

II. *Fortpflanzungsgeschwindigkeit electrischer Wellen in einigen festen Isolatoren;* *von L. Arons und H. Rubens.*

In einem kürzlich erschienenen Aufsatz ¹⁾ haben wir eine Methode beschrieben, welche die Fortpflanzungsgeschwindigkeit electrischer Wellen zunächst in isolirenden Flüssigkeiten zu messen gestattet. Die Anwendung derselben ergab eine erwünschte Bestätigung der Maxwell'schen Theorie, wonach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit electrischer Wellen gleich der Quadratwurzel aus der Dielectricitätsconstante sein muss. Es lag nahe, die Untersuchung in zwei Richtungen fortzuführen. Einerseits fragte es sich, ob man nicht auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einigermaassen leitenden Flüssigkeiten messen könnte; diese Frage bietet ein besonderes Interesse in Anbetracht der sehr grossen Werthe der Dielectricitätsconstante, welche für destillirtes Wasser (80) und Alkohol (25) von einer Reihe von Beobachtern ²⁾ gefunden worden sind. Andererseits galt es, die Methoden auch auf feste Substanzen anzuwenden, vor allen Dingen auf das Glas, über dessen electrisches Verhalten sich auch nach den neuesten Untersuchungen ³⁾ widersprechende Angaben finden. Unsere Versuche mit schwach leitenden Flüssigkeiten haben zu keinem Ergebniss in der angedeuteten Richtung geführt, dagegen hat sich unsere Methode für einige feste Körper bewährt und namentlich auch für das Glas die Richtigkeit der Maxwell'schen Theorie durchaus bestätigt.

1) Arons u. Rubens, Wied. Ann. **42**. p. 582. 1891.

2) Cohn u. Arons, Wied. Ann. **33**. p. 313. 1888. A. Winkelmann, Wied. Ann. **38**. p. 161. 1889. E. Cohn, Wied. Ann. **38**. p. 42. 1889. S. Tereschin, Wied. Ann. **36**. p. 792. 1889. Donle, Wied. Ann. **40**. p. 307. 1890. Gouy, Compt. rend. **106**. p. 540. 1888. Rosa, Phil. Mag. (5) **31**. p. 200. 1891.

3) J. J. Thomson, Proc. Roy. Soc. Lond. **46**. p. 232. 1889. R. Blondlot, Compt. rend. **112**. p. 1058. 1891. E. Lecher, Wied. Ann. **42**. p. 142. 1891.

Versuche mit schwach leitenden Flüssigkeiten.

Die Versuchsanordnung war genau die nämliche wie gelegentlich der früheren Arbeit.¹⁾ Auf die Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Wasser mussten wir sehr bald verzichten. Wurde der Blechkasten, welcher auch bei den früheren Versuchen die zu untersuchenden Flüssigkeiten enthielt, mit destillirtem Wasser gefüllt, so bildete er das Ende der Schwingungen auf seiner Seite. Es blieb für die Angaben des Bolometers völlig gleichgültig, was mit den aus dem Kasten heraustretenden und zu den Endplatten führenden Drahtstücken (*DJ*, *HL* in der Figur der citirten Arbeit p. 584) geschah. Dieselben konnten sogar völlig entfernt werden. Ja, ähnliche Erscheinungen traten schon ein, wenn der obere und untere Draht nur durch eine Wassersäule in einem Glasrohr von mässiger Weite mittelst angehängter Kupferdrahtelectroden an irgend einer Stelle verbunden wurden. Je näher sich die Enden der Kupferdrähte in Wasser gegenüberstanden, um so vollkommener wirkte die Verbindung wie eine metallische Ueberbrückung.

Nicht ganz so aussichtslos erschienen anfangs die Versuche mit Alkohol. Die Schwingungen pflanzten sich in merklichem Betrage durch den mit Alkohol gefüllten Kasten hindurch fort. Dagegen zeigte sich bei der Untersuchung mit den kleinen verschiebbaren „Leydener Flaschen“²⁾, dass die Verhältnisse wesentlich anders lagen, als bei den früheren Versuchen. Statt dass nämlich die beiden Hälften des Drahtvierecks diesseits und jenseits der Zuleitungsstelle der Schwingungen je in einer halben Welle schwangen, wenn die Zuleitungsstelle sich in dem Punkte des kleinsten Bolometerausschlages (Indifferenzpunkt) befand, zeigte es sich, dass auf der nicht vom Kasten unterbrochenen, also der Untersuchung zugänglichen Seite, mehrere Minima lagen. Dazu kam, dass bei der Verschiebung der Zuleitungsstelle der Abfall zum Minimum des Bolometerausschlages im Gegensatz zu den früheren Beobachtungen starke Asymetrie zeigte.

1) Arons u. Rubens, l. c. p. 582.

2) Arons u. Rubens, l. c. p. 586.

Die Lage des „Indifferenzpunktes“ war deshalb nur schwierig aufzufinden, da die Methode der Schwerlinie¹⁾ versagte. Versuchte man aus den wenigstens näherungsweise gefundenen Werthen in der früher beschriebenen Weise den „Brechungsexponenten“ für Alkohol zu berechnen, so ergaben sich je nach der Länge des von Alkohol umgebenen gebogenen Drahtes im Kasten Werthe zwischen 4 und 14; selbstverständlich kommt denselben keinerlei Bedeutung zu, da dem Rechnungsverfahren die Voraussetzung zu Grunde liegt, dass rechts und links vom „Indifferenzpunkt“ eine einzige halbe Welle liegt. Die Erklärung der beschriebenen Erscheinungen — mehrfache mehr oder weniger stark ausgeprägte Minima und Asymetrie im Abfall zum Indifferenzpunkt — finden wir in dem Umstand, dass der mit Alkohol gefüllte Kasten zwar einen Theil der Schwingungen hindurchlässt, einen anderen, nicht unbeträchtlichen Theil dagegen reflectirt, sodass eine Uebereinanderlagerung verschiedener Wellenzüge in der Leitung stattfindet.

Versuche mit festen Körpern.

Wir untersuchten zunächst das Paraffin, da sich dasselbe bequem in geschmolzenem Zustande in den Blechkasten giessen liess, sodass es nach dem Erstarren den vorher luft-erfüllten Raum seinerseits völlig ausfüllte. Schon Schiller²⁾ hat darauf aufmerksam gemacht, dass Paraffin je nach der Art der Abkühlung sowohl in den optischen wie in den electrischen Constanten Verschiedenheiten aufweist; auch dem unbewaffneten Auge bieten sich Unterschiede dar; das schnell gekühlte Paraffin erscheint fast durchsichtig, das langsam gekühlte milchweis. Bei den grossen Massen, mit denen wir arbeiteten, kühlte sich das Paraffin sehr langsam ab, sodass sich schliesslich die milchweisse Modification bildete. Während des Ueberganges aus dem flüssigen in den endlichen festen Zustand zeigte das Paraffin aber beim Erstarren innerhalb einer beträchtlichen Zeit auch die durchsichtige Modification. Wir stellten nun der Vollständigkeit

1) Arons u. Rubens, l. c. p. 584.

2) Schiller, Pogg. Ann. 152. p. 535. 1874.

halber unsere Messungen sowohl beim flüssigen, als beim eben erstarrten und bei dem festen milchweissen Paraffin an. Bei der schon oben erwähnten Langsamkeit der Abkühlung konnten wir für jeden Zustand eine grössere Zahl von Beobachtungsreihen erhalten; die Ergebnisse enthält Tab. I (p. 212). Wir fanden bei der Messung der Dielectricitätsconstante nach Schiller's Methode, dass die Dielectricitätsconstante beim flüssigen Paraffin den Werth 1,98 hatte, unmittelbar nach dem Erstarren wuchs dieser Werth auf 2,08, um nach der völligen Abkühlung auf 1,95 herunterzugehen. Einen ganz ähnlichen Gang zeigte die von uns gemessene Fortpflanzungsgeschwindigkeit; doch lehrt ein Blick auf die Tab. I, dass die beobachteten Unterschiede nicht weit über die Abweichungen hinausgehen, welche durch die Fehlergrenze der Methode (fast 1 cm Abweichung vom Mittel) hervorgerufen werden können. Die Uebereinstimmung zwischen den Werthen der Dielectricitätsconstante und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist eine gute. (S. Tab. III.) In der Tabelle sind für die Werthe des optischen Brechungsexponenten die von Schiller mittelst Totalreflexion ermittelten Grenzen angegeben. Die absoluten Werthe der Dielectricitätsconstante des Paraffins fanden wir durchweg grösser als Schiller, obwohl wir nach dessen Methode maassen. Der Grund mag darin zu finden sein, dass wir uns einer günstigeren Condensatorform bedienten, wie sie einer¹⁾ von uns beschrieben hat, während Schiller Paraffinplatten zwischen die Platten eines Kohlrausch'schen Condensators brachte.

Wir versuchten schliesslich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Paraffin zu bestimmen, indem wir uns Platten von ca. 0,5 cm Dicke gossen und mit diesen in horizontaler Schichtung den Blechkasten füllten. Die Werthe fielen merklich kleiner aus. Dieses Ergebniss wäre mit dem Schiller'schen in Einklang zu bringen, da sich die von uns gegossenen Platten sehr schnell abkühlten. Doch legen wir auf dasselbe keinen Werth, da sich die Paraffinplatten nicht dauernd eben hielten, sodass sich Luftschichten zwischen denselben befanden. Derartige Luftschichten, besonders in der Nähe

1) Arons, Wied. Ann. 25. p. 291. 1888.

der Drähte, haben aber einen bedeutenden Einfluss, wie folgender Versuch lehrt. Ersetzt man an einer Schmalseite des Drahtvierecks (30 cm) den blanken Kupferdraht durch einen solchen in Kautschukisolirung oder führt man dieselbe Länge Kupferdraht durch eine starkwandige Glascapillare, so erhält man sofort eine starke Verschiebung des Indifferenzpunktes. Wir sahen deshalb von weiteren Versuchen mit Paraffinplatten ab und wendeten uns zu Messungen an Glas.

Das Glas galt bisher für ein Material, an welchem sich die Maxwell'sche Beziehung nicht bestätigen liess. Die Dielectricitätsconstanten ergaben sich bei einer ganzen Reihe von Glassorten viel grösser als das Quadrat des optischen Brechungsexponenten. In letzter Zeit sind wegen der Wichtigkeit des Gegenstandes, wie oben erwähnt, eine Anzahl von Arbeiten erschienen, die durch Messung der Dielectricitätsconstante mittelst sehr schneller Schwingungen der Lösung der Frage näher zu kommen trachteten.

So hat Lecher¹⁾ Bestimmungen unternommen, die das Ergebniss lieferten, dass mit der Schnelligkeit der Schwingungen die Dielectricitätsconstante wachse; inzwischen haben Cohn und Heerwagen²⁾ gezeigt, dass die Lecher'schen Messungen keine allgemeine Gültigkeit beanspruchen können. J. J. Thomson³⁾ gelangt zu dem entgegengesetzten Ergebniss. Nach ihm nimmt der Werth der Dielectricitätsconstante ab, wenn man zu schnelleren Schwingungen vorschreitet. Schliesslich hat es Blondlot⁴⁾ unternommen, eine Entscheidung herbeizuführen. Diese Entscheidung fällt nach Blondlot zu Gunsten von J. J. Thomson aus. Er findet für das von ihm untersuchte Glas die Dielectricitätsconstante $2,8 = (1,67)^2$, während der optische Brechungsexponent ungefähr 1,51 ist. Auch er schliesst, dass bei Steigerung der Schwingungszahl die Beziehung $\mu = n^2$ gilt, worin μ die Dielectricitätsconstante und n der optische Brechungsexponent ist. Leider ist bei Blondlot nicht angegeben, wie gross die Dielectricitätsconstante des von ihm benutzten Glases sich

1) Lecher, l. c. p. 142.

2) Cohn u. Heerwagen, Wied. Ann. 43. p. 343. 1891.

3) J. J. Thomson, l. c. p. 1058.

4) Blondlot, l. c.

bei geringeren Schwingungszahlen ergibt; das Fehlen dieser Angabe ist ein ernstlicher Mangel, da schon frühere Beobachter für einzelne Glassorten kleine Werthe der Dielectricitätsconstante auch bei Anwendung niedriger Schwingungszahlen, ja selbst bei Anwendung statischer Methoden gefunden haben.

Unseres Erachtens ist die Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit für electricische Wellen die einzige Methode zur Prüfung der Maxwell'schen Beziehung ($n^2 = \mu$). Eine Möglichkeit, die Dielectricitätsconstante für Wellen von der Periode der Lichtschwingungen zu messen, ist vor der Hand nicht gegeben. Die von uns bestimmte Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist vermuthlich in ausserordentlich weiten Grenzen von der Wellenlänge unabhängig, da die Dispersion wohl zweifellos als ein molecularer Vorgang aufzufassen ist und die molecularen Grössen gegenüber den bisher zur Verwendung gelangten electricischen Wellenlängen nicht ins Gewicht fallen.

Wir haben deshalb für zwei verschiedene Sorten Spiegelglas sowohl die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nach unserer Methode, als auch die Dielectricitätsconstante nach der Schiller'schen Methode gemessen; der optische Brechungsexponent wurde so genau als nöthig mittelst des Abbe'schen Refractometers bestimmt. Die Bestimmungen nach unserer Methode wurden genau wie früher ausgeführt; der nämliche Blechkasten wurde mit den Glastafeln (in einem Fall von ca. 7,5 mm, im anderen von ca. 2 mm Dicke) in horizontaler Lage ausgefüllt. Die einzige Veränderung bestand darin, dass die im Kasten befindlichen Drähte von geringerem Querschnitt gewählt wurden, damit die Luftschicht, in welcher sie sich befanden, möglichst dünn war. Die Ergebnisse zeigen übrigens, dass diese Vorsicht kaum nöthig war; es scheint in erster Linie nur erforderlich zu sein, dass die senkrechten Verbindungslinien zwischen oberem und unterem Draht völlig in dem zu untersuchenden Dielectricum verlaufen.

Die Messungen nach der Schiller'schen Methode wurden mit einem Condensator ausgeführt, der im Fall des dünneren Glases aus drei, im anderen Fall aus fünf Metall-

platten bestand, die vertical übereinander lagen. Die oberste und unterste Platte waren stets mit der Erde verbunden, im zweiten Falle auch noch die mittelste; an den übrigen, welche untereinander in Verbindung waren, wurde der Wechsel des Potentials beobachtet.

Die folgenden Tabellen enthalten die Messungen an Paraffin und Glas nach unserer Methode.

Tabelle I.

Dielectricum im Kasten	Lage des Indifferenz- punktes		Electrischer Brechungsexponent n
	kurzer Draht	langer Draht	
Luft	$\left\{ \begin{array}{l} 91,0 \\ 90,9 \\ 91,2 \end{array} \right\} 91,0$	$\left\{ \begin{array}{l} 135,5 \\ 135,7 \\ 135,6 \end{array} \right\} 135,6$	$n = \frac{166,9 - 101,2}{135,6 - 91,0} = 1,47$
Paraffin flüssig	$\left\{ \begin{array}{l} 101,2 \\ 101,3 \\ 101,1 \end{array} \right\} 101,2$	$\left\{ \begin{array}{l} 166,0 \\ 167,5 \\ 167,3 \end{array} \right\} 166,9$	
Paraffin erstarrend	$\left\{ \begin{array}{l} 102,5 \\ 102,0 \\ 102,0 \end{array} \right\} 102,2$	$\left\{ \begin{array}{l} 168,2 \\ 168,0 \\ 168,7 \end{array} \right\} 168,3$	
Paraffin fest	$\left\{ \begin{array}{l} 102,5 \\ 101,9 \\ 102,3 \end{array} \right\} 102,2$	$\left\{ \begin{array}{l} 166,1 \\ 166,1 \\ 166,4 \end{array} \right\} 166,2$	$n = \frac{166,2 - 102,2}{135,6 - 91,0} = 1,43$

Tabelle II.

Dielectricum im Kasten	Lage des Indifferenz- punktes		Electrischer Brechungsexponent n
	kurzer Draht	langer Draht	
Luft	$\left\{ \begin{array}{l} 59,5 \\ 57,5 \\ 57,5 \end{array} \right\} 58,2$	$\left\{ \begin{array}{l} 93,0 \\ 93,3 \\ 92,8 \end{array} \right\} 93,0$	$n = \frac{167,6 - 86,6}{93,0 - 58,2} = 2,33$
Glas I	$\left\{ \begin{array}{l} 86,2 \\ 86,9 \\ 86,8 \end{array} \right\} 86,6$	$\left\{ \begin{array}{l} 167,5 \\ 168,3 \\ 167,0 \end{array} \right\} 167,6$	
Glas II	$\left\{ \begin{array}{l} 86,7 \\ 86,8 \\ 86,9 \end{array} \right\} 86,8$	$\left\{ \begin{array}{l} 173,4 \\ 173,2 \\ 174,0 \end{array} \right\} 173,5$	

In einer Schlusstabelle stellen wir die Endergebnisse der vorliegenden Arbeit mit denjenigen der früheren zusammen.

Tabelle III.

Dielectricum	Dielectricitäts- constante μ	$\sqrt{\mu}$	n $\lambda = 6 \text{ m}$	n $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
Paraffin flüssig	1,98	1,41	1,47	1,48
Paraffin erstarrend	2,08	1,44	1,48	bis
Paraffin fest	1,95	1,40	1,43	1,53
Glas I	5,37	2,32	2,33	1,51
Glas II	5,90	2,43	2,49	1,53
Ricinusöl	4,67	2,16	2,05	1,48
Olivenöl	3,07	1,75	1,77	1,47
Xylol	2,35	1,53	1,50	1,49
Petroleum	2,07	1,44	1,40	1,45

Physikal. Inst. der Univ. Berlin, Juli 1891.