

# Eine Hypothese zur Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in elektrischen und magnetischen Feldern und die Planung eines Experiments zu deren Verifikation.

Wolfenbüttel, 25. Okt. 2007

von Claus W. Turtur

## Zusammenfassung:

Bekanntlich kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts beim Durchgang durch Materie anders sein kann als im Vakuum. Aber sogar die bloße Anwesenheit elektrischer oder magnetischer Felder im Vakuum kann genügen, um die Lichtgeschwindigkeit zu beeinflussen. Dies ist Inhalt der hier vorgestellten Hypothese. Die Grundlagen dafür sind in der Quantenelektrodynamik zu suchen.

Um die Hypothese zu überprüfen, eignet sich zum Beispiel ein Interferenzexperiment mit einem Interferometer. Dessen konkrete Planung wird zum Abschluß des Artikels aufgezeigt.

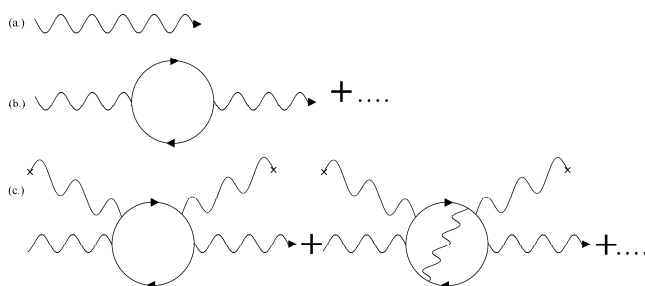
## Gliederung:

1. Theoretische Grundlagen
2. Bisherige experimentelle Untersuchungen
3. Die Hypothese der Lichtgeschwindigkeit in elektrischen und magnetischen Feldern
4. Möglichkeit eines neuartigen Experiments

## Inhalt:

### 1. Theoretische Grundlagen

Schon seit geraumer Zeit werden dem Vakuum doppelbrechende Eigenschaften zugesprochen. Basierend auf einer Arbeit von [Eul 35] spricht [Rik 00] von Doppelbrechung als einer optischen Eigenschaft des Vakuums im Zusammenhang mit verschiedenen Effekten, so z.B. dem Cotton-Mouton-Effekt (in magnetischen Feldern), dem Kerr-Effekt (in elektrischen Feldern) und auch von der magnetoelektrischen Jones-Doppelbrechung. Seine theoretischen Berechnungen führen zu Werten von  $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  (die Richtungen „ $\parallel$ “ und „ $\perp$ “ werden durch die angelegten Felder definiert), die er angibt mit  $\Delta n_{Kerr} \approx -4.2 \cdot 10^{-41} \cdot E^2$ ,  $\Delta n_{Cotton-Mouton} \approx 3.9 \cdot 10^{-24} \cdot B^2$  und  $\Delta n_{Jones} \approx 2.67 \cdot 10^{-32} \cdot E \cdot B$ , worin  $B$  als Magnetfeld in Tesla und  $E$  als elektrisches Feld in  $V/m$  einzusetzen ist. Seine Ergebnisse werden auch von anderen Arbeiten, wie z.B. [Bia 70] bestätigt. Der theoretische Hintergrund besteht in quantenelektrodynamischen (QED) Korrekturtermen zur Lagrange-Funktion in konstanten elektrischen und magnetischen Feldern aufgrund der Vakuumpolarisation, d.h. im Einfluß der Felder auf die Bewegungen der Elektronen und Positronen des Vakuums, von denen in in Abb.1 einige wichtige zu sehen sind.



**Abb.1:**

(a.) Klassische Ausbreitung des Photons im Vakuum ohne elektr. oder magnetische Felder.  
 (b.) Beispiel für QED Korrekturen ohne elektr. und magn. Felder (virtuelle  $e^+e^-$ -Paarbildung).  
 (c.) Beispiele für zusätzliche QED Korrekturen mit elektrischen und magnetischen Gleichfeldern (virtuelle Paarbildung und Strahlungskorrektur).

Desweiteren gibt [Boe 02] eine theoretische Vorhersage zur Lichtgeschwindigkeit in magnetischen Feldern an, und zwar  $1 - \frac{v}{c} = a \cdot 6.627 \cdot 10^{-25} \cdot B^2 \cdot \sin(\theta)$ , worin  $\theta$  der Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung des Lichts und dem magnetischen Feld ist, sowie die Konstante  $a$  angibt,

welcher Polarisationsmodus des Lichts beschrieben wird, mit  $a=8$  für den  $\parallel$ -mode und  $a=14$  für den  $\perp$ -mode. Wie wir in Abschnitt 3 diskutieren werden, besteht zwischen diesem Ergebnis und dem obengenannten  $\Delta n_{\text{Cotton-Mouton}}$  keinerlei Widerspruch. Im Bezug auf theoretische Vorhersagen zur Verringerung der Lichtgeschwindigkeit in elektrischen Feldern, konnte keine Angabe in der Literatur gefunden werden.

## **2. Bisherige experimentelle Untersuchungen**

Ein experimenteller Nachweis dieser theoretischen Vorhersagen kann derzeit noch nicht als erbracht gelten. [Rik 03] bezeichnet die elektro- und magnetooptischen Effekte des Vakuums als „far from being experimentally demonstrated“. Dieser Zustand hat sich bis heute nicht verändert. So gibt [Riz 07] bei einem Vortrag anlässlich einer Tagung einen Überblick über die bisherige experimentelle Situation. Danach existieren zum Nachweis der Polarisationsdrehung einige aufgrund der meßtechnischen Auflösung gescheiterte Versuche, sowie ein einziges Experiment von [Zav 06], welches den Anspruch auf das Ergebnis erhob, eine magnetooptische Polarisationsdrehung nachgewiesen zu haben in Höhe von  $(3.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-12} \text{ rad/meter}$  (als Drehwinkel pro durchlaufener Magnetfeldstrecke) bei einem Magnetfeld von  $5.5 \text{ T}$  und einer Lichtwellenlänge von  $1064 \text{ nm}$ . In Anbetracht der dort beschriebenen Experimentieranordnung würde sich eine Doppelbrechung mit  $\Delta n < 0$  ergeben. Allerdings widerspricht das Ergebnis des [Zav 06]-Experiments klar der theoretischen Vorhersage, und es zeigt unverstandene Artefakte [Lam 07] die das Ergebnis in Frage stellen. Im übrigen hat die selbe PVLAS-Collaboration in einem neueren Experiment [Zav 07] ihre Aussage aus [ZAV 06] widerrufen und die Messung selbst als Messung eines Artefakts bezeichnet.

Zur elektrooptischen Polarisationsdrehung sind uns keine experimentellen Ergebnisse bekannt, es wird lediglich von einem in Planung befindlichen Experiment zur Licht-Licht-Wechselwirkung berichtet [Sch 07]. Zur Verringerung der Lichtgeschwindigkeit aufgrund elektrischer oder magnetischer Felder im Vakuum konnten wir bisher überhaupt keine experimentellen Ergebnisse in der Literatur finden.

## **3. Die Hypothese der Lichtgeschwindigkeit in elektrischen und magnetischen Feldern**

Sinn des vorliegenden Artikels ist es, ein neuartiges Experiment vorzuschlagen, von dem ein signifikantes Messergebnis zu erwarten sein sollte. Bis jetzt wurde versucht, die Doppelbrechung nachzuweisen, aber vielleicht steigt die Hoffnung auf einen erfolgreichen Nachweis, wenn man versucht, die Verringerung der Lichtgeschwindigkeit in elektrischen oder magnetischen Feldern nachzuweisen, weil es schon einige Detektoren mit extrem hoher Auflösung gibt, mit denen man der Lichtgeschwindigkeit bestimmen könnte: Das sind Gravitationswellen-Detektoren. Das würde bedeuten, dass man versuchen könnte, die „normale“ räumlich isotrope Brechung anstelle der bisher nicht nachweisbaren Doppelbrechung zu messen.

Es ist klar, dass jedes doppelbrechende Medium auch die „einfache“ räumlich isotrope Brechung verursachen muß, denn im Falle der Doppelbrechung ist  $n_{\parallel} - n_{\perp} = 0 \Rightarrow n_{\parallel} \neq n_{\perp}$  und somit kann nicht  $n_{\parallel} = n_{\perp} = 1$  sein. Das heißt, dass zumindest einer der beiden Indizes  $n_{\parallel}, n_{\perp}$  von 1 verschieden sein muss, was uns bereits als Kriterium für die Brechung genügt, soweit wir sie für die hier darzustellende Planung eines Experiments benötigen.

Da für diese elementare Überlegung nicht auf irgendwelche Eigenschaften doppelbrechender Medien zurückgegriffen wurde, muss sie auch für das Vakuum gelten. Das ist auch plausibel, da es sowohl in der Materie als auch im Vakuum schwingende Ladungen sind, die für die doppelbrechende Eigenschaft der Medien und damit auch für die Brechung verantwortlich sind.

Typischerweise (in vielen Fällen) fällt die Differenz der Brechungsindizes  $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  geringer aus, als deren absoluter Abstand zu 1 (siehe z.B. [Hec 05]), dem wir die elementare

Lichtbrechung zuschreiben. Damit wäre  $|\Delta n| = |n_{\parallel} - n_{\perp}| < n - 1$ , was auch plausibel wird, wenn man bedenkt, dass die Brechung auf das Schwingen einzelner Ladungen zurückgeführt wird, und die Doppelbrechung nur auf den räumlich anisotropen Anteil dieser Schwingungen.

In unserem Fall können wir die magnetisch bedingte Verringerung der Lichtgeschwindigkeit in Höhe von  $1 - \frac{v}{c} = a \cdot 6.627 \cdot 10^{-25} \cdot B^2 \cdot \sin(\theta)$  mit  $\Delta n_{\text{Cotton-Mouton}} \approx 3.9 \cdot 10^{-24} \cdot B^2$  vergleichen und finden für  $\theta = 90^\circ$ , dass  $a = 8$  zu einem  $\frac{c}{v} - 1 = 5.3 \cdot 10^{-24}$  führt, sowie  $a = 14$  zu einem  $\frac{c}{v} - 1 = 9.28 \cdot 10^{-24}$ . Daraus können wir für unpolarisiertes Licht bestimmen, dass  $\frac{c}{v} - 1 = 7.29 \cdot 10^{-24}$  ist, was tatsächlich ein wenig größer ist als  $\Delta n_{\text{Cotton-Mouton}}$ . Die Differenz ist nicht so groß, dass man deswegen das Brechungs-Experiment für leichter durchführbar im Vergleich zum Doppelbrechungsexperiment ansehen würde, aber es zeigt, dass ein Interferometer, welches keine Polarisation messen kann, durchaus zum Nachweis des Einflusses elektrischer und magnetischer Felder auf die Ausbreitung von Licht geeignet sein sollte.

Deshalb ist die Konsequenz die: Wenn sich ein Interferometer finden lässt, dessen Auflösung bzgl.  $(n - 1)$  besser ist als die  $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  Auflösung der verwendeten Polarimeter, kann das einen Fortschritt für die experimentelle Situation bedeuten.

Wie oben erwähnt, existieren bereits einige Interferometer mit extrem hoher Auflösung, nämlich Gravitationswellen-Detektoren. Aber diese Einrichtungen haben ziemlich lange Meßarme, die auch für eine derartige Auflösung nötig sind (mit einigen hundert Metern oder gar einigen Kilometern Länge). Aus diesem Grund scheint es weitgehend hoffnungslos, starke Magnetfelder anlegen zu wollen; viel leichter zu erzeugen wären starke elektrische Felder mit entsprechend großen Ausdehnungen und elektrostatischen Feldstärken sogar bis zu Durchschlagsfeldstärke des Vakuums, weil man dafür „nur“ Kondensatorplatten aufladen muss. In so einem Fall könnte man die folgende Abschätzung durchführen:

Die Durchschlagsfeldstärke des Vakuums als Obergrenze für die elektrische Feldstärke beträgt  $E = 500 \frac{V}{\mu m}$  und führt zu  $(n_{E\text{Feld}} - 1) > \left| -4.2 \cdot 10^{-41} \cdot E^2 \right| \approx 1.05 \cdot 10^{-23}$

Das Zeichen „>“ symbolisiert die Erwartung, dass  $(n_{\text{Feld}} - 1)$  ein wenig größer als die aus der Kenntnis der  $|\Delta n|$  abgeschätzten Werte sein sollte, ohne zu wissen, ob der abgeschätzte Wert um einen Faktor 1,2,3 oder 4 größer sein sollte (aber das ist auch nicht kritisch für die Planung des hier vorgeschlagenen Experiments).

#### **4. Möglichkeit eines neuartigen Experiments**

Wir wollen über die Realisierbarkeit eines Interferometer-Experiments zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in elektrischen Feldern im Vakuum nachdenken:

- Sehr hochauflösende Interferometer, die überdies bereits unter Vakuum arbeiten, stehen mit Gravitationswellen-Detektoren zur Verfügung. So erreicht z.B. der GEO600-Detektor eine Auflösung von  $\Delta L/L = 10^{-20}$  auf der Basis eines Michelson-Interferometers [Lig 03]. Würde man in ihn einen optischen Resonator einbringen, wie er beim [Zav 06]-Experiment vorhanden war, mit ca.  $k = 42000$  Durchläufen des Strahls durch die vorhandene optische Weglänge, so könnte man eine Auflösungsgrenze erreichen bei  $(n - 1) = \frac{\Delta L/L}{k} = \frac{10^{-20}}{42000} \approx 2.4 \cdot 10^{-25}$ , womit sowohl der Einfluß elektrischer Felder als auch der Einfluß magnetischer Felder auf die Lichtgeschwindigkeit nicht nur quantitativ messbar werden sollte, sondern sogar mit einer ernstzunehmenden Genauigkeit aufzulösen sein.
- Vielleicht würde sogar ein etwas einfacheres Interferometer mit einer leichteren Verfügbarkeit (als ein Gravitationswellen-Detektor) genügen. In einem solchen Fall könnte es hilfreich sein, die Anzahl der Durchläufe des Lichts im optischen Resonator zu maximieren, und damit den Einfluß des Feldes zu maximieren, der proportional zur durchlaufenen Strecke ist.

### Ziele des Experiments

1. Der prinzipielle Nachweis der Hypothese, dass mit elektrischen und magnetischen Feldern die Lichtgeschwindigkeit beeinflusst werden kann, d.h. dass das Vakuum nicht nur doppelbrechend sondern überhaupt eine brechende Wirkung hat, nicht nur in magnetischen, sondern auch in elektrischen Feldern.
2. Eine quantitative Aussage über das Ausmaß der brechenden Wirkung elektrischer und magnetischer Felder im Vakuum.
3. In der Sprache der Elementarteilchenphysik würde man ein positives Ergebnis auch als einen Schritt zur optischen Detektion des Axions verstehen.

### Literaturhinweise

- [Bia 70] Nonlinear Effects in Quantum Electrodynamics. Photon Propagation and Photon Splitting in an external Field. von Z.Bialynicka-Birula und I.Bialynicki-Birula, 1970, Phys. Rev. D, Vol.2, No.10, Seite 2341
- [Boe 02] Exploring the QED vacuum with laser interferometers  
Daniël Boer und Jan-Willem van Holten, arXiv:hep-ph/0204207v1 (2002)
- [Eul 35] Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie  
H. Euler und B. Kockel, Naturwissenschaften 23 (1935) 246;
- [Hec 05] Optik, Eugene Hecht, 2005, Oldenbourg-Verlag, ISBN3-486-27359-0
- [Lam 07] The first axion ?  
Steve Lamoreaux, Nature, Vol.441, Seiten 31-32 (2006)
- [Lig 03] Detector Description and Performance for the First Coincidence Observations between LIGO and GEO  
The LIGO Scientific Collaboration, 2003, arXiv:gr-qc/0308043 v3 (2003)
- [Rik 00] Magnetolectric birefringences of the quantum vacuum  
G. L. J. A. Rikken und C. Rizzo, 2000, Phys. Rev. A, Vol.63, 012107 (2000)
- [Rik 03] Magnetolectric anisotropy of the quantum vacuum  
G. L. J. A. Rikken und C. Rizzo, 2003, Phys. Rev. A, Vol.67, 015801 (2003)
- [Riz 07] The BMV project: Biréfringence Magnétique du Vide  
Presentation at March-15-2007 by Carlo Rizzo at the meeting „Rencontres de Moriond“  
zu finden unter: <http://moriond.in2p3.fr/J07/sched07.html>
- [Sch 07] Stephan Schiller, Universität Düsseldorf, private communication in 2007
- [Zav 06] Experimental Observation of Optical Rotation Generated in Vacuum by a Magnetic Field  
E.Zavattini, et. al., Phys. Rev. Lett 96, 110406 (2006)
- [Zav 07] New PVLAS results and limits on magnetically induced optical rotation and ellipticity in vacuum,  
E.Zavattini, et. al., arXiv:0706.3419v2 (Sept.-26-2007)

### Adresse des Autors:

Prof. Dr. Claus W. Turtur  
Fachhochschule Braunschweig-Wolfenbüttel  
Salzdahlumer Straße 46 / 48  
Germany - 38302 Wolfenbüttel  
Email: [c-w.turtur@fh-wolfenbuettel.de](mailto:c-w.turtur@fh-wolfenbuettel.de)  
Tel.: (++49) 5331 / 939 – 3412