

7. Zur Demonstration der Hertz'schen Versuche; von P. Drude.

Zur Demonstration der Hertz'schen Versuche eignet sich sehr gut die Warburg-Zehnder'sche Methode¹⁾, welche darauf beruht, dass die electricischen Schwingungen eine Glimmentladung zwischen zwei einander sehr nahe befindlichen Electroden G_1, G_2 einer Geissler'schen Röhre verursachen, welche die weithin sichtbare Entladung eines Accumulators hoher Spannung zwischen den zwei Hauptelectroden H_1, H_2 der Geissler'schen Röhre auslöst. — Ich will im Folgenden das erstere Electrodenpaar G_1, G_2 die Glimmelectroden nennen.

Diese Methode ist nur unbequem, weil nicht immer ein geeigneter Hochspannungsaccumulator zur Verfügung steht. Die von Zehnder angewandte Methode²⁾, die Hauptentladung zwischen H_1, H_2 durch Abzweigung von dem speisenden Inductorium zu bewerkstelligen, functionirt nach meinen Versuchen nicht mit voller Sicherheit, wie es für demonstrative Zwecke wünschenswerth ist.

Durch Zuhülfenahme eines von L. Boltzmann³⁾ vorgeschlagenen Verfahrens kann man nun alle Hertz'schen Versuche durch Anwendung einer Zehnder'schen Röhre auch ohne Benutzung eines Hochspannungsaccumulators bequem und sicher demonstrieren.

Boltzmann schlug zur Demonstration der *Hohlspiegelversuche* vor, ein Electroskop durch die Hertz'schen Fünkchen laden zu lassen. Ich habe es für noch deutlicher befunden, wenn man das von einer guten Trockensäule geladene Electroskop durch die Hertz'schen Funken entladen lässt. Dazu muss die Spitze, welche hinter dem die electricischen Strahlen sammelnden Hohlspiegel angebracht ist, zur Erde abgeleitet sein, ebenso wie der eine Pol der Trockensäule, während der andere Pol

1) L. Zehnder, Wied. Ann. **47**. p. 77. 1892.

2) L. Zehnder, l. c. p. 90.

3) L. Boltzmann, Wied. Ann. **40**. p. 399. 1890.

derselben mit dem Electroskop und der hinter dem Hohlspiegel befindlichen Kugel metallisch verbunden ist. Wenn Fünkchen zwischen Spitze und Kugel überschlagen, zucken die Blätter des Electroskops zusammen, bez. fallen bei intensivem Funkenstrom ganz zusammen. Sowie die Hertz'schen Funken aufhören, spreizen sich die Blätter wieder auseinander. Zweckmässig projectirt man die Blätter des Electroskops durch eine Petroleum- oder electriche Lampe auf einen Schirm. Bei geeigneter Aufstellung desselben kann man das Projectionsbild auch in kaum verdunkeltem Zimmer einem grossen Auditorium sichtbar machen.

In dieser Weise ist mir die objective Darstellung aller Hohlspiegelversuche gut gelungen¹⁾, auch der von Zehnder auf der Nürnberger Naturforscherversammlung vorgeführte Versuch, der mit zu den schönsten gehört, über die Interferenz von zwei parallelen Metallblechen reflectirten Wellen, welche einen gewissen Abstand voneinander besitzen (Analogon zum Newton'schen Farbenglase). Ich konnte deutlich zehn aufeinanderfolgende Maxima, resp. Minima der Wirkung nachweisen, wobei die Distanz der beiden Metallbleche um je 15 cm geändert werden musste.

Diese Demonstrationsmethode leidet nur an dem Uebelstande, dass der empfangende Hohlspiegel erschütterungsfrei aufgestellt sein muss, weil die Spitze und Kugel sich bei Erschütterungen oft direct berühren. Wendet man nun aber anstatt der Funken zwischen Spitze und Kugel die Glimmentladung zwischen den Electroden G_1 , G_2 einer Zehnder'schen Röhre an, so gelingen die Versuche sehr gut und man ist frei von Störungen durch Erschütterungen. Ich habe indess nur schlechte Resultate erzielt oder gar keine, wenn die an G_1 , G_2 angeschmolzenen Platindrähte einfach an die Kugel und Spitze, welche weit auseinandergeschraubt wurden, angelegt wurden. Offenbar stimmt in diesem Falle die Eigenschwingungsdauer des mit G_1 , G_2 verbundenen Metallsystems zu wenig überein mit der Schwingungsdauer des Erregers.

Folgende Anordnung habe ich am zweckmässigsten gefunden. An G_1 , G_2 werden zwei gerade Kupferdrähte D_1 , D_2

1) Die Erregerfunken sprangen in Petroleum über. Sie bleiben dann stets wirksam, ohne Putzen des Erregers.

metallisch angeschlossen (Fig. 1), entweder durch Umwicklung mit den an G_1, G_2 angelötheten Platindrähten, oder indem man in die Enden E_1, E_2 der Glasröhren, welche den Electroden G_1, G_2 zum Halt dienen, Quecksilber giesst, in welches die Drähte D_1, D_2 eingetaucht werden. Kleine Stopfen hindern das Quecksilber am Ausfliessen. — Die Länge der Drähte D_1, D_2 wird so bemessen, dass das ganze System auf den Erreger abgestimmt ist. Man kann dies leicht in jedem Falle vornehmen, indem man D_1, D_2 zunächst zu lang wählt, die Röhre dem Erreger in etwa 1,5 m Entfernung gegenüberstellt, wobei die Drähte parallel zur electricischen Kraft gerichtet werden, und nun die Drähte D_1, D_2 successive durch Abkneifen verkürzt, bis dass die Glimmentladung zwischen G_1 und G_2 am lebhaftesten geworden ist.

Bei dem nach den Hertz'schen Angaben construirtem Erreger, dem eine Wellenlänge λ von 60 cm zugehört, musste ich den Drähten D_1, D_2 je eine

Länge von 21,5 cm geben, um Resonanz zu erreichen. Bei der Gestaltung und Dimensionirung der von mir benutzten Zehnder'schen Röhre (vgl. Fig. 1) beträgt so die Länge der ganzen Leitung des Resonators $2 \cdot 21,5 + 8,5 + 2 = 53,5$ cm. Die Differenz dieser Länge gegen 60 cm wird durch die Capacität der Glimmelectroden G_1, G_2 veranlasst, welche ziemlich bedeutend ist wegen der kleinen gegenseitigen Entfernung (etwa 0,1 mm) der Endflächen von G_1 und G_2 .

Bringt man nun die Drähte D_1, D_2 in die Brennlinie des empfangenden Hohlspiegels, so kann man noch in weiter Entfernung desselben vom Erreger die Glimmentladung beobachten.

Der Resonator gestattet die Anlegung von Capacitäten im

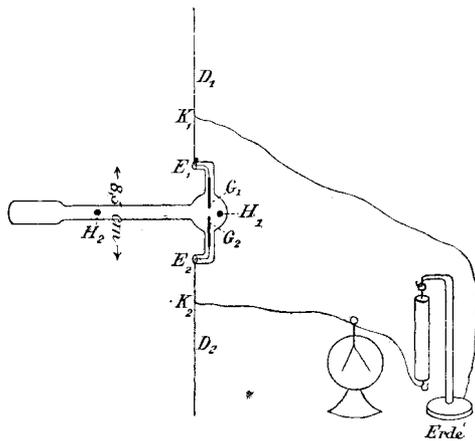


Fig. 1.

Schwingungsknoten der electricischen Kraft, ohne dadurch seine Eigenschwingungen zu ändern. Der Schwingungsknoten liegt bei einem geraden Drahte ohne Endcapacitäten in der Mitte. Wegen der Capacität der Glimmelectroden rücken die Knoten K_1 , K_2 des Systems (vgl. Fig. 1) etwas nach den Glimmelectroden hin, da die Distanz der Knoten vom freien Ende des Resonators $\frac{1}{4}\lambda = 15$ cm betragen muss. — In den Punkten K_1 und K_2 kann man daher zwei Drähte anlegen¹⁾, von denen der eine zur Erde führt, während der andere zum Electroskop und zur Trockensäule geht. Der erstere Draht braucht einfach an den Hohlspiegel angelegt zu werden, der zweite Draht durchsetzt den Hohlspiegel isolirend oder wird aus seiner Oeffnung herausgeführt.

Durch diese Anordnung kann man alle Hohlspiegelversuche sehr gut in nicht verdunkeltem Zimmer einem grossen Auditorium demonstriren, ohne dass man Störungen durch Erschütterungen zu befürchten braucht.

Da bei der Zehnder'schen Röhre die eine Hauptelectrode H_1 noch im Bereiche der Glimmentladung liegt, so kann man auch H_1 mit Trockensäule und Electroskop verbinden, anstatt G_1 . Diese Anordnung ist sogar noch empfindlicher als die vorige, und daher noch mehr zu empfehlen. Einen Unterschied je nach dem Vorzeichen der Ladung von H_1 habe ich bis jetzt nicht wahrnehmen können. Die Erscheinung ist wohl so zu erklären, dass die Gasmolecüle bei der Glimmentladung (durch Dissociation) electricisch leitend werden.²⁾

Die Bildung stehender Wellen vor einer ebenen Metallwand, auf welche ein electricischer Strahl senkrecht auftrifft, kann man mit der beschriebenen Anordnung gut demonstriren, indem man die in der beschriebenen Weise montirte Zehnder'sche Röhre (frei, ohne empfangenden Hohlspiegel) vor der Metallwand verschiebt. So kann man, wenn die Metallwand 2 m vom Erreger-Hohlspiegel entfernt ist, sehr deutlich vier aufeinanderfolgende Knoten der electricischen Kraft (im Spiegel

1) Es kommt nicht genau darauf an, dass gerade die Knoten K_1 , K_2 getroffen werden. Die Drähte dürfen nur nicht nahe an das Ende von D_1 , D_2 angelegt werden.

2) Der galvanische Widerstand beziffert sich nach Millionen Ohm. Ich denke bald genauer darüber zu berichten.

selbst, und 30, 60, 90 cm davor) demonstrieren, in denen die Blätter des Electroskops ruhig gespreizt stehen, während sie in den dazwischen liegenden Bäuchen ganz zusammenfallen.

Die Erscheinung der sogenannten *multiplen Resonanz* gelingt ebenfalls gut zu demonstrieren; indem man die Länge der Drähte D_1, D_2 variirt, erhält man verschiedene Lagen der Knotenpunkte der stehenden Wellen. Folgende Tabelle enthält die Resultate einiger roher Messungen. L bedeutet die Länge der ganzen Secundärleitung. Die Metallwand war meist 1,87 m von der Oeffnung des Erregerhohlspiegels entfernt.

L	Lage der Knoten in Centimeter von der Metallwand aus gerechnet			λ	$\lambda - L$
66,5	34,	70		69	2,5
60,5	32,	67		66	5,5
57,5	33,	66		66	8,5
55,0	31	63		63	8,0
53,5	29,	60		59	5,5
(Reson.)					
52,5	26,	57,	90	57	4,5
41,5	22,	47,	72	47	5,5
39,5	20,	42,		41	1,5

Wenn man die Wellen anstatt von einer Metallwand von einem *Drahtgitter* reflectiren lässt, dessen Drähte parallel zur electricischen Kraft liegen, so beobachtet man dieselbe Knotenlage, wie bei der Metallwand. So ergab sich unter Anwendung desselben Resonators ($L = 53,5$) beim Gitter

für den ersten Knoten: 28; 29; 31,5; 31,5; — Mittel 30,0
 „ „ zweiten „ 62; 62; 59; — „ 61,0,
 bei der Metallwand

für den ersten Knoten: 32; 31 — Mittel 31,5
 „ „ zweiten „ 63; 61 — „ 62,0.

Die Phasenänderung, welche die Wellen beim Gitter erleiden, ist also nicht merkbar verschieden von π . Dies steht in Uebereinstimmung mit Berechnungen von J. J. Thomson ¹⁾, nach denen die Phasenänderung nicht merkbar von π verschieden sein soll, wenn die Dicke der Drähte des Gitters klein gegen ihre gegenseitige Entfernungen ist.

1) J. J. Thomson, Recent researches in electricity and magnetism, Oxford 1893. p. 427, Formel (2).

Dadurch, dass die Hauptelectrode H_1 ebenfalls durch die Glimmentladung zwischen G_1 und G_2 entladen wird, kann man die Zehnder'sche Röhre auch sehr gut zur Demonstration der Wirkung *geschlossener* (nicht geradliniger) *Resonatoren* benutzen. Es ist dieses sehr günstig, weil man so auch die Wirkung der magnetischen Kraft demonstrieren kann.

Die Versuche, welche Hertz in Wied. Ann. 34. p. 155. 1888 beschrieben hat, und durch welche man *die Vertheilung der electricen und magnetischen Kraft um eine gradlinige Schwingung* untersuchen kann, lassen sich sämtlich durch folgende Anordnung sicher demonstrieren:

Auf dem Gestell, welches dem kreisförmigen Resonator (von 75 cm Durchmesser) zum Träger dient, wird die Zehnder'sche Röhre befestigt, sodass die Glimmelectroden nahe bei der Unterbrechungsstelle des Resonators liegen. Die zu G_1 , G_2 führenden Platindrähe werden an den Resonator angelegt in der Nähe der Unterbrechungsstelle. H_1 wird mit dem Electroskop und der Trockensäule verbunden, während der Resonator an dem Punkte K , welcher seiner Unterbrechungsstelle gegenüber liegt, zur Erde abgeleitet wird. Die Erdleitung stört nicht, weil K ein Knoten der electricen Kraft ist. — Diese Anordnung ist, abgesehen von ihrer besseren Demonstrationsfähigkeit, sogar empfindlicher, als die Beobachtung der directen Resonatorfunken. — Man kann alle, von Hertz beschriebenen Versuche sicher demonstrieren, u. A. auch, dass die Schwingungen im Resonator aufhören, wenn man seine Capacität durch aufgehängte Staniolblätter ändert. Das Electroskop steht dann ruhig in Spreizstellung, um sofort zusammenzuzucken, wenn man die Staniolblätter wieder fort nimmt. — Von Wichtigkeit ist, dass der Experimentator sich weit vom Resonator entfernen kann. Man überzeugt sich nämlich leicht, dass die Erscheinungen unter Umständen gestört werden durch die Nähe menschlicher Körper, dass z. B. die Schwingungen im Resonator dadurch wieder hervorgerufen werden, während sie fehlen, wenn man nicht an ihn herantritt.

Will man schnellere Schwingungen studiren, als sie dem Resonator von 75 cm Durchmesser entsprechen, so kann man zweckmässig einen Kupferdraht D direct in die Enden E_1 , E_2 der Glasröhren der Zehnder'schen Röhre einfügen (vgl. Fig. 2)

und mit den zu G_1 , G_2 führenden Platindrähten umwickeln. Ich erhielt Resonanz mit dem Hohlspiegelerreger, wenn der Draht D die Länge von 15,5 cm besass. Die ganze Länge L der Resonatorleitung betrug daher 24 cm. Die Differenz von L gegen $\frac{1}{2}\lambda = 30$ cm rührt wiederum her von der Capacität der Glimmelectroden G_1 , G_2 .

Mit einem so gestalteten Resonator kann man nun alle *Erscheinungen, in stehenden Wellen*, welche Herz in Wied. Ann. 34, p. 609. 1888 beschrieben hat, schon gut an den kurzen Wellen des Hohlspiegelerregers bei Reflexion von einer mässig grossen Metallwand (2 m hoch und breit) demonstrieren. Diese Erscheinungen, z. B. die verschiedene Lage der Bäuche und Knoten der electricen, bezw. magnetischen Kraft sind so ausserordentlich instructiv, dass ich es bisher stets als Mangel empfunden habe, gerade diese Versuche nicht einem grösseren Auditorium demonstrieren zu können. — Es gelingt dies aber in der genannten Weise durchaus.

Mit der nach Fig. 2 montirten Zehnder'schen Röhre kann man auch sehr gut die Wirkung der *längs*

Drähten fortgepflanzten electromagnetischen Kräfte demonstrieren; so z. B. die Erscheinung der *multiplen Resonanz*.

Man lässt dazu am zweckmässigsten die Zehnder'sche Röhre in fester Lage zwischen den Paralleldrähten der Lecher'schen oder Blondlot'schen Anordnung, und verschiebt hinter der Röhre einen Metallbügel (Brücke), auf den Drähten. Je nach seiner Entfernung von der Röhre liegen die Blätter des Electroskops zusammen, oder spreizen ruhig. Diese successiven Distanzen der Brücke richten sich nur nach den Dimensionen des Resonators, d. h. der Länge des Drahtes D . Ich fand, dass die Wellenlänge ziemlich unabhängig von der Gestalt des Drahtes D ist. Der Resonator reagirt sowohl auf die electriche, als auf die magnetische Kraft. Wenn die Brücke in einem Knoten für erstere liegt, so liegt sie in einem Bauch für letztere Kraft. — Alles dies ist ohne weiteres demonstrir-

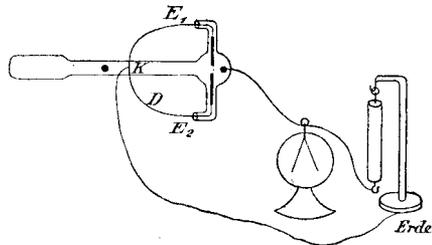


Fig. 2.

bar. — Die Blondlot'sche Anordnung ist zum Studium kurzer Wellen der Lecher'schen vorzuziehen. Ich habe wenigstens mit ersterer bessere Resultate, als mit letzterer erhalten. Für einen Resonator der Länge $L = 41$ cm konnte ich deutlich 7 successive Knoten der electricischen Kraft nachweisen, deren Distanz je 52 cm betrug. Für die magnetische Kraft konnte ich 4—5 Knoten nachweisen. (Ob der Resonator besser auf die electricische Kraft anspricht, oder auf die magnetische, hängt von seiner Gestalt und Lage ab. Ich denke darauf ausführlicher demnächst zurückkommen zu können.) — Mit derselben Blondlot'schen Anordnung konnte ich auch mit dem Resonator der Länge $L = 24$ cm deutlich stehende Wellen nachweisen. Die Distanz der successiven Knoten betrug nahezu 30 cm.

Ich lasse hier einige, zu Resonatoren verschiedener Länge L zugehörige halbe Wellenlängen (Distanz der successiven Knoten) folgen, welche ich an dem Drahtsystem (roh) beobachtete (die Distanz der Paralleldrähte betrug 11 cm).

L	24	31	41	48	54
$\frac{1}{2} \lambda$	30	43	52	62	69

Man kann leicht die *Schirmwirkung* zeigen, welche selbst ein dünner, geschlossener Metalldraht auf Punkte der von ihm umgrenzten Fläche ausübt. Wenn die Ebene des Resonators senkrecht zu den Paralleldrähten liegt, sodass der Resonator auf die electricische Kraft reagirt, so gehen die Goldblätter, die ursprünglich durch die Glimmentladung zusammenfielen, sofort in Spreizstellung, wenn man die Resonatorleitung mit einem geschlossenen, von ihr isolirten Metalldraht umgrenzt.

Wenn man einen Metallbügel (Brücke) über die Paralleldrähte an einer solchen Stelle legt, dass eine am Ende der Drähte angelegte Geissler'sche Röhre lebhaft leuchtet, so hörte die Wirkung der electricischen und magnetischen Kräfte auf einen Resonator von beliebigen Dimensionen hinter der Brücke nicht auf. Sie ist zwar schwächer, wie vor der Brücke, sodass im allgemeinen das Electroskop ruhig geladen bleibt; sowie man aber hinter der ersten Brücke und dem Resonator noch eine zweite Brücke auflegt, so zucken die Blätter des

Electroskops lebhaft zusammen, wenn die zweite Brücke in geeigneten Distanzen hinter dem Resonator liegt. Durch Verschieben dieser zweiten Brücke erhält man so dieselbe Wellenlänge der Resonatorschwingung, als wenn man die erste Brücke nicht auflegt. — Diese Erscheinung ist auffallend, weil durch das Auflegen der ersten Brücke im hinteren Theile des Drahtsystems regelmässige, wenig gedämpfte Schwingungen von einer bestimmten Periode entstehen. — Bei der weiteren Verfolgung dieser Erscheinung bemerkte ich, dass es gar nicht auf eine bestimmte Stellung der ersten Brücke dabei ankommt, sondern dass sie auch eintreten bei beliebiger (nur nicht vom Erreger zu weit, etwa über 6 m, entfernten) Lage. In diesem Falle kann man durch eine gewöhnliche, an die Paralleldrähte mit den Electroden angehängte Geissler'sche Röhre die Existenz von electricen Schwingungen hinter der Brücke gar nicht mehr nachweisen. Trotzdem sind sie also noch vorhanden, und zwar in dem Maasse, dass man sie zur Bestimmung der Wellenlänge der Resonatorschwingung verwerthen kann.

Von der Existenz dieser Schwingungen überzeugt man sich auch, wenn man die Glimmelectroden metallisch mit dem hinteren Ende der Paralleldrähte verbindet. Die Glimmentladung hört bei keiner Stellung der Brücke auf, sie wird zwar in den Resonanzstellungen derselben besonders intensiv.

Wegen dieser zu grossen Empfindlichkeit kann man daher in dieser Weise die von Lecher entdeckten *Resonanzerscheinungen* nicht demonstrieren. Es gelingt dies aber, wenn man die Platindrähte der Glimmelectroden um zwei Glasröhrchen wickelt, welche (nach dem Vorschlag von Rubens¹⁾ auf die Paralleldrähte aufgeschoben werden. Die Dicke, resp. die Bewickelung der Glasröhrchen kann man so reguliren, dass die Glimmentladung nur bei den Resonanzstellungen der Brücke einsetzt. In diesem Falle stört aber meist das Anlegen der Erd- oder Electroskopleitung an die Glimmelectroden.

Dagegen gelangt man zum Ziel, wenn man die Hauptelectroden metallisch an die Paralleldräht anlegt, und die Glimmelectroden mit der Erde, resp. dem Electroskop und der Trockensäule verbindet. Nur ist die gewöhnliche Form

1) H. Rubens, Wied. Ann. **42**. p. 154. 1891.

der Zehnder'schen Röhren wegen ihres zu kleinen Querschnittes nicht sehr empfindlich, sodass manche Oberschwingungen versagen. — Will man daher diese Resonanzerscheinungen im unverdunkelten Zimmer demonstrieren, so verfährt man am besten so, dass man in eine empfindliche Geissler'sche Röhre, welche entweder mit ihren Hauptelectroden an die Paralleldrähte angelegt oder einfach über dieselben übergelegt wird (ohne Electroden), zwei Seitenelectroden G_1 , G_2 einschmilzt, welche beide in die Leuchtmasse der Geissler'schen Röhre hineinragen. Wird G_1 zur Erde abgeleitet, G_2 mit Trockensäule und Electroskop verbunden, so fallen dessen Blätter in den Resonanzstellungen der Brücke zusammen, während sie sonst ruhig spreizen.

Man kann also nach der beschriebenen Methode alle an die Hertz'schen Schwingungen anknüpfenden Versuche mit Hilfe einer Zehnder'schen Röhre im unverdunkelten Raume demonstrieren, ohne Anwendung eines Hochspannungsaccumulators und ohne erschütterungsfreie Aufstellung.

Göttingen, Ende April 1894.
