

ELEMENTE DER NATURWISSENSCHAFT

Zeitschrift

herausgegeben von der Naturwissenschaftlichen Sektion am Goetheanum, Dornach

Über die Bewegung kleiner Teilchen im Licht (Photophorese)

Mario Howald-Haller

Felix Ehrenhaft (1879–1952) hat entdeckt, dass kleine Teilchen in luftverdünntem Raum unter intensiver Beleuchtung sich eigenartig bewegen. Im Folgenden wird zunächst ein knapper historischer Bericht über die dadurch angeregten Untersuchungen gegeben. Sodann hebe ich aufgrund eigener Beobachtungen in der Physikalischen Abteilung des Forschungslaboratoriums am Goetheanum, Dornach, aus dem Zeitraum 1962 bis 1964 einige Aspekte der Photophorese hervor. Schliesslich wird eine goethenistische Hypothese der Photophorese entworfen.

Geschichtlicher Überblick

Felix Ehrenhaft (1910) hat bei seinen Beobachtungen zur Messung der Ladung kleiner Teilchen beachtet, dass die schwebenden Probekörper sich im intensiven Licht fortbewegen. Die erste Bemerkung hierüber lautet: «Nur eine Art von Störung kann nicht eliminiert werden. Ich hatte den Eindruck, dass eine bestimmte Teilchengrösse, die ruhig in vertikaler Bahn herabfiel, nur dann, wenn sie in die intensivste Spitze des Lichtkegels kam, manchmal ein Stückchen auffallend rasch in horizontaler Richtung fortgetragen wurde und, wenn sie diesen intensiven Teil verlassen hatte, wieder nach abwärts fiel. Ich kann dies nur dem Strahlungsdrucke, beziehungsweise einer Radiometerwirkung, welche sich bei einer bestimmten Grösse bemerkbar machten, zuschreiben und behalte mir die diesbezügliche Untersuchung vor» (l. c. 835/6).

In den Jahren 1909 bis 1913, zur selben Zeit wie *Felix Ehrenhaft*, hat auch *Robert Andrews Millikan* (1868–1953) Beobachtungen zur Messung der Elementarladung angestellt. Die beiden Beobachter gerieten aber in eine Kontroverse (*Felix Ehrenhaft* 1918 a).

Im Jahre 1918 erschien die erste grosse Veröffentlichung von *Felix Ehrenhaft* (1918b) über seine Entdeckung. Einige Hauptzüge dieser Arbeit seien hervorgehoben. Die Grundfrage ist in den folgenden Sätzen enthalten:

«Die beobachtete Erscheinung der *Fortbewegung der Materie im Lichte*, will ich der Kürze halber *Photophorese* nennen.

Wir legen uns nun die Frage vor, wovon die Photophorese abhängt bzw. wel-

cher Natur die Kräfte sind, welche die Photophorese bewirken. Sind die *photophoretischen Kräfte* insbesondere solche *erster* oder *zweiter Art*?» —

Eine Kraftwirkung erster Art läge vor, wenn ein ponderabler Körper im Vakuum durch Strahlung fortbewegt würde (Strahlungsdruck!). Eine Kraftwirkung zweiter Art wird beim Radiometer vorgestellt: sie rühre daher, dass das Temperaturgleichgewicht zwischen den einseitig berussten Blättchen und dem unter geringem Druck stehenden Gas gestört wird.

Da es aussichtslos ist, im absolut leeren Raum zu beobachten, hoffte *Felix Ehrenhaft*, aus feststellbaren Änderungen der Strahlungswirkungen an den Probekörperchen beim fortschreitenden Evakuieren die Art der Kraftwirkung erschliessen zu können. Auf Grund seiner Beobachtungen und Überlegungen kommt *Felix Ehrenhaft* zum Schluss, dass die photophoretischen Bewegungen auf das Wirken von Kräften erster Art zurückzuführen seien. Dass diese Bewegungen nicht einfach durch Strömungen des umgebenden Gases erklärbar sind, zeigt die in dem Teilchenstaub gleichzeitig beobachtbare lichtpositive und lichtnegative Bewegung in engbenachbarten Bereichen. *Lichtpositiv* bedeutet, dass die Bewegung mit dem Lichtstrom, *lichtnegativ*, dass sie gegen den Lichtstrom verläuft. Im Hin-und-her der bewegten Teilchen können auch ruhig schwebende Teilchen beobachtet werden; solche Teilchen verhalten sich *lichtneutral*. — Dass sowohl die lichtpositiven als auch die lichtnegativen photophoretischen Kräfte solche erster Art seien, meinte *Felix Ehrenhaft* aus deren angeblich gesicherter Unabhängigkeit vom Gasdruck ableiten zu können. Spätere Beobachtungen von *J. Mattauch* (1922) haben jedoch ergeben, dass die photophoretischen Bewegungen bei einem mit der Teilchengrösse zusammenhängenden Druck ein Maximum erreichen (dabei ist die Strahlungsintensität konstant).

Während die lichtpositive photophoretische Bewegung (als Wirkung einer Kraft erster Art aufgefasst) mit Hilfe der *Maxwellschen* Lichttheorie als Auswirkung des Strahlungsdruckes verständlich erscheinen kann, bietet die lichtnegative Photophorese dem Verständnis grössere Schwierigkeiten. *Felix Ehrenhaft* hat hierin eine absolut neuartige Erscheinung gesehen. Er schliesst seine Abhandlung mit den folgenden Sätzen:

«Vorliegende Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Kraftwirkungen zwischen Materie und Strahlung viel komplizierterer und mannigfacherer Art sind als jene Druckwirkungen des Lichtes, welche allein bisher vorausgesetzt wurden.

Hier habe ich versucht einen Weg anzubahnen, der zur Erforschung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie dienen könnte» (l. c. 128).

Die Anschauungen von *Felix Ehrenhaft* sind früh auf Skepsis gestossen. Die Gründe hierfür hat *A. Rubinowicz* (1920) kurz ausgesprochen: «Da ein ‚negativer‘ Lichtdruck nicht bekannt ist, würde die *Ehrenhaft'sche* Auffassung, besonders bei der Deutung der negativen Photophorese, das Vorhandensein neuer, bisher unbekannter Naturkräfte postulieren, die die Einheitlichkeit unseres heutigen, recht harmonischen Weltbildes zerstören und daher mit gutem Grunde als äusserst unwillkommene Eindringlinge gelten müssen. So ist also das Streben wohl begrifflich, die *Ehrenhaft'schen* Versuche ohne Annahme neuer Kräfte zu deuten.

Für eine derartige Erklärung wird man vor allem die Lichtdruck- und Radiometerkräfte in Betracht zu ziehen haben» (l. c. 691/2). Seinem Bestreben entsprechend stellt denn auch *A. Rubinowicz* eine Radiometertheorie auf und zeigt, dass für grössere Teilchen «eine *negative Radiometerkraft* zu erwarten ist» (l. c. 716) unter der Voraussetzung, dass die Strahlung das Teilchen im Wesentlichen ungeschwächt durchsetzt. Die Konsequenz ist schliesslich: «... die von *Ehrenhaft* ge-

messenen photophoretischen Kräfte wären nach unserer Auffassung als die Resultierende positiver und negativer Radiometerkräfte zu deuten» (l. c. 735).

Durch die Abhandlung von *A. Rubinowicz* konnte die Sache als erledigt betrachtet werden und man konnte – bis auf weiteres – sich am recht harmonischen Weltbild der Physik ergötzen! Daran änderten beispielsweise auch die treffenden Einwände von *Satyendra Ray* (1921) gegen die Vorstellungen über die Temperaturverteilung in den photophoretisch bewegten Teilchen nicht viel.

Fortan arbeiteten mit *Felix Ehrenhaft* nur noch wenige Physiker am Problem der Photophorese. Diese Wenigen entdeckten aber noch weitere Arten und Feinheiten der photophoretischen Bewegung. Darüber sind verschiedene Veröffentlichungen erschienen, vor allem aus dem I. Physikalischen Institut der Universität Wien, dessen Vorsteher *Felix Ehrenhaft* war. Aus diesen Arbeiten sei hier der zweiteilige, letzte grosse Aufsatz von *Felix Ehrenhaft* (1951/2) hervorgehoben. Dieser zusammenfassende Aufsatz beginnt mit den folgenden Sätzen:

«In diesem Bericht über die neueren Arbeiten des Verfassers und seiner Schule soll von neuen Erscheinungen die Rede sein, die auf einem direkterer Beobachtung zugänglichen Gebiet als dem der heutigen Physik mit ihren vielen Elementarteilchen gefunden wurden. Objekte dieser Untersuchungen, an denen 47 Jahre gearbeitet wurde, sind kleine, freischwebende Materieteilchen, die gerade noch unmittelbar wahrgenommen werden können. Es werden die Gesetzmässigkeiten ihrer Bewegungen studiert, wenn sie von konzentrierten Lichtstrahlen beleuchtet werden, wenn das Schwerefeld und fallweise elektrische oder magnetische Felder einzeln oder kombiniert einwirken. Gegebenenfalls sind die Bewegungen bei Lichtausschluss zu untersuchen. Die Resultate scheinen auf neue Wege zu führen» (l. c. 461).

Einige Beobachtungen

Zunächst schildere ich einige Beobachtungen, die ich mit einer nach dem Vorbild von *H. S. Patterson* und *R. Whytlaw-Gray* (1926) absichtlich einfach gehaltenen Apparatur angestellt habe. Die Sonne diene als stetig bewegte, intensive Strahlungsquelle. (Künstliche Strahlungsquellen wie Kinolampen, Kohlebogen sind auch verwendbar.) Die Bilder habe ich mit meiner Contarex-Special-Kamera (Planar 1:2, $f=50$ mm) an dem dazugehörigen Balgengerät aufgenommen.

Bild 1 zeigt das «Photophorese-Okular». Das Sonnenlicht strahlt durch eine Sammellinse ($f=15$ cm) in einen abgedunkelten Raum. Ein Birnkolben (250 ml) ist so in den Raum der Linsen-Diakaustik gestellt, dass der Brennpunktsbereich ins Kolbeninnere fällt. (Die Diakaustik wird im Äusseren und Inneren des Kolbens durch Rauch sichtbar.) Am Boden des Kolbens liegt Graphitpulver (kolloidal) und ein Stückchen schwarzen Papiere (zur Raucherzeugung im Kolbeninneren).

Nun wird noch bei Luftdruck das Graphitpulver im Kolben aufgeschüttelt: die schwebenden und im Sonnenlicht hell aufglänzenden Körnchen werden in einer Strömung fortgerissen, die im Brennpunktsbereich am schnellsten verläuft. Ausserhalb der Diakaustik führt die Strömung weiter, so dass insgesamt im Kolben eine Bewegungsform um sich greift, die an einen Ringwirbel erinnert.

Wird jetzt der Kolben allmählich evakuiert, so ändert das Strömen seinen Charakter. Viele Teilchen fallen auf den Kolbenboden zurück. In der sich lichtenden Schar der noch schwebenden Partikel treten heftige Bewegungserscheinungen immer deutlicher hervor. Durch den Engpass der Diakaustik fliegen einzelne Teil-

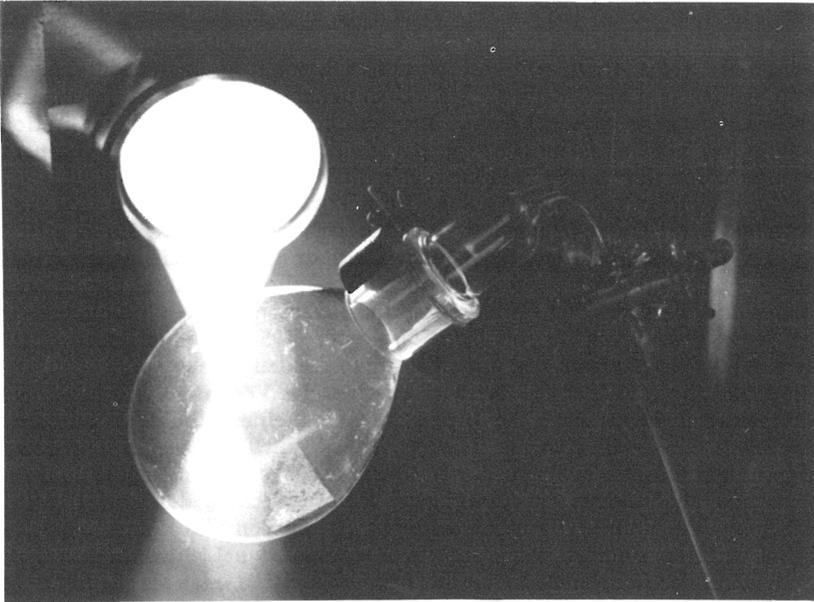


Bild 1 Das Photophorese-Okular

chen schnell gegen die Sonne hin (lichtnegative Photophorese); andere werden von der Sonne fortgeschleudert (lichtpositive Photophorese). Wieder andere scheinen sich um das geschäftige Hin-und-her der übrigen kaum zu kümmern, denn sie verharren hellglänzend an ihrem Ort.

Unvermittelt kann auf dem Schauplatz eine fein punktierte, leicht schwankende lichte Kreislinie auftauchen und sich behaupten (Bild 2). Mit einer mässig vergrößernden Lupe wird deutlich, dass dieser Lichtkreis in sich bewegt ist. Denn die aus Lichtpunkten gebildete Ringfigur wechselt zwischen positiver und negativer Rotation in sich ab. Feinere Untersuchungen der *Ehrenhaftschen* Schule haben ergeben, dass diese Lichtpunktkreise durch Teilchen hervorgerufen werden, die eine in sich zurücklaufende Schraubenlinie, eine *Kreiswendel* durchheilen. Die Gesamtbewegung eines so auf seiner Kreiswendelbahn rotierenden Teilchens erinnert an einen Ringwirbel.

Das Bewegungsschauspiel dauert an, solange es gelingt, den angemessenen Druck aufrecht zu erhalten und die Strahlungsverhältnisse gleich bleiben. Es kann so erreicht werden, dass in der Umgebung des Brennbereiches eine Anzahl von Graphitkörnchen über längere Zeit ein Bewegungssystem vorführen, das jeden Betrachter an die Vorstellungen gemahnt, die heute über die Bewegungen der Planeten um die Sonne üblich sind: einzelne Teilchen ruhen in der Diakaustik wie Fixsterne und werden von anderen planetenartig in verschiedenen Ebenen umkreist. Es gibt aber auch Teilchen (Bild 2), die kreisend in Richtung der Linsenachse rasch hin und her schwingen (Amplitude bis etwa 1 cm), auch in nächster

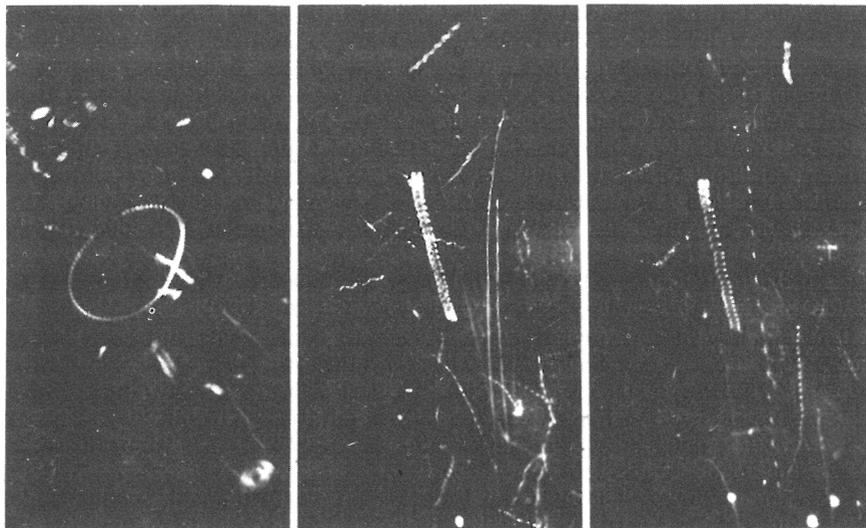


Bild 2 Bahnbilder photophoretisch bewegter Teilchen. Beleuchtungsrichtung von oben links nach unten rechts.

Links: Kreiswendel (Maximaldurchmesser 2,2 mm). 22 Torr, $\frac{1}{4}$ s.

Mitte: Schwingwendel (Amplitude 2,5 mm). 27 Torr, 1s.

Rechts: Dasselbe Teilchen wie in der Mitte (im gleichen Masstab). 27 Torr, $\frac{1}{2}$ s.

Nähe eines kreisenden Teilchens. Verwickelte Bahnformen (Bild 3), die mit eindrücklicher Stereotypie durchlaufen werden, treten auch in Erscheinung; man kann sie als Ergebnisse der Superposition von Transversalkreisen mit Longitudinalschwingungen oder -kreisen auffassen. Bemerkenswert ist noch, dass durch ein solches stabiles Bewegungssystem andere Teilchen kometenartig hindurch schiessen.

Felix Ehrenhaft hat schon in seiner ersten Veröffentlichung (1918b) seine anfänglichen Beobachtungsergebnisse im Zusammenhang mit den Anschauungen von *Svante Arrhenius* über die bewegende Einwirkung der Strahlung im Weltraum auf kleine Materieteilchen gesehen und dazu bemerkt: «Vorliegende Untersuchung wird nun solche in kosmischen Vorgängen fortwährend ablaufende Prozesse in Laboratoriumsräumen wiederholen und damit in die direkte Untersuchung der Fragen eintreten» (l. c. 83). — Man könnte die feineren Beobachtungsergebnisse an den kreisenden Graphitkörnchen auch mit Anschauungen von *Rudolf Steiner* über die Bewegungen im Weltall in Zusammenhang bringen. Dies soll später geschehen. Zunächst seien noch einige weitere Einzelheiten aus meinen Beobachtungsreihen geschildert.

Wenn ein stabiles Bewegungssystem sich im Kolben eingespielt hat, kann man den Kolben sachte so verschieben, dass die Kolbenwand dem Brennbereich der Diakaustik näher rückt. Dabei wird man die erstaunliche Beobachtung machen, dass die im Lichtkegel sich bewegenden Teilchen von dieser Verschiebung zunächst kaum betroffen werden: sie kreisen, schwingen und ruhen weiter. Erst bei nächster Annäherung der Kolbenwand an den Brennbereich der Diakaustik setzen Störungen

ein, die die Teilchen schliesslich zu Fall bringen. Wird die Kolbenverschiebung rückgängig gemacht, bevor die Teilchen ausfallen, so lässt sich der ursprüngliche Zustand wieder herstellen. Hierzu folgende interessante Bemerkung von *Hans Rohatschek* (1957) (die Beobachtungen wurden in gegeneinander gerichteten Lichtbündeln bei veränderlichen Beleuchtungsverhältnissen gemacht): «So kamen z. B. an einem Teilchen je nach dem Ort im Lichtbündel, der Schwächung oder Verformung eines der Strahlen folgende Bewegungen zustande: Kreise verschiedenen Durchmessers und Umlaufsinnes, Schraubenbewegung in Strahlrichtung, Umlauf entlang der Wand des Strahls, Schweben am oberen Rand, Wanderung auf unregelmässigen, gewundenen Bahnen und ‚Springen‘ am unteren Rand. Das Teilchen konnte in allen Strahlgebieten herumgeführt werden. Unter denselben Bedingungen trat jedesmal dieselbe Bewegung ein» (l. c. 284/5).

Über die Zustände in der nächsten Umgebung eines photophoretisch bewegt schwebenden Teilchens habe ich Aufschlüsse erhalten mit Hilfe eines Kunstgriffes, den *Elisabeth Desoyer* (1957) angegeben hat. Man führe mit dem Graphitpulver ein Stückchen schwarzen Papiers in den Kolben ein (Bild 1). Wenn im Kolben der geeignete Druck erreicht ist, werde mit Hilfe der konzentrierten Sonnenhitze das Papier zum Rauchen gebracht.

Sobald das schwarze Papier in den Brennbereich der Diakaustik kommt, bilden sich explosionsartig sphärische Rauch-Schalen um das Sonnenbild. (Gelangt das Graphitpulver in den Brennbereich, so stieben einzelne Körnchen entsprechend auf und können in der Folge – ohne Aufschütteln – in photophoretische Bewegungen einbezogen werden.) Die anfängliche, sphärische Ordnung der Rauchteilchen wird alsbald durch einsetzende Strömungen umgestaltet. Im Bereich der Diakaustik erscheint zuweilen der strömende Rauch (noch bevor Graphitkörnchen schweben) wie von dunklen Hohlräumen durchlöchert. Dieser Anblick kann an die Dunkelräume in der Milchstrasse erinnern.

Nun möge (etwa durch Aufschütteln) ein System photophoretisch schwebend bewegter Graphitteilchen hervorgerufen werden. Dann kann sich folgendes Schauspiel darbieten: einzelne Teilchen werden vom Rauch so umströmt, dass dunklere, rauchverdünnte Zonen die Teilchen umkleiden; oder ein vagabundierendes Graphitteilchen durchheilt eigensinnig den Rauchnebel und schafft sich immer aufs Neue seinen rauchverdünnten Zellenraum.

Im folgenden sollen nun meine Beobachtungen noch durch einige Untersuchungsergebnisse aus der *Ehrenhaftschen* Schule in Anlehnung an den Bericht von *Felix Ehrenhaft* (1951/2) ergänzt werden:

1. Ein 24stündiger Dauerversuch bei Glühlampenlicht in Argon hat gezeigt, dass von 6 stabilen Kreisbahnen nur eine infolge einer kurzzeitigen Stromschwankung verloren ging (*Kurt Desoyer* und *Else Scheu*).
2. Genauere Beobachtung der Kreisbahnen hat gezeigt, dass das kreisende Teilchen noch eine Schraubung um die Kreisbahn ausführt (Kreiswendelbahn, Bild 2). Ausserdem zeigen die Lichtknoten in der Bahn, dass das Körnchen sich dreht.
3. Auf Grund der Beobachtungen von *Else Scheu* wird von einer «Kreiswendelregel» gesprochen: «Demnach haben Bahnen im konvergenten Teil [der Diakaustik], die (von der Lichtquelle gesehen) im Uhrzeigersinn durchlaufen werden, die Gestalt einer Linksschraube, gegen den Uhrzeigersinn durchlaufene die einer Rechtsschraube; bei Bahnen im divergenten Strahlteil ist Umlauf im Uhrzeigersinn mit Rechtsschraube, im Gegenzeigersinn mit Linksschraube verbunden» (l. c. II, 14).

4. Es wurden Kreise beobachtet, die den Querschnitt des Lichtkegels umfassten (Durchmesser 1 cm) und solche, die von blossem Auge nicht mehr als Kreise erkennbar waren.
5. Die Umlauffrequenzen reichen von einigen wenigen bis zu mehreren hundert Umläufen pro Sekunde. —

Schliesslich seien noch einige Überlegungen hervorgehoben, die *Felix Ehrenhaft* gegen Ende seines Berichtes angesichts der Schrauben- und Kreisbahnen aus mechanischen Gründen anstellt:

1. Die stabile Lage der Kreisbahnen quer zur Strahlrichtung zeigt, dass keine resultierende longitudinale Kraft wirkt.
2. Im Licht muss «eine die Schwere kompensierende Kraftkomponente da sein, da der Körper selbst im Verlauf von 24 Stunden nicht hinunterfällt» (l. c. II, 22).
3. Die durch den Gasrest auf den Probekörper einwirkende Bremskraft muss durch «eine tangentiell in Umlaufsrichtung angreifende Kraft» aufgehoben werden.
4. Die Kreisbahn deutet auf das Wirken einer Zentripetalkraft.
5. Die Schraubenbewegung entlang der Kreisbahn führt zur Annahme von Kraftkomponenten in der auf die Kreistangente senkrechten Ebene.
6. Die an den Lichtknoten erkennbare Achsenrotation deutet auf eine weitere Kraftwirkung hin.

Seinen Bericht abschliessend stellt *Felix Ehrenhaft* fest:

«Wie diese Kräfte zustande kommen, die den Probekörper gegen die Reibung antreiben, ihn in einer Kreiswendelbahn führen und diese Bahn nach allen drei Koordinatenrichtungen stabilisieren, konnten wir mit Hilfe des heutigen Wissens bis jetzt noch nicht deuten. Man muss sich vor Augen halten, dass die von uns behandelten Kreis- und Schraubenbahnen etwas ganz Neues, in der Natur noch nie beobachtete Erscheinungen sind; wir können uns beim Versuch einer Deutung nicht an bekannte Vorbilder anschliessen. Bei den scheinbar analogen Schraubenbahnen der Kathodenstrahlen etc. im Magnetfeld liegen ja grundsätzlich verschiedene Verhältnisse vor: denn dort wirkt nach der heutigen Ansicht nur eine senkrecht auf der Bahntangente stehende, ablenkende Kraft, aber keine tangentielle.

Es scheint unwahrscheinlich, dass alle die erstaunlichen Bewegungsphänomene im Licht ohne oder mit Einwirkung von Feldern mit Hilfe der bisher gebräuchlichen Hypothesen auszudeuten sind; wir können wohl gezwungen werden, zu neuen Hypothesen zu greifen. Wie dem auch immer sei, wir können diese Erscheinungen heute durch unsere Sprache systematisch darstellen, und damit ist bei so neuartigen Dingen schon viel geleistet. In Abwandlung eines Ausspruches von *Brewster* zum Kampf um die Natur des Lichtes könnte man sagen: Welcher Theorie man auch huldigen mag, die Vorgänge sind direkt beobachtbar, man findet weiter nichts Hypothesisches als die Namen, die man ihnen gibt» (l. c. II, 23).

Hypothesen

Felix Ehrenhaft hat mit Feinsinn angesichts der photophoretischen Phänomene gespürt, dass hier neue Hypothesen zu ersinnen wären. Er hat wenig gleichgesinnte Physiker gefunden. Die Gesinnung von *Adalbert Rubinowicz* beherrscht das Feld.

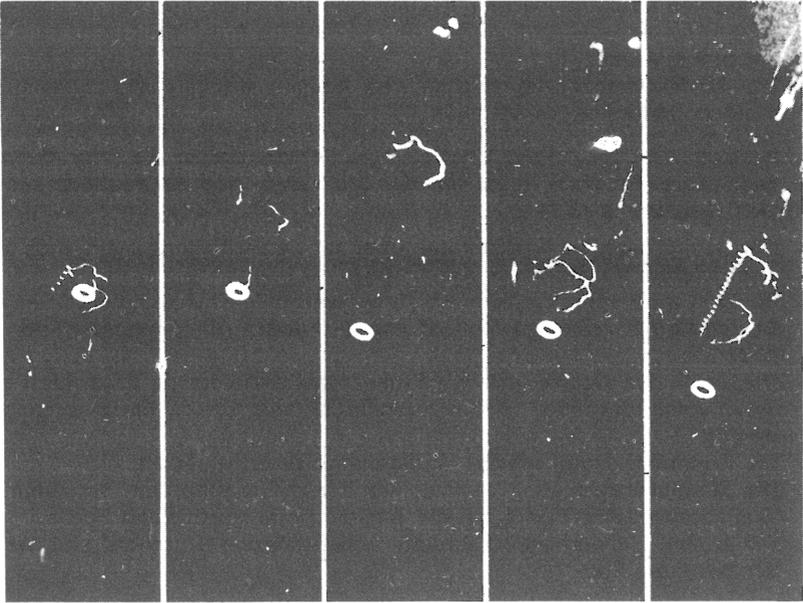


Bild 3 Von links nach rechts aufeinander folgende Bahnbilder (etwa 8fache lineare Vergrößerung) zweier photophoretisch bewegter Teilchen; Beleuchtungsrichtung von oben rechts nach unten links: 38 bis 42 Torr, 1s, 1s, $\frac{1}{2}$ s, 1s, 1s. Die Bilder sind von der Sonnen- seite her aufgenommen. Das langsame Teilchen umkreiste im divergenten Teil der Dia- kaustik anfänglich das schnellere im Uhrzeigersinn. Dann veränderten sich die Bahnen im Verlauf von 27 Minuten infolge der Sonnenbewegung und des langsam ansteigenden Druckes wie die Aufnahmen zeigen.

Auch innerhalb der *Ehrenhaftischen* Schule scheint diese Gesinnung um sich gegriffen zu haben. Dies geht vor allem aus den Arbeiten von *Hans Rohatschek* (1955, 1957) hervor, in denen mit Scharfsinn die radiometrische Deutung der Photophorese ausgearbeitet worden ist. Dabei spielen Vorstellungen der Teilchen- form und der Temperaturverteilung innerhalb der Teilchen eine Rolle. Trotz allen Anstrengungen können aber exakt körperfeste Kräfte doch nicht vorgestellt werden (*Rohatschek* 1957). Ausserdem ergibt sich aus der Radiometerhypothese für ein Teilchen, das sich um eine quer zur Lichtrichtung verlaufende Achse bewegt, dass seine Temperaturverteilung und damit die Radiometerkraft sich von Ort zu Ort ändern. Dieser «Umstand ist auch von grundlegender Wichtigkeit für das Verständ- nis der Doppelwendelbewegung der Lichtphotophorese – im Spezialfall der Kreis- wendeln dürfte die Rotationsachse etwa senkrecht zur Lichtrichtung stehen –, er bedeutet aber eine beträchtliche Erschwerung der allgemeinen Theorie der Licht- photophorese, da man hier nun nicht mehr wie bei den Feldphotophoresen mit Antriebskräften rechnen kann, die allein von der Lage des Körpers zur Bezugs- richtung abhängen» (l. c. 285/6). Die Fragwürdigkeit der Vorstellungen über die Temperaturverteilung hatte aber *Satyendra Ray* (1921) schon gegenüber der Theorie von *Adalbert Rubinovicz* betont.

Es ist für den Kenner der photophoretischen Phänomene offensichtlich, dass die Radiometerhypothese beim Ausbau der Theorie der Photophorese zu berücksichtigen sein wird; es ist aber ebenso offensichtlich, dass die Radiometerhypothese in diesem Zusammenhang nicht hinreicht. Neuartige Hypothesen sind noch zu ersinnen und experimentell zu prüfen.

Im folgenden sei daher ein *Entwurf einer goetheanistischen Hypothese zur Photophorese* gegeben.

Zunächst einige Bemerkungen zur goetheanistischen Methode, die hier massgebend sein wird.

In dem Abschnitt über «Entoptische Farben» beschreibt *Goethe* (1820a) unter anderem die *Seebeckschen* Farbfiguren, die an schnell abgekühlten Gläsern mit Hilfe des optischen Polarisationszustandes (Vgl. *M. Howald-Haller 1964*) hervorgerufen werden können. Dabei lenkt *Goethe* die Aufmerksamkeit auf den Zusammenhang der Spannungsfarbfiguren mit dem Umriss des betrachteten Glasstückes hin und gedenkt einer weiteren Eigentümlichkeit in vorliegendem Fall: «Man schneide eine viereckte Platte mitten durch und bringe den parallelepipedischen Teil zwischen die Spiegel, so werden abermals vier Punkte in den Ecken erscheinen, zwei und zwei weit voneinander getrennt, und von den langen Seiten herein der helle oder dunkle Raum viel breiter als von den schmalen. Schneidet man eine viereckte Tafel in der Diagonale durch, so erscheint eine Figur, derjenigen ähnlich, die sich fand, wenn man Dreiecke glühte.

Suchten wir uns nun vorhin mit einer mechanischen Vorstellungsart durchzuhelfen, so werden wir schon wieder in eine höhere, in die allgemeine Region der ewig lebenden Natur gewiesen; wir erinnern uns, dass das kleinste Stück eines zerschlagenen magnetischen Eisensteins ebenso gut zwei Pole zeigt als das Ganze.

Umsicht

Wenn es zwar durchaus rätlich, ja höchst notwendig ist, das Phänomen erst an sich selbst zu betrachten, es in sich selbst sorgfältig zu wiederholen und solches von allen Seiten aber und abermals zu beschauen, so werden wir doch zuletzt angetrieben, uns nach aussen zu wenden und von unserm Standpunkte aus allenthalben umherzublicken, ob wir nicht ähnliche Erscheinungen zu Gunsten unseres Vornehmens auffinden möchten; wie wir den soeben an den so weit abgelegenen Magneten zu gedenken unwillkürlich genötigt worden.

Hier dürfen wir also die Analogie als Handhabe, als Hebel, die Natur anzufassen und zu bewegen gar wohl empfehlen und anrühmen. Man lasse sich nicht irre machen, wenn Analogie manchmal irre führt, wenn sie, als zu weit gesuchter willkürlicher Witz, völlig in Rauch aufgeht. Verwerfen wir ferner nicht ein heiteres, humoristisches Spiel mit den Gegenständen, schickliche und unschickliche Annäherung, ja Verknüpfung des Entferntesten, womit man uns in Erstaunen zu setzen, durch Kontrast auf Kontrast zu überraschen trachtet. Halten wir uns aber zu unserm Zweck an eine reine, methodische Analogie, wodurch Erfahrung erst belebt wird, indem das Abgesonderte und entfernt Scheinende verknüpft, dessen Identität entdeckt und das eigentliche Gesamtleben der Natur auch in der Wissenschaft nach und nach empfunden wird.» – Hierauf deutet *Goethe*, «den Geist zu befreien und anzuregen», einige Verwandtschaften an: der entoptische Gegensatz ist auch der physiologie, der direkte und oblique Widerschein (Polarisation der Himmelsbläue). Dann wird systematisch die Analogie der *Seebeckschen* Figuren mit den *Chladnischen* Figuren dargestellt. Der erste Satz dieser Darstellung lautet:

«Alle geistreiche, mit Naturerscheinungen einigermaßen bekannte Personen, sobald sie unsern entoptischen Kubus zwischen den Spiegeln erblickten, riefen jedesmal die Ähnlichkeit mit den *Chladnischen* Figuren, ohne sich zu besinnen, lebhaft aus, und wer wollte sie auch verkennen!»

Zu dem wiedergegebenen Abschnitt über Analogie bemerkt *Rudolf Steiner* in einer Fussnote:

«Die Aufsuchung von Analogien, von der *Goethe* hier und in den folgenden Paragraphen einige Beispiele liefert, hat den Zweck, zu einer Anschauung über die sämtlichen, den Raum erfüllenden Kräfte zu gelangen. Unsere sinnlichen Wahrnehmungen beziehen sich auf ein Ausgedehntes im Raume, das wir Materie nennen. *Goethe* stellt sich Materie als ein System von Kräften vor, die den sinnlichen Wahrnehmungsinhalten die bestimmten Gestalten im Raume geben. Diese Kräfte sind nicht blosse Anziehungs- und Abstossungskräfte, wie die Physiker glauben, sondern formbildende Mächte. Wenn wir nun zu einer Ansicht über die Wesenheit dieser Kräfte kommen wollen, so müssen wir analoge Gestaltungsformen in verschiedenen Wahrnehmungsgebieten aufsuchen. Die dadurch auffindbare Einheit ist die des materiellen Kräftesystems im Raume. Dies gibt diese seine einheitliche Wirkungsart dadurch kund, dass es auf verschiedene Wahrnehmungsinhalte nach demselben formgebenden Prinzip wirkt.»

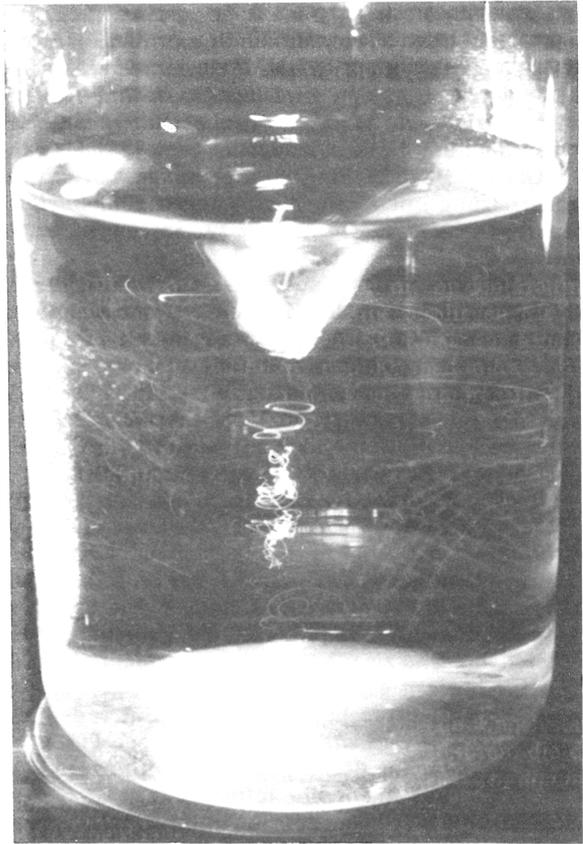
Die Natur der «formbildenden Mächte» hat *Rudolf Steiner* (1921) später beispielsweise auch in der folgenden Weise charakterisiert. Bei wirklich gewissenhaftem Vorgehen im Begreifen der Erscheinungen werde man genötigt, ausser dem System der Zentralkräfte ein System von Kräften zu betrachten, «welches zu dem System der Zentralkräfte sich so verhält, wie die Kugelsphäre zum Radius sich verhält». Zweierlei sei notwendig: «Erstens die Denkweise der Mechanik und der Phoronomie, die es im wesentlichen mit *Zentralkräften* zu tun hat, und, dass wir zweitens hinzufügen müssen zu dem ein anderes System, dasjenige System, das es zu tun hat mit *rotierenden* Bewegungen, mit *scherenden* Bewegungen und mit *deformierenden* Bewegungen. Erst dann, wenn wir ebenso berücksichtigen, das meta-mechanische, das meta-phoronomische System für die rotierenden, für die scherenden, für die deformierenden Bewegungen, wie wir heute berücksichtigen das System der Mechanik und der Phoronomie für die Zentralkräfte, für die zentralen Bewegungserscheinungen, dann werden wir zu einer Möglichkeit kommen, aus demjenigen, was uns empirisch vorliegt, eine Erklärung der Himmelserscheinungen gewinnen zu können.»

Louis Locher-Ernst (1940) hat Möglichkeiten aufgewiesen, die meta-phoronomischen Begriffe im Rahmen der Polareuklidischen Geometrie aufzufassen. Ein Beispiel: wie die Drehung als Kollineation sich aus zwei Spiegelungen ergibt, so folgt die zur Drehung polare «Schabung» als Kollineation aus zwei «Fernspiegelungen».

Die erkenntnistheoretische Klärung des Begriffes «formbildende Mächte» hat *Rudolf Steiner* (1918) gegeben. Die Weltanschauung der *Philosophie der Freiheit* ist dadurch charakterisiert, dass sie «für die Wahrnehmung das Prinzip der Wahrnehmbarkeit, für die Beziehungen unter den Wahrnehmungen die Denkbarekeit fordert» (l. c. 156). Die dualistische Weltanschauung schreibt ausser den Wahrnehmungen noch unwahrnehmbaren Kräften Realität zu. Die hier gemeinte (monistische) moderne Weltanschauung gewinnt im rhythmischen Wechsel von Denken und Beobachten ideelle Zusammenhänge zwischen den Wahrnehmungen. Die Kräfte und formbildenden Mächte sind in diesen ideellen Zusammenhängen aufgehoben.

Bild 4

Wasserwirbel mit Bahnbildern
von Luftbläschen im Seitenlicht



Wenden wir uns nun, *eingedenk der vorausgeschickten methodologischen Bemerkungen*, wieder zur Photophorese hin!

Es geht jetzt darum, der Photophorese ähnliche Erscheinungen aufzuzeigen.

Bei meinen Beobachtungen photophoretischer Bewegungen beeindruckte mich stets ihr wirbelnder Charakter. Unter diesem Eindruck bin ich schliesslich zum folgenden Experiment gelangt:

In einem Becherglas wird durch einen Magnetrührer ein Wasserwirbel erzeugt. Das Ganze ist im Seitenlicht zu betrachten. Zufällig im Wasser vorhandene oder systematisch darin hervorgerufene Luftbläschen führen nun rotierende, wirbelnde, schwingende Bewegungen aus, die jeden Kenner der photophoretischen Bewegungen auf das Lebhafteste an jene erinnern (Bild 4, 5). – Ein befreundeter Jurist machte mich beim Anblick dieser Bewegungsformen auch auf deren gesetzlichen Charakter aufmerksam: sie gleichen in ihren Verwicklungen den Gesetzesparagrafen!

Bis jetzt ist mir an den Bläschen-Wirbelbewegungen keine sekundäre Wendelbewegung aufgefallen. Hingegen ist der positive und negative Fortbewegungssinn, sowie das neutrale Rotieren und das longitudinale Oszillieren durch die wirbelnden

Bläschen verwirklicht, je nach der Art des Zusammenwirkens des Auftriebes und des Wirbelsoges. Ausserdem wirkt sich in der Einzelbewegung eines Bläschens die Bewegungsgestalt des ganzen Wirbels, die selbst wiederum durch variable Randbedingungen bestimmt wird, aus. Es eröffnet sich hier also der Ausblick auf ein weites Arbeitsfeld zum Ausüben der *anschauenden Urteilkraft* im morphologischen Studium dieser Phänomene (Vgl. *Theodor Schwenk*, 1962).

Goethe (1820 b) hat den Begriff der anschauenden Urteilkraft in Auseinandersetzung mit *Kants* Überlegungen zum *intellectus archetypus* entwickelt. Er zitiert in seinem kurzen Aufsatz zur anschauenden Urteilkraft die Stelle aus *Kants* «Kritik der Urteilkraft», die ihm «höchst bedeutend» war:

«Wir können uns einen Verstand denken, der, weil er nicht wie der unsrige diskursiv, sondern intuitiv ist, vom *synthetisch Allgemeinen*, der Anschauung eines Ganzen als eines solchen, zum Besondern geht, das ist, von dem Ganzen zu den Teilen. — Hierbei ist gar nicht nötig zu beweisen, dass ein solcher *intellectus archetypus* möglich sei, sondern nur, dass wir in der Dagegenhaltung unseres diskursiven, der Bilder bedürftigen Verstandes (*intellectus ectypus*) und der Zufälligkeit einer solchen Beschaffenheit auf jene Idee eines *intellectus archetypus* geführt werden, dies auch keinen Widerspruch enthalte.»

Blicken wir jetzt, angeregt durch den Wasser-Luft-Wirbel, wieder auf die Photophorese hin! Wir beachten, dass die Linsen-Diakaustik die Gestalt eines *Wirbelhohlraumes* hat. Und es erhebt sich die Frage, ob die Diakaustik vielleicht ein Wärme-Licht-Luft-Wirbel wäre? Diese Frage kann jeder, der die photophoretischen Phänomene *aus eigener Anschauung* kennt, beantworten. — Die Diakaustik *ist* ein Wärme-Licht-Luft-Wirbel, denn die photophoretisch bewegten Teilchen demonstrieren ihn. Und zwar bestimmt der *Lichtanteil*, der durch die Lichtquelle, die Linse und durch deren gegenseitige Anordnung geprägt wird, die *Form*, gemäss welcher die Teilchen entsprechend ihrer Form durch den *Wärmeanteil* im luftverdünnten Raum *bewegt* werden. Bei den unserem Leben zuträglichen Luftverhältnissen werden photophoretische Phänomene infolge der vordergründigen Konvektionsströmungen nur einem sehr aufmerksamen Beobachter erkennbar. Im Hochvakuum entgehen die photophoretischen Feinheiten den hier geschilderten Beobachtungsmethoden. Es ist also ein mittlerer Bereich grösster Sensibilität zu berücksichtigen, wenn man die Absicht hat, die Photophorese zu studieren.

Durch die Würdigung der Bedeutung der Diakaustik für die Photophorese ist eine Untersuchungsrichtung aufgewiesen, die meines Wissens bisher nicht beachtet worden ist. Dies ist umso erstaunlicher, als *Hans Rohatschek* (1957) aufgrund der sehr genauen Beobachtungen in gegeneinander gerichteten Lichtbündeln «eine hohe Empfindlichkeit gegenüber der Konfiguration des Lichtkegels» (l. c. 284) festgestellt hat. Allerdings ist dieses Übersehen des Formzusammenhanges wiederum verständlich, wenn man bedenkt, dass die heutigen Physiker in der morphologischen Betrachtungsweise nicht sehr geübt sind. Eine goetheanistische Untersuchung auf diesem Feld wird sich aber gerade dadurch auszeichnen, dass sie, über das Vorstellen von Kausalzusammenhängen hinausgehend, auch Gestaltzusammenhänge mit *anschauender Urteilkraft* prüft. So erscheint das *Huygenssche* Prinzip als eine unorganische Abspiegelung des organischen Gesetzes, wonach im Teil das Ganze waltet. Dieses ganzheitliche, gestaltliche Gesetz wird auch an den Strömungsphänomenen, die — wie gezeigt wurde — in Analogie zur Photophorese stehen, anschaulich.

Das neuartige der vorgebrachten Wirbel-Analogie für die Photophorese liegt darin, dass nicht bisher unbekanntes «Eigenschaften» des Lichtes hypostasiert wer-

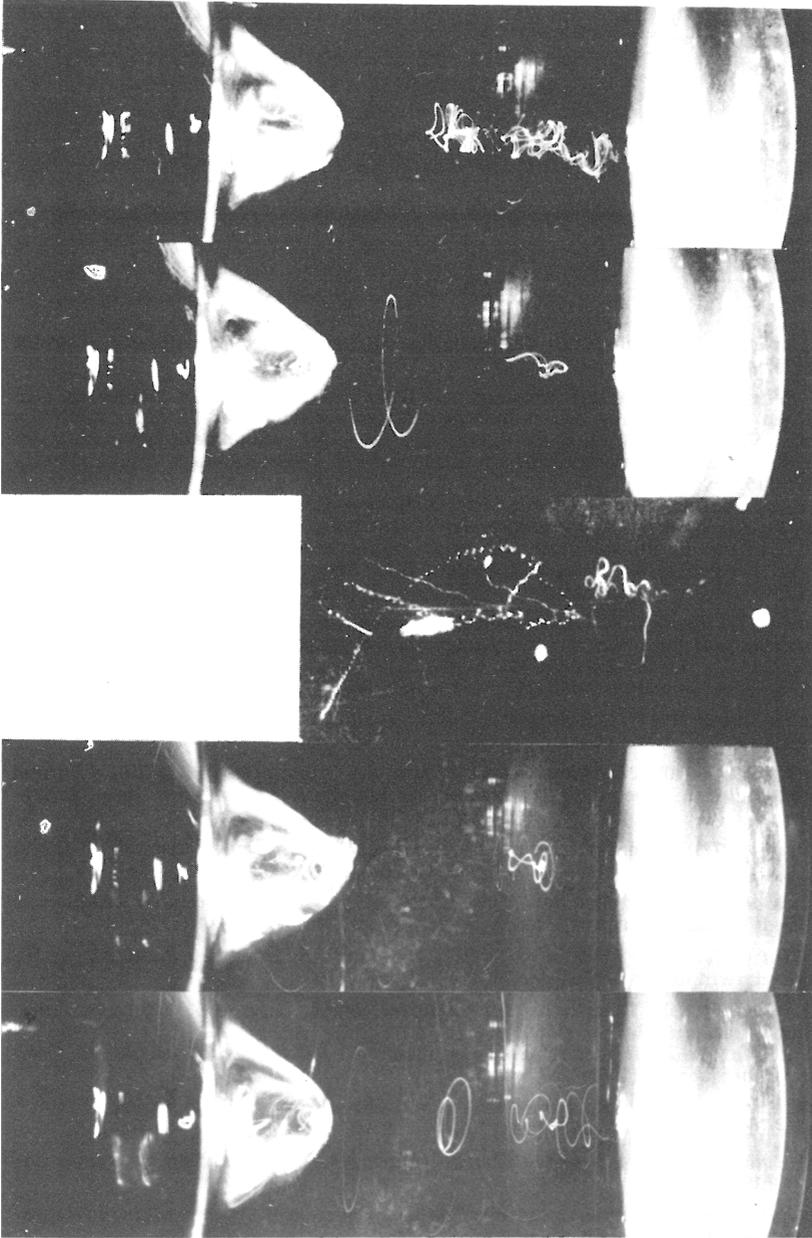


Bild 5 Zusammenstellung von Bahnbildern bei Photophorese (Mitte) und bei Wasserwirbeln. *Mitte*: etwa 8fache lineare Vergrößerung, Beleuchtungsrichtung von oben nach unten, 28 Torr, 1s. Belichtungszeit bei den Wasseraufnahmen $\frac{1}{8}$ s.

den, wie dies *Felix Ehrenhaft* und andere getan haben, sondern, dass versucht wird, den ganzen Phänomenbereich in seinem morphologischen Charakter zu erfassen. Dieser morphologische Charakter war es wohl auch, der insgeheim *Felix Ehrenhaft* ein Leben lang anzog.

LITERATUR

- Desoyer, Elisabeth* (1957): Zur Natur der photophoretischen Kräfte. *Acta physica austriaca* 10 (1957) 221.
- Ehrenhaft, Felix* (1910): Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die kleiner zu sein scheinen als die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons und von dessen Vielfachen abweichen. *Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien*, 119, IIa (1910) 815.
(1918 a): Über die Teilbarkeit der Elektrizität. *Annalen der Physik* 361 (1918) 1.
(1918 b): Die Photophorese. *Annalen der Physik* 361 (1918) 81.
(1951/2): Über die Photophorese, die wahre magnetische Ladung und die schraubenförmige Bewegung der Materie in Feldern I, II. *Acta physica austriaca* 4/5 (1951/2) 461/12.
- Goethe, Johann Wolfgang* (1820 a): Entoptische Farben. In: *Goethes Werke, Naturwissenschaftliche Schriften* (Ausgabe von Joseph Kürschner/Rudolf Steiner) 36/2, Stuttgart/Berlin/Leipzig, Sonderausgabe 1921, S. 209 ff.
(1820 b): Anschauende Urteilskraft. In: *Goethes Werke* (siehe oben) 33, 115.
- Howald-Haller, Mario* (1964): Doppelspat und Polarisation. *Elemente der Naturwissenschaft* 1 (1964) 12.
- Locher-Ernst, Louis* (1940): Projektive Geometrie und die Grundlagen der Euklidischen und Polareuklidischen Geometrie (Urphänomene der Geometrie, zweiter Teil). Zürich/Leipzig.
- Mattauch, Josef* (1922): Neue Versuche zur Photophorese. *Physikalische Zeitschrift* 23 (1922) 444.
- Patterson, Hubert Sutton and Whytlaw-Gray, Robert* (1926): Photophoresis. *Proceedings of the Leeds Philosophical and Literary Society (Scientific Section)* 1 (1926) 70.
- Ray, Satyendra* (1921): Über zwei Schwierigkeiten bei der Erklärung der Photophorese als Radiometerwirkung. *Annalen der Physik* 371 (1921) 71.
- Rohatschek, Hans* (1955): Theorie der Photophorese. Staub, hrsg. v. d. Staubforschungsinstitut Düsseldorf, Heft 42 (1955) 607.
(1957): Über die Kräfte der reinen Photophorese und der Gravitophotophorese. *Acta physica austriaca* 10 (1957) 267.
- Rubinowicz, Adalbert* (1920): Radiometerkräfte und Ehrenhaftsche Photophorese I, II. *Annalen der Physik* 367 (1920) 691/716.
- Schwenk, Theodor* (1962): Das sensible Chaos. Strömendes Formenschaffen in Wasser und Luft. Stuttgart.
- Steiner, Rudolf* (1918): Die Philosophie der Freiheit. Grundzüge einer modernen Weltanschauung. Dornach 26.—28. Tausend.
(1921): Das Verhältnis der verschiedenen naturwissenschaftlichen Gebiete zur Astronomie. 10. Vortrag (10. Januar 1921), Dornach.