

E 2688 FX

laser + elektro- optik 3



DM 12,50
Stuttgart
September 1981
13. Jahrgang



Erste deutschsprachige
Fachzeitschrift für Laser, Elektro-Optik
und Strahlentechnik

Industrielle Anwendungen · Materialbearbeitung
Chemie · Nachrichten- und
Messtechnik · Medizin · Umweltforschung

Robert Schwankner*

Versuch's und beweis es: Nr. 7

Try and prove it: No. 7

Experimentelle Grundlagen zum Faraday- und Kerreffekt

Experimental basis of electro- and magneto optic rotation

'Faraday's and J. Kerr's success "in magnetizing and electrifying a ray of light" are discussed in terms of wave optics. Some experiments as well as necessary equipment for large audience demonstrations concerning this field are described.'

«Es ist eben eine Eigentümlichkeit des menschlichen Geistes, gewohnte Vorstellungen nur äusserst ungern aufzugeben, besonders dann, wenn dabei ein Opfer an Anschaulichkeit gebracht werden muss.» [1]

Dieses Zitat stammt aus der Feder von Max Born und ist seinem berühmten Werk «Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie» entnommen. Es fällt im Zusammenhang mit der Problematik eines Lichtäthers, jenes Mediums also, in dem sich die elektromagnetische Strahlung fortpflanzen sollte.

Das Wasser- oder Schallwellenmodell bot ein anschauliches in der klassischen Mechanik verhaftetes Bild der elektromagnetischen Strahlung, das nur äusserst ungern aufgegeben wurde.

Das Michelson-Morley-Experiment beseitigte 1887 jedoch radikal den Glauben an ein materielles Fluidum als Träger der Wellenausbreitung im Weltenraum, da keine Anisotropie der Lichtgeschwindigkeit bezüglich der Erdbahn festgestellt wurde. Die Lichtgeschwindigkeit war also richtungsunabhängig; gleich, ob sich die Erde mit oder gegen den hypothetischen Äther bewegte.

Michael Faraday, der grosse Intuitionist unter den Naturforschern seiner Zeit, hatte Hunderte von Experimenten gemacht, um einen Zusammenhang zwischen Licht und Magnetismus aufzuspüren, stets geleitet von der Idee der Einheitlichkeit aller Naturvorgänge. 1846 wird er fündig [2, 3] und schreibt voll Stolz in sein Labortagebuch: *'...I have at last succeeded in magnetizing and electrifying a ray of light, and in illuminating a magnetic line of force.'*

Faraday hatte herausgefunden, dass Flintglas, das von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt wird, einen feldlinienparallelen, linear polarisierten Lichtstrahl dergestalt beeinflussen kann, dass dessen Polebene gedreht wird. Ursache dafür ist nach heutiger Anschauung die unterschiedliche Phasengeschwindigkeit für rechts und links zirkular polarisiertes Licht in Materie bei Anwesenheit eines statischen Magnetfeldes; man spricht von zirkularer Doppelbrechung. Schickt man einen linear polarisierten Lichtstrahl in ein derartig **temporär aktiviertes** transparentes Medium, so wird die Polebene gedreht, was gleichbedeutend mit der Tatsache einer unterschiedlichen Durchtrittsgeschwindigkeit für die zugeordnete links und rechts zirkular polarisierte Schwingung ist; man spricht auch von Zirkulardichroismus. (Linear polarisiertes Licht kann man sich aus zwei amplitudengleichen, gegensinnig zirkular polarisierten Schwingungen zusammengesetzt denken, die das Medium mit unterschiedlicher Geschwindigkeit

durchheilen. Beim Medienaustritt vereinigen sich diese wieder zu einer linear polarisierten Schwingung mit neuer Polarisationsebene.)

In der klassischen Elektronentheorie formuliert man für diamagnetische Medien den Effekt wie folgt: Wird ein Elektron in ein Magnetfeld gebracht, dessen Richtung nicht mit seinem magnetischen Moment übereinstimmt, so wird darauf ein mechanisches Drehmoment ausgeübt, welches das Elektron zu einem Kreisel mit Präzessionsbewegung macht. Nach der elektromagnetischen Lichttheorie erregt das die Probe durchsetzende Licht ein derartiges magnetisches Wechselfeld. Es wird klar, dass die sich im Präzessionssinn drehende Feldkomponente anders mit den Elektronen wechselwirkt als die gegensinnige.

Bestimmung des Drehwertes von Flüssigkeiten

Schickt man linear polarisiertes Licht eines He-Neon-Lasers (0,5 mW) parallel zum Feldvektor eines transparente Körper durchsetzenden Magnetfeldes, so wird seine Polebene gedreht.

Dabei bedient man sich am besten einer Anordnung wie sie Abb. 1 zeigt. Das Magnetfeld wird von einem starken Elektromagneten erzeugt, dessen 500-Windungsspulen Ströme bis 10 Ampere in Serie geschaltet kurzzeitig vertragen können. Die beiden zugespitzten Polschuhe sind durchbohrt und können so direkt durchstrahlt werden. Der Luftspalt zwischen den Polspitzen ist möglichst klein zu wählen

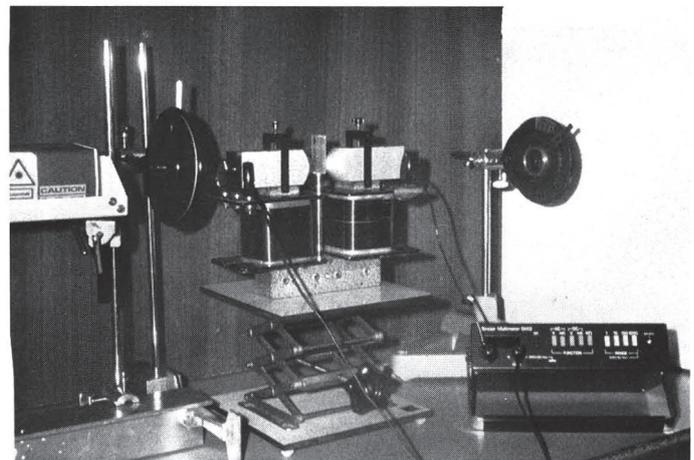


Bild 1 Anordnung zur Untersuchung des Faradayeffektes an Flüssigkeitsproben; von links nach rechts: He-Ne-Laser; Polarisator; Elektromagnet mit durchbohrten Polschuhen und 1-cm-Photometerküvette; Digitalamperemeter; Analysator; Beobachtungsschirm.

* Wissenschaftliches Studienteam, Scheibenstr. 18, 8220 Traunstein

Substanz	$\varphi[0^\circ]$	Verdetkonstante
H ₂ O	0,8	+0,0164 ($\lambda = 589 \text{ nm}$)
C ₆ H ₆	2,2	+0,0379 ($\lambda = 589 \text{ nm}$)
CS ₂	2,8	+0,0527 ($\lambda = 589 \text{ nm}$)
K ₄ [Fe(CN) ₆]	+0,5	+0,02 ($\lambda = 600 \text{ nm}$)
K ₃ [Fe(CN) ₆]	-1,4	-0,03 ($\lambda = 600 \text{ nm}$)
Fe SO ₄	0,8	- (?)
Fe Cl ₃	-1,2	- (?)
CH Cl ₃	0,8	+0,0210 ($\lambda = 578 \text{ nm}$)
C Cl ₄	1,1	+0,0211 ($\lambda = 578 \text{ nm}$)

Tabelle 1 Magnetisch induzierte Drehwerte

Linke Spalte: experimentell erhaltene Werte (Küvettenlänge: 4 cm; $I = 4,5 \text{ A}$; Spule: $2 \times 500 \text{ Wdg} = 632,8 \text{ nm}$) eingesetzt wurden Reinsubstanzen bzw. gesättigte wässrige Lösungen. Rechte Spalte: Verdetkonstante nach [4] für 1 m Lichtweg und $|\vec{H}| = 1 \text{ Am}^{-1}$.

und die Polschuhe unverrückbar zu fixieren, damit sie nicht die Probe oder gegebenenfalls die Küvette zerquetschen.

Die Spulen erzeugen bei Gleichstromdurchgang ein magnetisches Feld \vec{H} , dessen Betrag $|\vec{H}|$ gegeben ist durch:

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{l} \quad \begin{array}{l} n = \text{Windungszahl} \\ I = \text{Stromstärke [A]} \\ l = \text{Länge der Spule [m]} \end{array}$$

Der Betrag des Magnetfeldes ist dem fließenden Strom direkt proportional. Als Untersuchungsproben seien zunächst Flüssigkeiten in einer 1 cm (Photometerküvette) verwendet, um zu zeigen, dass der Faradayeffekt auch unabhängig von der molekularen Nahordnung, wie sie etwa im Festkörper gegeben ist, existiert. Tabelle 1 zeigt einige Drehwerte, die mit einer 4-cm-Küvette und verschiedenen Flüssigkeiten und Lösungen erhalten wurden [4, 5].

Einen besonders hohen Drehwert zeigt Schwefelkohlenstoff (CS₂), welcher aber wegen seiner hohen Feuergefährlichkeit und seines Geruches nur in einer verschlossenen (Glas-)Küvette gehandhabt werden darf!

Stellen wir die CS₂-Küvette in den Strahlengang und regeln den Analysator bei mässig abgedunkeltem Zimmer so, dass gerade Auslöschung auftritt, so zeigt sich, dass bei kurzzeitigem Einschalten (wegen der Erwärmung der Spulen!) und einem Strom von einigen Ampere sich hinter dem Analysator wieder ein heller Lichtpunkt zeigt; die Polarisationssebene hat sich gedreht.

Mit etwas Geduld lässt sich bestätigen, dass der Winkel, der zur Kompensation des beschriebenen Effekts nötig ist, um wieder Dunkelheit hinter dem Analysator zu erhalten in seinem Betrag proportional dem Betrag des statischen Magnetfeldes und damit dem fließenden Strom ist.

$$|\alpha| \sim |\vec{H}|$$

Keht man die Stromrichtung und damit den Vektor des Magnetfeldes um, so wechselt auch das Vorzeichen des Kompensationswinkels. Verwenden wir zudem im Bereich 1 bis 4 cm – bei noch grösseren Luft-

spalten ist die Homogenität des H-Feldes in Frage gestellt – verschieden lange mit CS₂ gefüllte Küvetten, so zeigt sich, dass proportional mit dem Weg des Lichtstrahls im Medium der Drehwinkel ansteigt.

$$|\alpha| \sim d$$

Es gilt somit in Zusammenfassung der gewonnenen Abhängigkeiten:

$$|\alpha| \sim d \cdot |\vec{H}|$$

Als Proportionalitätsfaktor führt man mit Becquerel die sogenannte Verdet'sche Konstante (ω) ein und erhält für die magneto-optische Drehung infolge des Faradayeffektes:

$$\alpha = \omega \cdot d \cdot |\vec{H}|$$

In der Technik setzt man spezielle Gläser zur Faradaymodulation in der Nachrichtenübertragung ein, z.B. bei der Übertragung per Lichtleiter.

Michael Faraday schrieb einst:

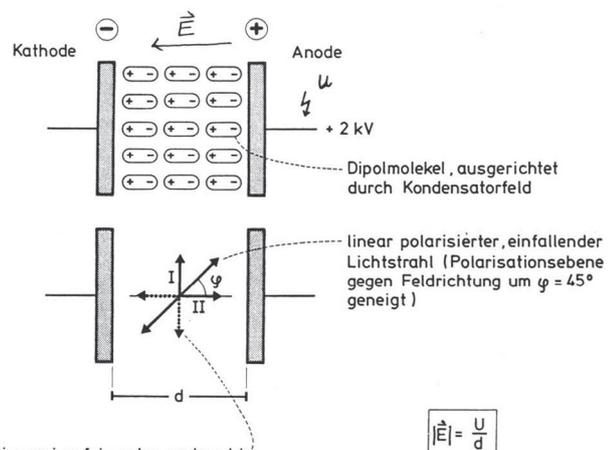
«Der Naturforscher darf sich nicht auf Phänomene einseitig festlegen, er darf keine bevorzugte Hypothese haben, in den Doktrinen keiner Schule und keinem Meister folgen. Ihn darf keine Achtung vor Personen leiten, nur vor Tatsachen.

Wahrheit sollte vornehmstes Ziel sein. Fügt er zu diesen Qualitäten Fleiss, dann darf er auch hoffen, die Schleier der Natur zu durchdringen.»

Faraday hatte nach seinem Erfolg in der Magneto-optik vergeblich nach einem Analogon zwischen elektrischem Feld und Licht gesucht. Diesen fand 1875 erstmals J. Kerr, der diese Erscheinung ausgiebig untersuchte und damit Wilhelm Conrad Röntgen nur um wenige Tage zuvorkam:

«Nun war alle Mühe umsonst gewesen. Es geht immer darum, wer zuerst ankommt – auch im wissenschaftlichen Forschen. Aber ein guter Verlierer ist fast soviel wie der Sieger.

Röntgen griff jedoch in der Stille die Sache erneut auf, er prüfte, suchte Fehler. Hätte Kerr ihn beobachten können, es wäre ihm vielleicht angst geworden. Röntgen liess kein Wort von Kerrs Arbeit und keine Angabe ungeprüft. Aber – Kerr hatte recht. Die Wirkung, die Röntgen



Zerlegung in zwei aufeinander senkrecht stehende Komponenten (lineare Doppelbrechung)
Komponente I steht senkrecht zur Feldrichtung
Komponente II steht parallel bzw. antiparallel zur Feldrichtung

Bild 2 Anordnung der Dipolmoleküle in einer Kerr-Zelle bei angelegtem Feld.

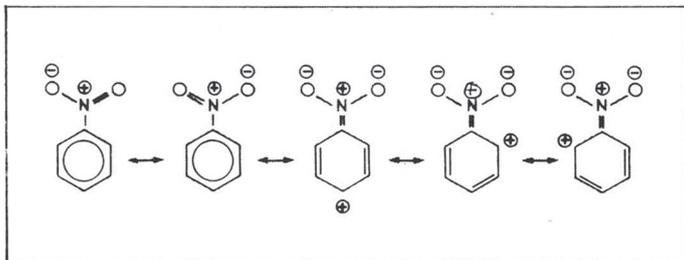


Bild 3 Beschreibung des Nitrobenzols mit fiktiven Mesomeriegrenzformeln.

zwar bereits vor Kerr gesucht hatte, hatte dieser wirklich gefunden. Röntgen berichtete über seine Versuche, gab Kerr alle Ehre und unterdrückte jede Verstimmung darüber, dass ein anderer ihm zuvorgekommen war.»[7]

Bringt man in ein Kondensatorfeld ein transparentes Dielektrikum ein und lässt linear polarisiertes Licht hindurchtreten, so kann bei angelegter Spannung hinter dem Analysator keine Auslöschung mehr beobachtet werden, es resultiert elliptisch polarisiertes Licht. Wiederrum handelt es sich um ein Phänomen der Doppelbrechung. Das Dielektrikum wird unter Feldeinfluss temporär anisotrop. Richtet man es so ein, dass der Vektor des einfallenden Lichtes unter 45 Grad gegen den E-Feldvektor geneigt ist, so kann man eine vektorielle Zerlegung in zwei aufeinander senkrecht stehende Vektoren durchführen: der eine parallel zum E-Vektor, der andere dazu senkrecht. I und II durchdringen das Dielektrikum (siehe Bild 2) bei anliegender Spannung, also ausgerichteten Dipolen mit unterschiedlicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit, da die Wechselwirkung von I und II mit den Dipolen unterschiedlich ist. Die Vertikalkomponente I tritt in unserem Beispiel (Nitrobenzol verfügt bereits über ein permanentes Dipolmoment) (Bild 3) mit den Molekülen wesentlich weniger in Wechselwirkung als die horizontale. Die Folge ist eine Phasenverschiebung der beiden Austrittsschwingungen, was zu elliptisch polarisiertem Licht führt. Ist das k -fache der Lichtwellenlänge der Gangunterschied von I und II beim Medienaustritt, so gilt:

$$k = K \cdot l \cdot |\vec{E}|^2$$

K = Kerr-Konstante
 l = Länge des durchstrahlten Mediums
 \vec{E} = elektrische Feldstärke

Der Kerr-Effekt liefert so Informationen über den innermolekularen Aufbau von Molekülen und kommt deshalb auch in der chemischen Strukturanalyse zur Anwendung [8].

Die detaillierten empirischen Untersuchungen zeigen drei grosse Gruppen:

- a: Unpolare Strukturen (z.B. Benzol), die sich mit der Achse der grössten Polarisierbarkeit parallel zum elektrischen Feld einstellen.
- b: Polare Moleküle, in welchen die Richtung des elektrischen Momentes (= Summe aus permanentem und induziertem Moment) in Richtung der Hauptachse der Polarisierbarkeit liegt (z.B. Methylenechlorid).
- c: Wie b, jedoch steht hier das elektrische Moment senkrecht auf der Hauptachse der Polarisierbarkeit (z.B. Chloroform).

Demonstration des Kerr-Effekts am Beispiel des Nitrobenzols [5]

Es ist nötig, das Nitrobenzol zunächst zu reinigen, was am besten dadurch geschieht, dass man das in die Kerr-Zelle eingefüllte Material

etwa eine Stunde lang bei einer Spannung von 500 V hält. Die Polung ist bei allen Folgeexperimenten immer gleich zu wählen, um die niedergeschlagenen Verunreinigungen nicht wieder zu lösen.

Legt man jetzt eine Spannung von etwa 2 kV (Plattenabstand 2 mm) an, so ergibt sich eine elektrische Feldstärke $|\vec{E}|$ von:

$$|\vec{E}| = \frac{2000}{2 \cdot 10^{-4}} = 1 \cdot 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Lässt man linear polarisiertes He-Ne-Laserlicht eintreten, so kann mit dem dahinter aufgestellten Analysatorfilter auf dem Schirm (bzw. der Hörsaalwand) bei keiner Einstellung mehr Auslöschung erzeugt werden, wie dies bei nicht angelegtem Feld der Fall ist. Oft glaubt man eine Verzögerung im Abbau dieses Effektes zu beobachten, dies liegt jedoch, von Spezialfällen wie Tieftemperaturmessungen an Polymeren einmal abgesehen, an der noch vorhandenen Ladung der im Netzgerät vor den Ausgang geschalteten Kondensatoren. Schliesst man diese kurz, so verschwindet der Effekt augenblicklich. Im vorelektrooptischen Zeitalter verwendete man die Kerrzelle in Schwingkreisen zum «Choppen» von Licht einer Hg-Dampflampe. Im Deutschen Museum in München kann man solche Anordnungen, wie sie zum Beispiel zur Lichtgeschwindigkeitsmessung verwendet wurden, noch heute bewundern.

Acknowledgement:

The financial assistance in form of a scholarship from the 'Studienstiftung des Deutschen Volkes' without which this series could not have been achieved is greatly appreciated.

Literatur:

- [1] Born, M.: Optik – Ein Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie, Berlin, Springer (1933).
- [2] Faraday, M.: Philosoph. Trans. Roy. Soc., London (1846), 1.
- [3] Faraday, M.: Pogg. Ann. 68 (1846), 105.
- [4] Flügge, J.: Grundlagen der Polarimetrie, Walter de Gruyter (1970).
- [5] Schwankner, R.: Laseranwendungen in der Experimentalchemie – Ein Praktikum, Carl Hanser, München-Wien (1978).
- [6] Kerr, J.: Philos. Mag. (4) 50 (1875) 337, 446; (5) 8 (1879) 85, 229, 13 (1882) 53, 248, 37 (1894) 380, 38 (1894) 144.
- [7] Neher, F. L.: Blick ins Unsichtbare, Reutlingen.
- [8] Aroney, M. J.: Der elektrooptische Kerr-Effekt in der Konformationsanalyse, Angewandte Chemie 89, 725–736 (1977).