

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 2

Anregungen für Unterricht und Lehre

ISBN 3 - 7896 - 0100 - 4

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.
Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.
Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage
www.solstice.de
werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Georg Singer

Reflexion und Transmission elektrischer Wellen an Metallgittern

Jedem von uns ist es wohl schon öfters so ergangen: Man hat von der Behandlung eines Phänomens eine bestimmte Vorstellung, die größtenteils auf das zurückgeht, was man selbst gelernt hat. Eines Tages aber löst irgendein harmloses Ereignis, etwa eine unvoreingenommene Schülerfrage oder eine scheinbar unbedeutende Abänderung der Versuchsanordnung, Zweifel aus. Man blättert in allen erreichbaren einschlägigen Büchern nach und findet - nichts, das auf die so unerwartet aufgetauchten Bedenken eingeht. Man wird unsicher und beginnt, am eigenen Verstand zu zweifeln. Schließlich entdeckt man doch einen Halbsatz mit einem Literaturhinweis, der andeutet, daß das Problem vielleicht wirklich nicht so trivial ist und sich jemand schon 'mal eingehender damit befaßt hat. Man sucht die Literatur auf, und das bisher Gewußte erscheint in neuem Licht. Der Fall liegt in Wahrheit viel komplizierter als man ursprünglich gedacht hat. Man hat einen Sonderfall für allgemein, eine Ausnahme für die Regel gehalten, und man freut sich, daß es bei einem zunächst so banal erscheinenden Phänomen noch so viel hinzuzulernen gibt und sich die Natur gar nicht so simpel und linear verhält, wie es Lehrer und Lehrbücher oftmals weis machen wollen. Ich glaube, es kann wertvoll sein, gelegentlich auch dies Schülern nahezubringen zu versuchen.

Ein Gegenstand, bei dem es mir unlängst so ähnlich ergangen ist, ist das Hertzsche Drahtgitter. Mein Entschluß, mich eingehender mit Reflexion und Transmission elektromagnetischer Wellen an metallischen Gittern zu befassen, ging davon aus, daß ich für die Klystron-Mikrowellen mit 3,2 cm Wellenlänge nicht das zugehörige, sondern ein größeres, für Dezimeterwellen vorgesehene Drahtgitter verwendete, in der Meinung, dieses könne den gewünschten Zweck vielleicht noch besser erfüllen. Weit gefehlt! Das Dezimeterwellengitter ließ zwar eine zu den Drähten senkrecht polarisierte Welle nahezu hundertprozentig durch, schwächte aber eine drahtparallel polarisierte nur etwa auf die Hälfte. Ich fragte mich, wie das mit unserem üblichen Erklärungsmodell zu vereinbaren wäre. Im folgenden fasse ich zusammen, was ich seitdem hierzu herausfinden konnte.

Die Geschichte des Problems beginnt vor gut hundert Jahren mit Heinrich Hertz' Karlsruher Experimenten, die die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen mit sich brachten. Hertz, der mit ca. 7 dm langen Wellen arbeitete, fand, daß ein zwischen Sender und Empfänger angeordneter Holzrahmen, der mit parallelen, 1 mm dicken Kupferdrähten in 3 cm Abstand bespannt ist, als Polarisator wirkt, indem er Strahlen reflektiert, deren elektrische Komponente parallel zu den Drähten gerichtet ist, und die um 90° gedrehte Polarisationsrichtung ungeschwächt hindurchläßt [1].

Der erste Ansatz zu einer theoretischen Erklärung der von Hertz entdeckten Erscheinung auf der Grundlage der Maxwell'schen Elektrodynamik stammt von J. J. Thomson. Sein Buch "Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism", erschienen 1893, enthält ein Kapitel über Reflexion elektromagnetischer Wellen durch Drahtgitter [2]. Von dorthier stammt die uns wohlvertraute Vorstellung, daß eine auf das Gitter einfallende, parallel zu den Drähten polarisierte, ebene elektromagnetische Welle in den Drähten Wechselströme hervorruft, die ihrerseits in der Umgebung ein Wechselfeld erzeugen. Thomson errechnet dann für den Fall, daß der Mittenabstand D der Drähte gegenüber der Wellenlänge λ klein ist, eine reflektierte Welle, die in einiger Entfernung vom Gitter eben ist, die gleiche Amplitude wie die einfallende und gegenüber dieser eine Phasenverschiebung hat, deren Unterschied von 180° vom Verhältnis D/A (= Drahtabstand : Drahtradius) bestimmt ist. Man hätte demnach bei einem Drahtgitter für die drahtparallele Komponente praktisch dieselben Verhältnisse wie bei einer massiven Metallplatte, nämlich hundertprozentige Reflexion unabhängig vom Aufbau des Gitters. Wenn die elektrische Feldstärke senkrecht zu den Drähten ist, schreibt Thomson, sei die Reflexion sehr gering. Es erscheint ihm unnötig, dies durch eine Berechnung zu untermauern, weil ja nach seiner Ansicht eine senkrecht zu den Drähten polarisierte Welle in diesen keine Wechselströme erregt.

Diese Erklärung der Wirkungsweise des Hertz'schen Gitters ist auch heute noch Lehrmeinung. Sie ist in den Lehrbüchern der Experimentalphysik ebenso verbreitet wie in der Schulbuchliteratur. Verschwiegen wird allerdings Thomsons eigene Einschränkung auf „große“ λ/D . Aber das ist eigentlich gar nicht so schlimm, denn schon 1898 hat der britische Theoretiker H. Lamb der London Mathematical Society

vorgerechnet, daß Thomsons Theorie nicht einmal unter dieser Voraussetzung immer zutrifft [3]. Bereits seit Beginn unseres Jahrhunderts liegen auch experimentelle Untersuchungen vor, die Lambs Kritik an Thomson bestätigen.

Die Ergebnisse der frühen Experimente sind vielleicht noch anfechtbar, weil damals keine hinreichend monochromatischen Strahlungsquellen mit konstanter, ausreichend großer Leistung und keine zufriedenstellenden Empfangsapparaturen zur Verfügung standen. Dies änderte sich erst durch den kräftigen Schub, den der Zweite Weltkrieg der Radartechnik erteilte. 1956 promovierte der Amerikaner W. Pursley über das Thema „Die Transmission elektromagnetischer Wellen durch Drahtgitter“ und legte damit erstmals umfassende und zuverlässige experimentelle Ergebnisse zu diesem Thema vor [4]. Er arbeitete hauptsächlich mit 3 cm langen Mikrowellen aus einem Klystronsender. Seine Resultate können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

Die Transmission der Parallelkomponente (Abb. 1) ist im allgemeinen umso größer, je größer D/A .

Sie besitzt für $\lambda/D = 1$ ein Maximum nahe 100 % und fällt für zunehmende Werte von λ/D umso langsamer gegen 0, je größer D/A ist. Offenbar genügt es, bei vorgegebenem λ/D das Verhältnis D/A groß genug zu machen, um eine beliebig große Transmission zu erreichen. Für $D/A \lesssim 4$ ist die Transmission nahe bei 0 unabhängig von der Wellenlänge.

Die Transmission der Senkrechtkomponente (Abb. 2) ist im allgemeinen umso kleiner, je kleiner D/A . Sie wächst bei großem D/A mit zunehmendem λ/D monoton gegen 100 %. Für kleinere Werte von D/A erreicht sie bei $\lambda/D \approx 1,25$ ein lokales Maximum nahe 100 %, durchläuft ein relatives Minimum bei $\lambda/D \approx 2$ und steigt dann mehr oder weniger steil gegen

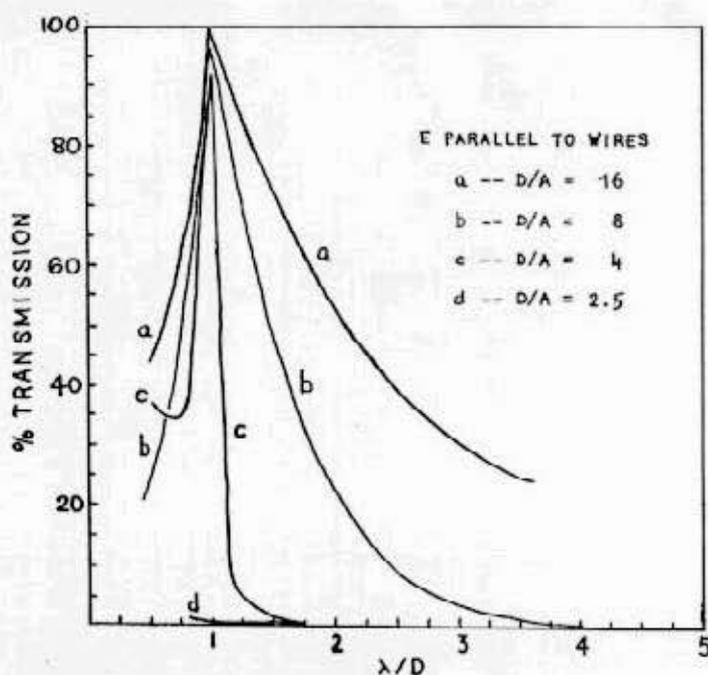


Abb. 1: Transmission der drahtparallelen Komponente (nach [4])

100 %.

Mein Dezimeterwellengitter ($A = 1,5 \text{ mm}$; $D = 16,5 \text{ mm}$) hat für die 32 mm langen Mikrowellen des Phywe-Klystrons die Parameterwerte $D/A = 11$ und $\lambda/D = 1,9$. Nach Pursleys Graphiken ist daher eine Transmission von knapp 50 % für die Parallel- und von knapp 100 % für die Senkrechtkomponente zu erwarten. Meine Messung (s. o.) bestätigt dies. Das Leybold-Mikrowellengitter hat die Parameterwerte $D/A = 6$ und $\lambda/D = 5,3$ für $\lambda = 32 \text{ mm}$, so daß als Trans-

mission der Parallelkomponente 0 % und der Senkrechtkomponente gut 90 % auftreten sollte. Dies entspricht sowohl den Tatsachen als auch unseren Absichten und Vorstellungen. Dagegen würde uns ein Gitter mit $\lambda/D = 1$ und etwa $D/A = 4$ (also bei 32 mm Wellenlänge 32 mm Drahtabstand und 8 mm Radius) in arge Verlegenheit bringen. Gerade das hohe Transmissionsmaximum der Parallelkomponente bei $\lambda/D = 1$ für einen breiten D/A -Bereich führt das übliche Erklärungsmodell ad absurdum. Dieses Modell wird jedoch stets als ganz allgemein gültig vorgetragen und bietet Parametern keine Einflußmöglichkeit, das heißt, es ist nicht verbesserungsfähig. Ist dies ein Beispiel dafür, daß in der Physik manchmal an einem offensichtlich falschen Konzept nur deswegen festgehalten wird, weil es so überaus einleuchtend und leicht zu vermitteln ist? Sollte man nicht wenigstens in einem renommierten Lehrbuch einen Hinweis erwarten dürfen, daß die auf Thomson zurückgehende Erklärung des Hertz'schen Gitters zwar unmittelbar überzeugt, aber nur unter bestimmten Einschränkungen zutrifft?

Theoretisch abgesichert sind Pursleys Resultate seit langem. Die exakte und allgemeine Theorie der Beugung elektromagnetischer Wellen an einem Drahtgitter wurde von W. v. Ignatowsky zwischen 1905

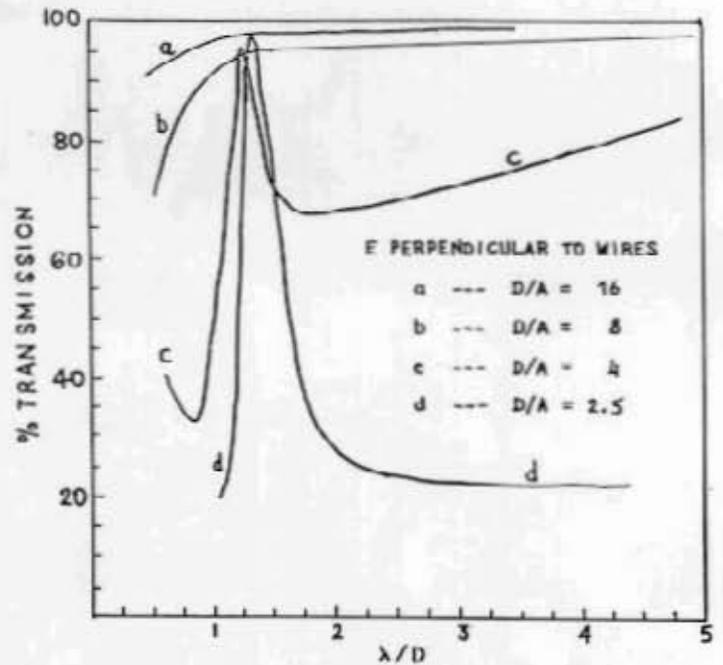


Abb. 2: Transmission der drahtsenkrechten Komponente (nach [4])

und 1914 in einer Folge von sechs Artikeln in den Annalen der Physik publiziert.

H. Lamb untersuchte in seinem 1898er Vortrag, in dessen Verlauf er Thomsons Drahtgitterrechnung als fehlerhaft nachwies, hauptsächlich das Verhalten elektromagnetischer Wellen an Gittern, die aus dünnen, parallel und äquidistant angeordneten, gleichen Metallstreifen bestehen. Solche Streifengitter lassen sich aus Aluminiumfolie, die man auf dünne Pappe klebt, leicht mit unterschiedlichen Parameterwerten herstellen. Ich habe drei Serien für $D/A = 8$, $D/A = 4$ und $D/A = 2,5$

($D =$ Mittenabstand der Streifen, $2A =$ Streifenbreite) angefertigt, wobei jede Serie aus fünf bis sieben Gittern mit λ/D aus dem Intervall $[0,67; 4,0]$ besteht.

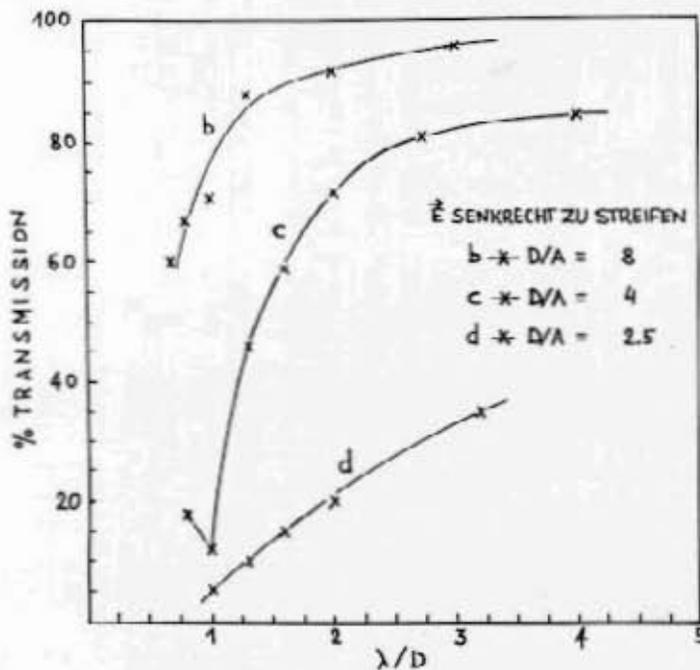


Abb. 4: Transmission der streifen-senkrechten Komponente

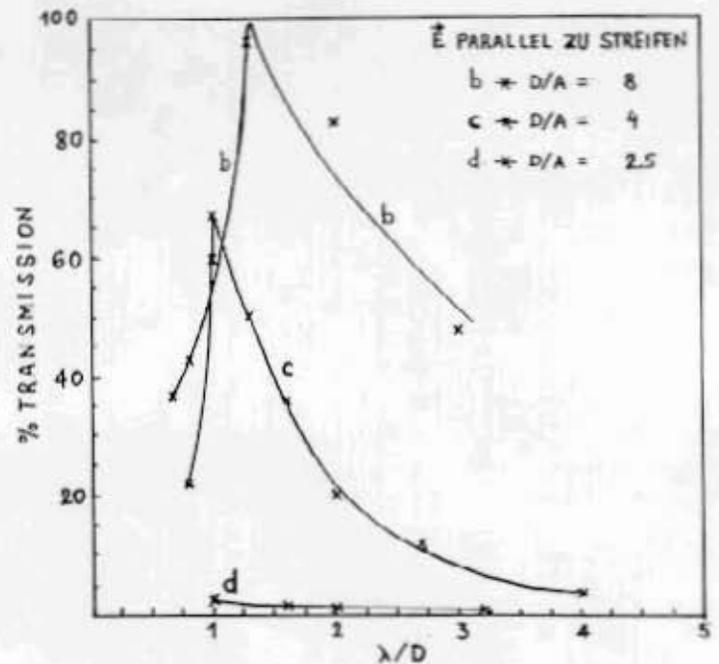


Abb. 3: Transmission der streifen-parallelen Komponente

Für jedes Gitter habe ich mit der Phywe-Mikrowellenapparatur die Transmission der Parallel- und der Senkrechtkomponente unter Berücksichtigung der Absorption durch die Pappe gemessen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 und 4, gesondert für jede Polarisationsrichtung und jeden D/A -Wert, graphisch dargestellt. Der Vergleich mit der Transmission an den Drahtgittern (Abbildungen 1 und 2) zeigt bei der

Parallelkomponente ein sehr ähnliches Verhalten, insbesondere das Transmissionsmaximum bei $\lambda/D \approx 1$. Bei der Senkrechtkomponente entfällt das für kleine D/A -Werte bei $\lambda/D \approx 1,25$ auftretende lokale Maximum. Auch Pursley hat schon mit Streifengittern experimentiert und ganz ähnliche Resultate erhalten [4]. Baldwin und Heins veröffentlichten 1954 eine exakte Lösung für die Beugung an einem Streifengitter mit $D/A = 4$ [5]. In Abbildung 5 ist die von ihnen berechnete Transmission der Senkrechtkomponente gegen λ/D aufgetragen. Meine Messung (Abb. 4) stimmt damit qualitativ gut überein, wobei anzumerken ist, daß die Berechnung für ein unendlich ausgedehntes Gitter aus ideal leitfähigen, unendlich dünnen Metallstreifen ausgeführt wurde. Lamb (a.a.O.) behandelte die Streifengitter ebenso wie die Drahtgitter nur näherungsweise für $\lambda/D \gg 1$.

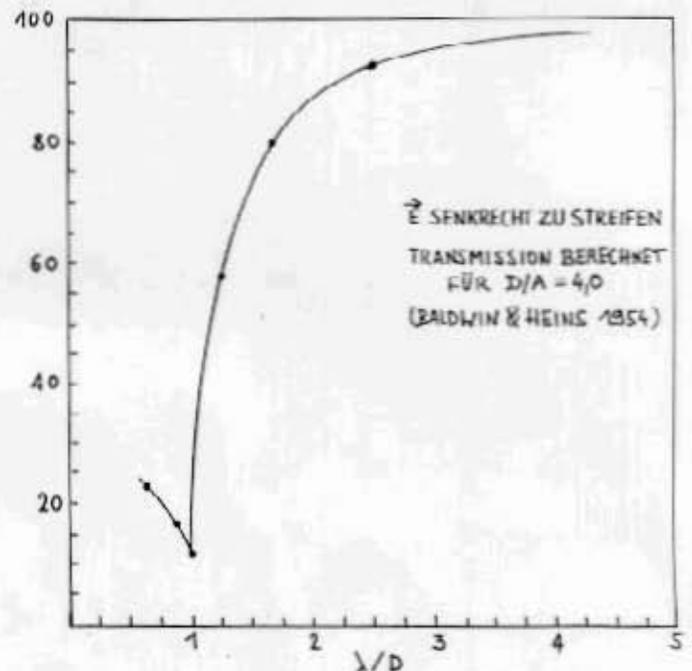


Abb. 5: Transmission der streifen-senkrechten Komponente, berechnet (nach [5])

Literatur

- [1] Friedburg, H., „Die Karlsruher Experimente von Heinrich Hertz“ Fridericiana (Ztschr. d. Univ. Karlsruhe) Heft 41, 1988 (39 - 57)
- [2] Thomson, J. J., „Reflection of Electromagnetic Waves from Wires“, Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism, Oxford 1893
- [3] Lamb, H., „On the Reflection and Transmission of Electric Waves by a Metallic Grating“, Proceedings of the London Mathematical Society Vol. 29, 1898 (523 - 544)
- [4] Pursley, W. K., „The Transmission of Electromagnetic Waves through Wire Diffraction Gratings“, Ann Arbor 1956
- [5] Baldwin, G. L. u. A. E. Heins, „On the Diffraction of a Plane Wave by an Infinite Plane Grating“, Mathematica scandinavica Vol. 2, 1954 (103 - 118)