

Das Doppelspaltexperiment in der “Dynamischen Gravitationstheorie” (DGT)

(24. Juni 2009)

Die “Dynamische Gravitationstheorie” (DGT) von Dieter Grosch (siehe <http://www.grosch.homepage.t-online.de/>) soll nach eigenem Anspruch alle bekannten Theorien vereinigen:

“Ich benutze die bestätigten Theorien und deren Experimente und vereinige sie, dass sie alle mit 1 eT und Bewegung im 3D Raum sich beschreiben lassen. Dazu beschreibe ich die Eigenschaften der Objekte NEU und erkläre damit die bekanten Theorien.” (Dieter Grosch in dsp, 08.06.2009)

Nach diesem Anspruch müssen dann auch die experimentellen Befunde von Doppelspaltexperimenten im Rahmen der DGT erklärt werden können. Die Erklärungsversuche werden hier vorgestellt und kritisch kommentiert.

1 Experimentelle Befunde

Die Voraussage von de Broglie, dass alle Materieteilchen wellenähnliche Eigenschaften besitzen, wurde experimentell bestätigt.

Die erste Beobachtung von Beugungseffekten von Elektronen gelang Clinton J. Davisson (Nobelpreis 1937) und Lester A. Germer 1927. Sie bestrahlten einen Nickel-Einkristall mit Elektronen und untersuchten die Intensität der gestreuten Elektronen als Funktion des Streuwinkels. Ihre Ergebnisse stimmten mit den Voraussagen nach der de-Broglie-Hypothese überein.

Dass auch neutrale Atome und Moleküle Welleneigenschaften besitzen, wurde 1930 erstmals von Stern und Estermann gezeigt. Sie beobachteten Beugung von Strahlen aus Helium-Atomen und Wasserstoffmolekülen an einem Lithiumfluorid-Kristall. Inzwischen wurde auch die Beugung von anderen Atomen sowie von Protonen und Neutronen beobachtet. In allen Fällen sind die gemessenen Wellenlängen in Übereinstimmung mit de Broglies Voraussage.

Es liegt daher nahe zu prüfen, ob Teilchen, z.B. Elektronen, auch Interferenz am Doppelspalt zeigen. Zum Vergleichen dienen die Doppelspaltversuche mit Teilchen und mit Wellen (z.B. Wasserwellen, Licht oder anderen elektromagnetischen Wellen).

Bei Verwendung von *klassischen Teilchen* ergibt sich hinter dem Doppelspalt eine Verteilung, die der Überlagerung zweier Gauß-Kurven ähnelt.

Klassische Wellen ergeben am Doppelspalt unter Berücksichtigung der Spaltbreite ein Interferenzmuster mit der Intensitätsverteilung

$$I \sim \left[\frac{\sin(\phi_e/2)}{\phi_e/2} \right]^2 \cdot \cos^2(\phi_d/2)$$

Dabei bezeichnen ϕ_e und ϕ_d die Phasendifferenzen beim Einzel- bzw. Doppelspalt.

Das Doppelspaltexperiment mit *Elektronen* ergibt ein Interferenzmuster, das der Intensitätsverteilung einer klassischen Welle am Doppelspalt entspricht.

1.1 Erste Versuche zur Erzeugung von Elektroneninterferenzen

Frühe Versuche wurden von Möllenstedt und Düker sowie von Jönsson durchgeführt.

- Möllenstedt und Düker erzeugten Elektroneninterferenzen unter Verwendung eines elektronischen Biprismas:

G. Möllenstedt, H. Düker: Fresnelscher Interferenzversuch mit einem Biprisma für Elektronenwellen. Die Naturwissenschaften, 42, 2, 41-41 (1955)

<http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00621530>

G. Möllenstedt, H. Düker: Beobachtungen und Messungen an Biprisma-Interferenzen mit

Elektronenwellen; Zeitschrift für Physik, 145, 377-397 (1956)

<http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF01326780>

Bilder aus der Originalarbeit:

<http://www.leifphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche#Versuch%20von%20M%C3%B6llenstedt%20und%20D%C3%BCcker> (*)

- Der erste experimentelle Nachweis von Elektroneninterferenzen am Doppelspalt (und an Mehrfachspalten) gelang Jönsson:

Jönsson, Claus: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 161 (1961), S. 454-474

<http://www.leifphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche#Versuch%20von%20J%C3%B6nsson>

<http://www.leifphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/geschichte#J%C3%B6nsson%20Originalarbeit>

Angemerkt sei, dass das Nachweisen von Elektroneninterferenzen unter Verwendung moderner Elektronenmikroskope so einfach geworden ist, dass es bereits in Praktika während des Studiums durchgeführt werden kann. Beispiel:

http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_mathematik_und_naturwissenschaften/fachrichtung_physik/isp/tbg/lehre/versuchsanleitung_eh.pdf

Bei Versuchen wie den genannten zur Elektroneninterferenz muss eine elektronenoptische Vergrößerung des Interferenzmusters erfolgen. Im obigen Link (*) zum Versuch von Möllenstedt und Düker ist dies in einer Aufbauzeichnung dargestellt. In

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-97332005000300004

findet sich ein modernes Beispiel eines elektronischen Biprismas mit nachgeschalteter Strahlbeeinflussung durch Ablenkelemente und ein Wien-Filter.

1.2 Versuche mit Einzelelektronen-Nachweis

Mit besserer Messtechnik konnten später auch Belichtungsreihen mit steigender Belichtungszeit angefertigt werden, die den Aufbau des Interferenzmusters erkennbar werden ließen:

- das Experiment von Merli, Missiroli und Pozzi (MMP-Experiment):

http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003816/01/mmp_arch.pdf

Bilder vom Experiment:

<http://www.leifphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche#Einzelelektron>

Video:

<https://www.bo.imm.cnr.it/users/lulli/downintel/electroninterfea.html>

- das Experiment von Akira Tonomura:

Originalarbeit: A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki and H. Ezawa: Demonstration of single-electron build-up of an interference pattern; American Journal of Physics 57 117-120

Diese Arbeit steht im Internet zur Verfügung:

https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/FI34A/1/material_docente/objeto/139739

Zur Ergänzung:

<http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>

Hier wird auch ein Video angeboten, das zeigt, wie aus den einzelnen Elektronenlokalisationen mit der Zeit das Interferenzmuster (bei einem elektronischen Biprisma) entsteht.

Bei solchen Versuchen sind folgende Beobachtungen zu machen:

- Jeweils ein Lichtblitz auf dem Detektorschirm zeigt eine Elektronenlokalisierung an, das bedeutet: Elektronen kommen immer stückweise an.
- Die Lichtblitze sind stets von gleicher Helligkeit, das bedeutet: Elektronen kommen immer im Ganzen an.
- Bei einer geringeren Intensität der Elektronenkanone ergeben sich immer noch Lichtblitze derselben Helligkeit, nur weniger pro Zeiteinheit.
- Nach hinreichend langer Zeit ergibt sich eine Verteilung der Elektronenlokalisationen gemäß des Intensitätsverlaufs bei der Interferenz von Wellen.

2 Deutungsversuch in der DGT

Auf der Homepage von DG wird das Doppelspaltexperiment wie folgt gedeutet:

“Um das Doppelspaltexperiment mit der Dynamischen Gravitationstheorie zu beschreiben, braucht man keine besonderen Annahmen zu machen, wie in etwa einen Welle Teilchen Dualismus.

Geht man, wie in Kap 1. beschreiben, davon aus, das jedes Teilchen von einem kugelsymmetrischen Kraftfeld in Form von Gravitation und Ladung umgeben ist, dann wird, wenn sich ein Teilchen auf ein Hindernis zu bewegt, das mit einem Doppelspalt versehen ist, das Feld von dem Hindernis zurückgeworfen, während durch die Spalten sich das Feld mit je einem neuen Feldzentrum ausbreitet. Das bedeutet, dass je nach der Geschwindigkeit, mit der sich das Teilchen auf das Hindernis zu bewegt, im Verhältnis zu dem Spaltabstand, die sich an jedem Spalt ausbreitenden Kraftwellen mit einander interferiert, und so das bekannte Wellenbild erzeugt.

Das Teilchen selbst bleibt dabei erhalten, nur überlagern sich seine Kraftfelder, so dass es scheinbar kräfteelos ist, also den Charakter eines Neutrinos annimmt. “

Diese Vorstellungen sind schnell widerlegt:

1. Bei klassischen Wellen ist das Interferenzmuster in seiner Struktur von Anfang an vollständig vorhanden. Dies wäre auch bei der genannten “Kraftwelleninterferenz” so. Tatsächlich zeigt die zeitliche Entwicklung des Interferenzmusters aus einzelnen Elektronenlokalisationen, dass am Doppelspalt keine Interferenz klassischer Wellen vorliegt.
2. Dass die Teilchen “Neutrinocharakter” annehmen, ist experimentell widerlegt. Schon bei den Versuchen von Möllenstedt/Düker und von Jönsson wurden die Elektronen nach dem Durchgang durch das Biprisma bzw. den Doppelspalt elektronenoptisch beeinflusst. Neutrinos können aber nicht elektronenoptisch beeinflusst werden - weder reale Neutrinos noch DGT-Neutrinos.

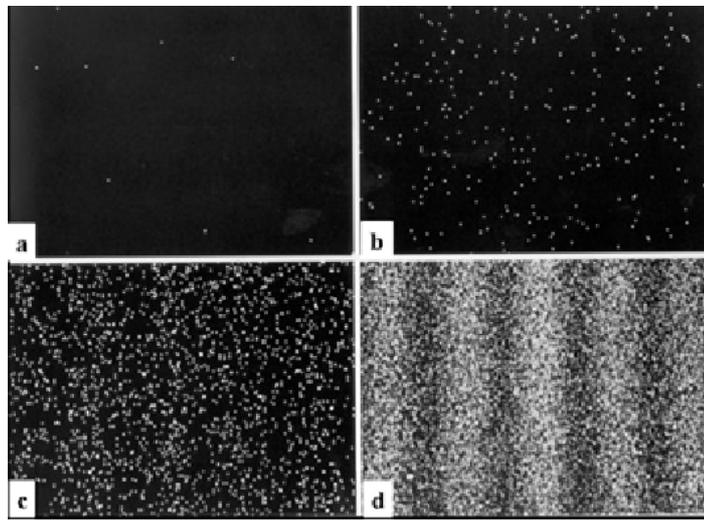
3 Diskussion in dsp

3.1 Interferenzmuster aus Gauß-Verteilungen

Die erste Reaktion von DG auf die angegebenen Links zum zeitlichen Aufbau des Interferenzmusters der Elektronenlokalisationen war:

“Der Link Ist falsch gedeutet. [...] Dort werden als Bilder keine Interferenzenmuster Dargestellt sonder ganz einfach die klassische Summation der sich bildenen Gaußverteilungen der zwie Spalte.” (DG in dsp, 10.06.2009)

Gemeint ist die Abbildung "Fig. 2 Single electron events build up to from an interference pattern in the double-slit experiments" auf der Seite <http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>, die hier wiedergegeben wird:



Es sind deutlich 5 Maximumstreifen, getrennt durch 4 Minimumstreifen zu erkennen.

In dem auf der Seite angebotenen Video-Clip <http://rdg.ext.hitachi.co.jp/rd/movie/doubleslite-n.wmv>, der die Entstehung der Figur zeigt, sind sogar 10 Maximumstreifen, getrennt durch 9 Minimumstreifen, deutlich zu sehen.

Solche Interferenzstrukturen lassen sich nicht aus der Summe zweier Gaußverteilungen erzeugen, wie schon die Summe zweier normierter Normalverteilungen zeigt:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(x+a)^2/2}$$

Graph: Glockenkurve mit Maximum bei $x = -a$

$$f_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(x-a)^2/2}$$

Graph: Glockenkurve mit Maximum bei $x = +a$

Die Summe $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ hat dann höchstens zwei Maxima bei $x = -a$ und $x = +a$, und wenn die Verschiebung a klein genug ist, ähnelt die Summenkurve einer Glockenkurve, besitzt also nur ein einziges Maximum bei $x = 0$.

3.2 Interferenzmuster durch IR-Wellen. Der beheizte Draht.

Antwort DG auf die Widerlegung des Aufbaus des Interferenzmusters durch zwei Gauß(-ähnliche) Verteilungen:

“Richtig! Aber das hat nichts mit mit einer Interferenz zu tun Das ist die IR Frequenz des beheizten Drahte, denn ohne Beheizung erhält man dieses Muster eben nicht, sonst würde man ja nicht heizen.” (DG in dsp, 11.06.2009)

Noch deutlicher:

“Der Draht, der den Steg vom Doppelspalt bildet, wird, da in kalten Zustand kein Interferenzmuster gebildet, wird beheizt um es entstehen zu lassen. Also ist das Interferenz Muster ursächlich an die Beheizung gekoppelt und muß mit ihr erklärt werden.” (DG in dsp, 13.06.2009)

Dazu ist zu bemerken:

Heizung tritt - wenn überhaupt - nur in der Elektronenquelle auf: Hier werden durch den glühelektischen Effekt freie Elektronen für das Experiment erzeugt. Diese werden beschleunigt, und der aus der Quelle austretende Elektronenstrahl wird elektronenoptisch geformt, bevor er auf dem Doppelspalt auftrifft. Der Doppelspalt selbst wird nicht "beheizt", ebenso werden elektronische Biprismen nicht "beheizt".

Das beobachtete Interferenzmuster in der Elektronenverteilung lässt sich auch nicht mit einer elektromagnetischen Welle im IR-Bereich erklären, wie man leicht sieht:

1. Beim Versuch von Jönsson wurden die Elektronen mit 40 kV beschleunigt. Ihre de-Broglie-

Wellenlänge war daher

$$\lambda = 6,02 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

2. Bei der Doppelspaltinterferenz gilt für die Maxima

$$\sin(\alpha_e) = n \cdot \frac{\lambda_e}{d}$$

n : Ordnung des Maximums

d : Spaltabstand

3. Für IR ist

$$\lambda_{IR} = 780 \text{ nm} \dots 1 \text{ mm}$$

4. Für das Verhältnis der Winkel erhält man daher

$$\frac{\sin(\alpha_{IR})}{\sin(\alpha_e)} = \frac{\lambda_{IR}}{\lambda_e} > \frac{7,8 \cdot 10^{-7}}{6,02 \cdot 10^{-12}} = 1,3 \cdot 10^5$$

5. Beobachtet wurden die sich aus λ_e ergebenden Abstände benachbarter Interferenzmaxima, und nicht die aus λ_{IR} folgenden.

Dies trifft nicht nur auf den Versuch von Jönsson zu, sondern auf alle durchgeführten Doppelspaltexperimente mit Elektronen.

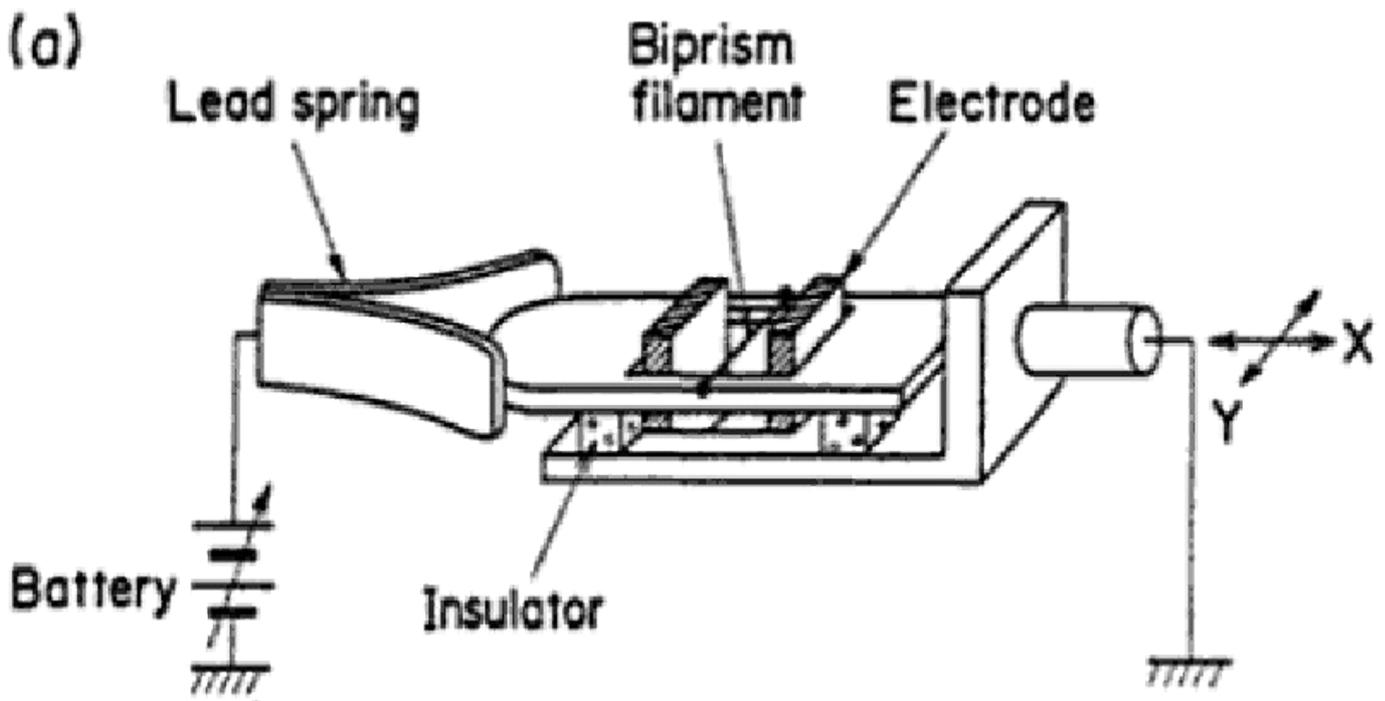
Im weiteren Verlauf beharrte DG auf der unsinnigen Behauptung, dass der Draht eines elektronischen Biprismas, wie es in <http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html> verwendet wurde, beheizt würde:

“Denn Du mußt schon das Interferenzmuster erklären, denn ohne Heizung des Drahtes gibt es keines, folglich ist die Heizung die Ursache für das Muster.” (in dsp, 13.06.2009)

“es geht um den von DH genannten Beitrag <http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>

Dort steht, daß das Biprisma aus zwei Platten und einem beheizten Draht gebildet wird.“ (in dsp, 14.06.2009)

Richtig ist, dass dort nichts von einem beheizten Draht steht. Eine an anderer Stelle gegebene Aufbauzeichnung von Tonomura bestätigt deutlich, dass keine Beheizung vorliegt:



(Quelle: Akira Tonomura: Electron holography; Springer, 1999)

In http://www.chiralem.physics.at/Workshop2_Formanek.pdf finden sich auch fotografische Aufnahmen von elektronischen Biprismen.

3.3 Interferenzmuster aus elektromagnetischen Wellen

Die "Kraftwelleninterferenz" wurde auch in dieser Diskussion hervorgeholt:

"Du hast etwas registriert, einen Lichtblitz, den Du nach Deiner Behauptung den Teilchen zuordnest, Während die DGT es dem das Teilchen umgebene Feld zuordnet. Das Feld geht durch beide Spalte oder Biprismen und bildet für jedes Teilchen zwei neue Ausgangspunkte deren Felder interferieren, also das Muster bilden, das Du registrierst Während das Teilchen nur einmal existiert." (DG in dsp, 19.06.2009)

1. In den betrachteten Experimenten wurden Leuchtschirme verwendet, die auf Elektronenbeschuss reagieren.
2. In den betrachteten Experimenten verlassen die Elektronen die Elektronenquelle mit einer bestimmten Geschwindigkeit und werden danach weder vor noch nach dem Doppelspalt beschleunigt. Sie bewegen sich also gleichförmig. Gleichförmig bewegte Ladung strahlt aber keine elektromagnetischen Wellen aus. Tatsächlich ist auch die einzige Strahlung, die man etwa bei Bildröhren messen kann, die Bremsstrahlung, die beim Auftreffen der Elektronen auf den Bildschirm entsteht.
3. Die de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen in Doppelspaltversuchen haben die Größenordnung von $1 \cdot 10^{-12} \text{m}$.

Im Tonomura-Experiment wurden die Elektronen mit 50 kV beschleunigt. Damit ergibt sich der Elektronenimpuls

$$p = \sqrt{eU \cdot (eU + 2m_e c^2)} / c = 6,87 \cdot 10^{-4} \text{ eVs/m}$$

und die de-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = 5,36 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

- a) Eine elektromagnetische Welle, die zu dem beobachteten Interferenzmuster führen soll, muss dann ebenfalls diese Wellenlänge aufweisen. Sie liegt also im Bereich harter Röntgenstrahlung. Eine solche Strahlung wird bei Doppelspaltexperimenten nicht gemessen.
- b) Die Erzeugung von elektromagnetischen Wellen mit dieser Wellenlänge durch beschleunigte Teilchen erfordert eine Beschleunigungsspannung, die sich wie folgt ergibt:

$$eU = h f$$

$$U = \frac{h c}{\lambda}$$

$$U = 2,32 \cdot 10^5 \text{ V}$$

Eine solche Spannung liegt bei Doppelspaltexperimenten nicht vor.

4. Das Interferenzmuster baut sich im Lauf der Zeit erst durch einzelne Elektronenlokalisationen auf. Eine elektromagnetische Welle führt nicht zu einem solchen Aufbau, sondern das Interferenzmuster wäre von Anfang an vollständig vorhanden.

Folgerung:

Eine Erklärung der Entstehung des Interferenzmusters durch elektromagnetische Wellen ist völlig ausgeschlossen.

3.4 Beeinflussung der Elektronen und des Interferenzmusters

Der nächste Einwand:

"Du Must mir schon z:B. eine Experiment von Eelktronen angeben Wo einer seits das Interferenz spektrum und anderer seits Dieses Nach Ablenkung durch el- oder mag- Feld gemessen wurde. Wenn dei Elektronen das Muster bilden, dann muß es Dadurch verschiebbar sein, Nur hat man diesen Beweis noch

nicht gemacht.” (DG in dsp, 16.06.2009)

“Ob Neutrino oder Elektron als Teilchen danach existieren, muss erst noch durch Experiment bestätigt werden.” (DG in dsp, 19.06.2009)

Es ist erwiesen, dass nach Doppelspalt oder Biprisma Elektronen vorliegen und keine Neutrinos. Experimentelle Befunde sind z.B.:

1. Die Objekte, die den Doppelspalt oder das Biprisma passiert haben, lassen sich elektronenoptisch, also mit elektrischen und magnetischen Feldern beeinflussen. Sie verhalten sich genauso, wie sich Elektronen unter diesen Umständen verhalten würden.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenmikroskop#Aufbau>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenoptik>

2. Das Interferenzmuster lässt sich mit einem Wien-Filter, also mit elektrischen und magnetischen Feldern beeinflussen:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-97332005000300004

"By varying the excitation of the matched Wien filter, one can change the longitudinal distance between the interfering wave packets thus *altering fringe visibility* (Fig. 7 b). The maximum attainable contrast is the one corresponding to no resultant wave packet shift."

3. Das Interferenzmuster lässt sich bei Experimenten zum Aharonov-Bohm-Effekt mit Magnetfeldern verschieben:

<http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/268>

"Ein Elektronenstrahl wird mit Hilfe eines elektrostatischen Biprismas, einem dünnen elektrisch geladenen Draht zwischen zwei geerdeten Platten, so abgelenkt, als käme er aus zwei räumlich getrennten Quellen (Abb.). Die Strahlen umlaufen ein seitlich begrenztes magnetisches Feld, das z.B. durch einen dünnen ferromagnetischen Metallsplitter, 'Whisker' genannt, realisiert werden kann, und werden anschließend auf einem Schirm zur Interferenz gebracht. Bei Änderung des eingeschlossenen Magnetflusses Φ *verschieben sich die Interferenzstreifen*."

G. Möllenstedt, W. Bayh: Kontinuierliche Phasenschiebung von Elektronenwellen im kraftfeldfreien Raum durch das magnetische Vektorpotential eines Solenoids; Physikalische Blätter 18, 7 (1962), 299-305

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/phbl.19620180702/pdf>

"Die *Streifenwanderung* bei kontinuierlicher Änderung des Stromes [mit dem das B-Feld erzeugt wird] ist im üblichen lichtoptischen Einblickrohr auf dem Leuchtschirm gut zu erkennen. Die *Zahl der durchwandernden Streifen* wird mittels einer feinen Strichmarke im Okular bestimmt. Durch die Mikro-Spule konnten Ströme bis zu 1 mA geschickt werden, so daß etwa acht Interferenzstreifen durchwanderten."

Bild eines verschobenen Interferenzmusters:

http://www.quantum.physik.uni-mainz.de/lectures/2005/ss05_quantenphysik/AharonovBohm.pdf

Eine Erklärung, wie solche Effekte mit "Neutrinos" möglich sein sollen, wurde von DG nicht gegeben.

Gegen die Befunde bei Experimenten zum Aharonov-Bohm-Effekt wurde eingewendet:

"Auch hier ist nur der Einfluß auf eine Welle (Wellefunktion) beschrieben [...], also benutzt die Felder, nicht das Elektron." (DG in dsp, 21.06.2009)

Damit wurde die folgende Formulierung in <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/physik/268> angesprochen:

"Aharonov-Bohm-Effekt, von Aharonov und Bohm 1959 theoretisch diskutierter und von Möllenstedt 1961 experimentell nachgewiesener Effekt, der den Einfluß eines Magnetfeldes auf die Phase der Wellenfunktion Ψ eines geladenen Teilchens demonstriert."

Natürlich wird hier "das Elektron benutzt": In der Quantentheorie wird das Elektron mit einer komplexen

Wellenfunktion $\Psi(\vec{r}, t)$ beschrieben, die Lösung der Schrödinger-Gleichung ist. Das hat absolut nichts mit elektromagnetischen Wellen zu tun, die Lösung der klassischen Wellengleichung sind.

Der genannte Effekt bestätigt auch und gerade, dass Elektronen eben keine klassischen Teilchen sind, denn mit solchen lässt sich der Effekt nicht herstellen. Es ist ein rein quantenmechanisches Phänomen und widerlegt damit auch den Versuch einer klassischen Deutung von den Vorgängen am Doppelspalt, wie er in der DGT vorgenommen wird.

3.5 Nachweis von Elektronen

In diesem Zusammenhang wurde von DG auch abgestritten, dass mit den verwendeten Detektoren Elektronen nachgewiesen wurden:

“Nur registriert man dort auch nur mittels Fluoreszenz, also em-Wellen keine Elektronen” (DG in dsp, 21.06.2009)

“Der [Leuchtschirm] besteht aus Phosphore, die auf em- Schwingungen reagieren” (DG in dsp, 22.06.2009)

...bzw. im vorliegenden Fall auf den Beschuss mit Elektronen. Der Energieverlust von Elektronen in Materie ist gut erforscht. Die in Materie eintretenden Elektronen verlieren Energie über Coulomb-Wechselwirkung mit Atomhülle oder Kern der Absorberatome. Eine charakteristische Größe ist dabei die kritische Energie

$$E_c = \frac{600 \text{ MeV}}{Z}$$

(Z: Ladungszahl der bremsenden Atome)

Je nach Elektronenenergie E sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- (1) $E < E_c$: es überwiegt der Energieverlust durch Anregung und Ionisation der gebundenen Absorberelektronen;
- (2) $E > E_c$: es überwiegt der Energieverlust durch _Strahlung_.

Bei Phosphor ist $Z = 15$ und damit $E_c = 40 \text{ MeV}$. Die in den betrachteten Experimenten auftretenden Energien sind in der Größenordnung von $E = 50 \text{ keV}$, also ist $E \ll E_c$, und es liegt Fall (1) vor.

Bei der Anregung und Ionisation der Absorberatome werden Photonen emittiert, die dann weiter verarbeitet werden. In der Tonomura-Arbeit wird dazu angegeben:

"When a 50-kV electron hits the fluorescent film, approximately 500 photons are produced from the spot."

Es kann also keine Rede davon sein, dass “keine Elektronen registriert” werden.
