ganz kleinen Ausschlag nach positiver Richtung, der aber dann sofort umkehrt und sich in den viel größeren negativen Endausschlag normal einstellt. Auch die erwähnte große Verschiedenheit der radiometrischen Ausschläge bei beiderseitig frischen Spaltflächen hängt hiermit zusammen. Wenn die positiven Ausschläge bei Bestrahlung der einen Fläche größer sind, als bei Bestrahlung der anderen, so stellt sich der kleinere Endausschlag erst nach einem wesentlich größeren positiven Anfangsausschlag ein. Diese Er-

scheinungen treten nicht bei allen Radiometern aus Molybdänglanz auf, so daß für sie wohl stets sekundäre Einflüsse (nicht absolut gleichartige Oberflächen, Wärmeleitung) maßgebend sind.

2. Versuche mit spektralzerlegtem Licht. Es zeigte sich, daß der negative Radiometereffekt an Molybdänglanz fast ausschließlich durch rote und ultrarote Strahlung bedingt ist. Die Untersuchung der Radiometerwirkung bei Bestrahlung mit kurzwelligerem Licht bot Schwierigkeiten, da das Reflexionsvermögen des Molybdänglanzes für diese Wellen sehr hoch ist. So gelangen hier leider nur qualitative Versuche, deren Ergebnisse aber absolut sicher sind. Als Lichtquellen dienten ein stark belasteter Nernststift in Verbindung mit einem lichtstarken Monochromator, derselbe Nernststift mit Farbfiltern und eine Quarzquecksilberdampflampe. Die Resultate dieser Versuche sind:

λ		Int. 1)	Radiometereffekt
Monochromatorversuche	ultrarot—rot	100	negativ
	hellrot	100	null
	gelb—grün	75	positiv
Filterversuche Hg-Lampe	Gesamtstrahlung	100	— 100 ²⁾
	Filter I: Ultraviolett—blau absorb.	50	— 70
	Filter II: Wood-Filter	50	schwach positiv
Nernststift . .	Gesamtstrahlung	100	— 100
	Filter III: Absorb. hellrot—grün .	23	— 31
	Filter IV: Absorb. hellrot—violett	20	— 25

Diese Versuche zeigen eindeutig, daß der negative Effekt in den positiven umkehrt, wenn die rote und ultrarote Strahlung, für welche die untersuchte Substanz durchlässig ist, ausgeschaltet wird. Beim Monochromatorversuch heben sich bei hellrot beide Effekte auf, während bei dunkelrot der negative, bei gelbgrün der positive Effekt überwiegt. Die Filterversuche geben indirekt das gleiche Resultat. Bei den Quecksilberlampenversuchen macht sich die Wärmestrahlung der Lampe bei den sehr großen erforderlichen Belastungen störend bemerkbar. Der Versuch mit dem Woodschen Filter ist eindeutig. Auch der in der Tabelle davorstehende Absorptionsversuch mit Filter I zeigt, daß der negative Effekt relativ größer wird, wenn das kurzwellige Licht ausgefiltert

¹⁾ Parallelmessung mit einem zweiten normalen Radiometer.

²⁾ Vergleichszahlen; die gemessenen Ausschläge waren nur einige Millimeter. Zur Vergrößerung der Ausschläge stand die Skale in spitzem Winkel zur Strahlenrichtung.

wird, d. h. daß sich bei Gesamtstrahlung über den negativen Effekt durch die langwellige Strahlung ein positiver Effekt der kurzwelligen Strahlung überlagert. Das gleiche Resultat ergeben die beiden Versuche mit dem Nernststift.

3. Deutung der Versuche. Von besonderem Interesse sind die Versuche mit der Molybdänglanzfolie, deren bestrahlte Vorderseite eine frische Spaltfläche, deren Hinterseite eine oxydierte Fläche ist. Die Folien sind für lange Wellen durchlässig (der Nernststift erscheint, durch die Folie gesehen, tiefrot). Die durchdringenden Strahlen werden in der hinteren oxydierten Schicht stärker absorbiert¹⁾. Daher wird diese Fläche wärmer als die vordere und das Radiometer dreht sich gegen das Licht. Sobald die durchdringenden langwelligen Strahlen ausgefiltert werden, kehrt sich der Effekt in den normalen positiven Radiometereffekt um. Negativer Effekt bei Bestrahlung mit langen Wellen, positiver Effekt bei Bestrahlung mit kurzen Wellen, positiver Effekt bei Bestrahlung der oxydierten Fläche und positiver Effekt bei beiderseits gleichartigen frischen Spaltflächen: sämtliche Radiometerwirkungen zeigen die Druckabhängigkeit des normalen Radiometereffektes, ohne irgend einen Hinweis auf das Vorhandensein einer anderen Wirkung der Strahlung auf die Materie als die der Erwärmung durch Absorption zu geben.

Bezüglich des von Westphal und mir an berußten Radiometern untersuchten negativen Effekte sagen die hier mitgeteilten Versuche zunächst mit Bestimmtheit, daß ein negativer Radiometereffekt an sich möglich ist, und daß er nicht als eine Folge einer verborgenen Strömungsstörung gedeutet werden kann. Ferner zeigt der Vergleich der früheren und der jetzigen Ergebnisse, daß der reine negative Radiometereffekt an gewissen Molybdänglanzfolien ein optischer Effekt ist, während der negative Radiometereffekt an Ruß nicht als rein optisch gedeutet werden kann; denn der normalen Radiometerdruckabhängigkeit, wie sie Westphal an normalen (dick berußten) Radiometern als positiven Effekt und ich hier an den beschriebenen Metallradiometern als negativen Effekt finde, überlagert sich bei dem negativen Radiometereffekt an (dünnem) Ruß eine zweite Druckabhängigkeit, nämlich die früher mitgeteilte Umkehr des positiven

¹⁾ Wird die hintere Fläche nicht als absorbierend, sondern als die langwellige Strahlung reflektierend angenommen, so liegt auch dann das Maximum der Temperatur in der hinteren Fläche. Es wird hier aber Absorption angenommen, weil die Bestrahlung dieser oxydierten Fläche mit gleichartiger Strahlung einen positiven Radiometereffekt gibt, der größer ist als der negative.

in den negativen Effekt bei einem gewissen Druck. Dieser hiermit isolierte Rußeffect dürfte eine Folge der variablen Leitfähigkeit des Rußes bei verschiedenen Drucken sein und im Zusammenhang stehen mit dem vor einiger Zeit an Bolometern gefundenen Rußeffect¹⁾. Diese Frage wird weiter untersucht werden.

Hier sei nur kurz eine vorläufige Beobachtung erwähnt. Ein Radiometer aus Glimmer, einseitig dick berußt, wird mit einem Nernststift von der unberußten Seite her bestrahlt. Wurde im Maximum des negativen Effektes (s. Fig. 3) die Strahlung durch eine Kupfer-

Fig. 3.

ammoniaklösung gefiltert, so ging der negative Effekt in einen schwach positiven über. Das auf der Rußseite geschwärzte Glimmerradiometer ist aber kein vollständiges Modell des Selen- oder Molybdänglanzradiometers, weil durch den Ruß zu dem optischen Effekt noch ein mit dem Druck variabler Wärmeleitungseffekt hinzutritt.

Zusammenfassung: Bei der Untersuchung von Radiometern aus Selen und Molybdänglanz wurden nur solche Bewegungen gefunden, welche als reine Radiometerwirkungen infolge der Erwärmung durch absorbierte Strahlung zu deuten sind.

Elberfeld, Juni 1920.

Phys. Lab. d. Farbenfabriken vorm. Friedr. Bayer & Co.

¹⁾ W. Gerlach, Ann. d. Phys. (4) 50, 245, 1916.