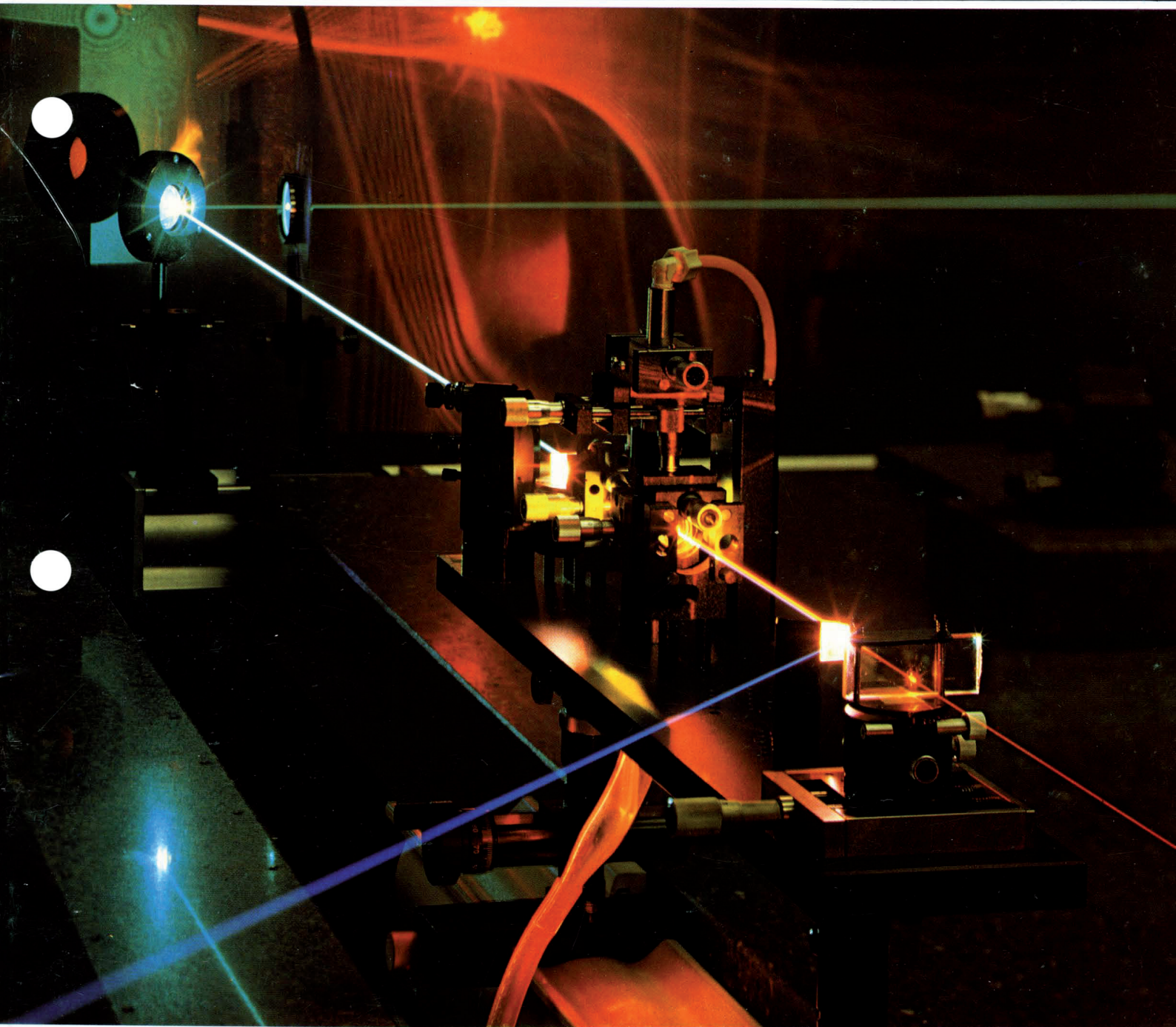


E 2688 FX

laser + elektro- optik 4

DM 12,50
Stuttgart
November 1979
11. Jahrgang



Erste deutschsprachige
Fachzeitschrift für Laser, Elektro-Optik
und Strahlentechnik

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

Versuch's und beweis es: Nr. 3 Try and Prove it: No. 3

Eine Reihe von Lehrversuchen werden von Robert Schwankner gebracht. Kleine Aufgaben mit kohärenten Wellen, die einesteils Spass machen, andererseits in die kohärente Optik einführen.

This is a series of several different laser experiments, presented by R. Schwankner. These tested demonstrations are meant for university and highschool practical courses.

Zur Brownschen Molekularbewegung

The third experiment of this series deals with Brown's early observations on plant-sex which are nowadays regarded as one of the fundaments on which Dalton's hypothesis of 're-establishing the idea of atom in a new sense' proved to be right. By means of laser projection, Brownian movement can be demonstrated to a large audience within a few seconds only. The observations are discussed.

Im Jahre 1827 gelang dem englischen Botaniker Robert Brown eine merkwürdige Entdeckung [1]. Aus der deutschen Übersetzung der englischen Publikation, die in den «Annalen der Physik» erschien, seien hier einige Stellen zitiert [2]:

... Meine Untersuchung begann im Juni 1827, und die erste Pflanze, welche ich untersuchte, zeigte sich mir in gewisser Rücksicht merkwürdig wohl geeignet zu dem beabsichtigten Zwecke.

Diese Pflanze war Clarckia pulchella. Die Körner ihres Pollens, welcher von den völlig ausgewachsen, aber noch nicht aufgebrochenen Antheren abgenommen worden, waren mit Partikeln oder Körnchen von ungewöhnlicher Grösse gefüllt. Ihre Länge schwankte von fast $\frac{1}{4000}$ bis ungefähr $\frac{1}{5000}$ Zoll, und ihre, vielleicht etwas abgeplattete, Gestalt zwischen einer cylindrischen und ovalen, welche zugerundete und gleiche Enden hatte. Als ich die Gestalt dieser, in Wasser getauch-

ten Partikeln untersuchte, bemerkte ich, dass viele von ihnen sichtlich in Bewegung waren. Ihre Bewegung bestand nicht bloss aus einer Ortsveränderung in der Flüssigkeit, wie es sich durch die Veränderungen in ihren gegenseitigen Lagen ergab; sondern auch nicht selten aus einer Veränderung in der Gestalt der Theilchen selbst. In der Mitte der einen Seite fand wiederholt eine Contraction oder Krümmung statt, welche von einer entsprechenden Anschwellung oder Convexität an der gegenüberliegenden Seite des Partikelchens begleitet wurde. Einige wenige Partikelchen sah man sich um ihre eigene Axe drehen. Nach häufiger Wiederholung dieser Beobachtungen überzeugte ich mich, dass diese Bewegungen weder von Strömungen in der Flüssigkeit, noch von deren allmählicher Verdampfung herrührten, sondern den Partikelchen selbst angehörten...

Brown war bei der Beobachtung von Pflanzensporen (Clarchia pulchella) eine eigenartige Zitterbewegung aufgefallen, die nicht auf Erschütterungen der Versuchsanordnung zurückgeführt werden konnte, wie er in zahlreichen Versuchen nachwies. Brown vermutete, eine selbständige organische Bewegung des Pollens entdeckt zu haben analog den Spermien bei Säugetieren.

... Da ich durch die bisherige Untersuchung, wie ich glaube, einen besonderen Charakter in den Bewegungen, welche die Pollen-Partikeln im Wasser zeigen, aufgefunden hatte; so schien es mir, dass diese Besonderheiten durch gewisse Familien von Cryptogamen, namentlich durch die Moose und das Genus Equisetum, in welchen das Daseyn der Sexualorgane noch nicht allgemein angenommen worden ist, eine Bestätigung finden könnten.

In den vermeintlichen Staubfäden dieser beiden Familien, namentlich in den cylindrischen Antheren oder dem Pollen der Moose, und auf der Oberfläche der vier spathelförmigen Körper, welche, wie man annehmen kann, beim Equisetum das nackte Ovulum umgeben, fand ich

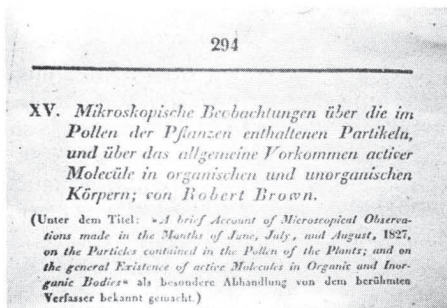


Bild 1 Erste deutsche Übersetzung von Browns Originalarbeit [2].

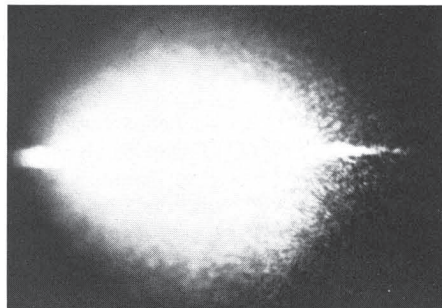
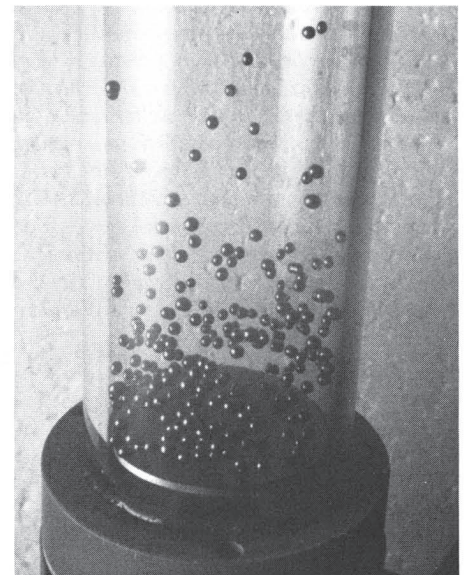


Bild 2 Laserprojektionsbild der Brown-Bewegung von Al-Flitter [17].

Bild 3 Modellversuch zur Maxwellverteilung der Modellgasatome: Eine vibrierende Membran regt die Modellgaskugeln an; die Steighöhe ist ein Mass für die individuelle potentielle Energie eines Teilchens [17].



kleine sphärische Partikeln, die anscheinend mit den bei den Onagrarien beschriebenen von gleicher Grösse waren, und nach Eintauchung in Wasser, ebenfalls eine lebhaftige Bewegung hatten. Auch war diese Bewegung noch bei Exemplaren von Moosen und Equisetum zu beobachten, welche seit einem Jahrhunderte getrocknet aufbewahrt worden waren.

Die sehr unerwartete Thatsache einer scheinbaren Lebendigkeit, welche diese kleinen Partikeln so lange nach dem Tode der Pflanzen beibehalten hatten, würde meinen Glauben an die vorausgesetzte Eigenthümlichkeit vielleicht nicht wesentlich geschwächt haben; allein ich beobachtete gleichzeitig, dass bei, anfänglich zufälliger, Zerquetschung der Ovula oder des Saamens von Equisetum die Zahl der sich bewegenden Partikeln so zugenommen hatte, dass mir über die Ursache dieser Zunahme kein Zweifel übrig bleiben konnte. Ich fand auch, als ich erstlich das Perigonium und dann alle übrigen Theile der Moose zerquetschte, dass ich mit Leichtigkeit ähnliche Partikeln erhielt, zwar nicht in so grosser Zahl, allein gleichfalls mit einer Bewegung begabt. Das von mir vermuthete Prüfungsmittel auf männliche Organe musste daher nothwendig aufgegeben werden ...

Brown glaubte nun, nach dem Fall seiner These der selbständigen Befruchtungsbewegung der Spermien, die «elementaren Molecüle der organischen Körper» vor sich zu haben, eine in jener Zeit noch stark an der theologisch geprägten Vis-vitalis-Anschauung orientierte Vorstellung. (Ein Jahr später erschien Wöhlers wichtige Arbeit zur Laboratoriumssynthese von Harnstoff [3], was gleichbedeutend mit dem Fall der Vis-vitalis-Hypothese war.)

... Ich hoffte daher, diese Molecüle in allen organischen Körpern zu finden, und untersuchte daher eine Menge animalischer und vegetabilischer Gewebe, sowohl lebende als todt. Ich fand sie auch überall vorhanden, und konnte durch Zerquetschen dieser Substanzen in Wasser die Molecüle immer in hinlänglicher Menge abtrennen, um ihre scheinbare Identität in Grösse, Gestalt und Bewegung mit den kleineren Partikeln der Pollenkörner zu ermitteln...

Ganz nebenbei lieferte Brown bei seinen Studien uns auch ein Zeugnis der Luftverschmutzung im Zeitalter der aufkommenden Industrialisierung (1828!).

... Ich bemerkte hier auch, besonders für diejenigen, welche etwa späterhin diese Untersuchung vornehmen sollten, dass der Staub oder Russ, welcher, besonders in London, auf allen Körpern in grosser Menge liegt, gänzlich aus diesen Molecülen besteht.

Ich werde gegenwärtig nicht weiter ins Detail gehen, noch über diese, wie es scheint, in unorganischen und organischen Körpern so allgemein verbreiteten Molecüle irgend eine Vermuthung wagen; nur halte ich es für nöthig, die hauptsächlichsten Substanzen zu nennen, aus welchen ich sie nicht bekommen konnte. Diese sind: Öl, Harz, Wachs und Schwefel, diejenigen Metalle, welche ich nicht auf den zur Absonderung der Molecüle erforderlichen Grad der Zertheilung bringen konnte, und endlich: die in Wasser auflöselichen Körper...

Dieser ersten Untersuchung Browns, die er mit grosser Sorgfalt angestellt hat, folgten weitere, die aber alle noch nicht den Kern der Sache erfassten, sondern sich lediglich mit einer verfeinerten Beschreibung der Erscheinung beschäftigten. So fanden Cantoni und Oehl (1865), dass die Bewegung unverändert über ein Jahr hinweg anhielt, wenn man einen Flüssigkeitstropfen zwischen ausgehöhlten Objektträger und Deckgläschen versiegelte. Exner fügte 1867 die Erkenntnis hinzu, dass die Bewegung sich mit Lichteinfall und steigender Temperatur

verstärkt, und unterstrich schon die von Brown gemachte Beobachtung, dass die Erscheinung bei kleineren Teilchen stärker ausgeprägt ist. Die von Jevos (1870) aufgeworfene Frage, ob die Bewegung von elektrischen Kräften herrühre, wurde von Dancer im gleichen Jahr widerlegt. Delsaux ist die erste, heute allgemein anerkannte Deutung des Phänomens zuzuschreiben: Er vermutet Stösse unsichtbarer Flüssigkeitsmoleküle mit dem grösseren Pollen. Eine sehr präzise Untersuchung verdanken wir Gouy, der herausfand, dass die Bewegung von der Viskosität der Flüssigkeit abhängig ist (4). Er schrieb die Erscheinung der Temperatur des Lösungsmittels zu und stellte eine Beziehung zwischen der damals angenommenen Geschwindigkeit der Daltonschen Gasatome und der Brownschen Bewegung auf. Ende des vergangenen Jahrhunderts hatte sich die «Idee von den Atomen» mit den Arbeiten Maxwells und Boltzmanns zur Thermodynamik und kinetischen Gastheorie immer mehr verdichtet und fand in den schon eingangs erwähnten Experimenten über Kathoden- und Kanalstrahlen ihre Bestätigung.

Albert Einstein begann dieses Phänomen konsequent statistisch zu deuten (seine fünf Arbeiten auf diesem Gebiet sind in einer Zusammenfassung nachgedruckt worden [5]). Einstein formulierte klar, dass die ungeordnete Partikelfortbewegung auf Stösse der viel kleineren Moleküle des umgebenden Mediums zurückzuführen seien; da es nun extrem unwahrscheinlich ist, dass sich die vielen gleichzeitigen Stösse ausgleichen, erhält das Teilchen einen Gesamtimpuls, dessen Richtung im Einzelfall nicht vorherbestimmbar, also stochastischer Natur ist. Somit wurde Browns Arbeit nachträglich in ihrer Bedeutung für die Entwicklung der modernen Auffassung vom Atom gleichberechtigt neben die Arbeiten Daltons «zur konstanten und multiplen Proportion» gestellt. Erst in den dreissiger Jahren unseres Jahrhunderts gelang es dem deutschen Physiker E.W. Müller mit dem von ihm entdeckten Feldelektronenmikroskop, das imstande ist, einzelne Atome abzubilden, die Brownsche Molekularbewegung «direkt» sichtbar zu machen [6–10].

Demonstration der Brownschen Molekularbewegung

Eines der Reagenzgläser wird mit Wasser unter Hinzufügen von etwas Aluminiumstaub gefüllt. Die optimale Konzentration ist durch Verdünnen später zu ermitteln. Zur besseren Durchmischung und zur Herabsetzung der Oberflächenspannung wird etwas Alkohol oder Spiritus zugesetzt. Das Reagenzglas wird heftig geschüttelt und direkt in den auf eine Wand des Hörsaales oder eine Projektionsleinwand gerichteten Laserstrahl gehalten (Abstand mindestens 2 m). Durch mehrmaliges Verdünnen und Umschütteln ermittelt man die günstigste Beobachtungskonzentration, die dann erreicht ist, wenn der sich abbildende «Kreis» nicht mehr homogen erscheint, sondern ein deutliches Flimmern aufweist. Danach wird nochmals kräftig geschüttelt und die Suspension zur Hälfte in das andere Reagenzglas gegeben, womit eine gleiche Konzentration an AL-Flittern in beiden Gläsern erreicht ist. Beide Gläser werden in die mit Wasser gefüllten Projektionsküvetten gestellt. Durchstrahlt man nacheinander beide Anordnungen mit dem Laser, so stellt man ein lebhaftes Gewimmel auf der Projektionsleinwand fest, das auf die Brownsche Molekularbewegung des Aluminiums zurückzuführen ist (siehe Bild 2).

Interessant ist, dass die Bewegung der Teilchen zunimmt, nachdem sich ihre Zahl durch Absetzen im Gravitationsfeld vermindert hat. – Die Gesamtenergie ist ja unverändert geblieben. Konvektion ist durch das umgebende, gleichmässig temperierte Wasser ausgeschlossen. Erwärmt man eine der beiden Anordnungen mit einer Heizplatte, so stellt man eine lebhaftere Bewegung fest, wenn zum Vergleich die Anordnung mit Raumtemperatur eingeblendet wird.

Einstein verwendete gerne den Vergleich mit einem Ameisenhaufen: «Streut man auf einen Ameisenhaufen Papierschnitzel, so können diese selbst in grösserer Entfernung in Bewegung gesehen werden, ohne dass eine einzelne Ameise zu erkennen ist.» Ein sehr demonstrativer Modellversuch zur Brownschen Bewegung, der sich zum Aluminiumversuch anbietet, stellt das in Bild 3 wiedergegebene Modellgasexperiment dar. Durch Vibration werden Metallkugeln in Bewegung versetzt und steigen, je nach der auf sie übertragenen Energie, in dem Glasrohr verschieden weit entgegen dem Gravitationsfeld.

Eine gleichzeitige Beobachtung beider Küvetten ist dann möglich, wenn der Laserstrahl mit Hilfe eines Gitters aufgespalten und somit gleichzeitig durch beide Anordnungen geschickt werden kann. Der seitliche Beobachter kann das statistische Aufblitzen der Aluminiumfitter bei Lichtdurchgang sehr gut verfolgen. Dem Einwand von Hoischen [11], dass es sich bei der oben beschriebenen Erscheinung um durch Erschütterungen ausgelöste Bewegungen der Aluminiumpartikeln handelt, wird von Greiner und Groschopf heftig widersprochen [12–14]. Ein Hauptargument mag die Zunahme der Teilchenbewegung nach dem Absinken des grösseren Teils sein, was sich nicht mit Hoischens Ansicht in Einklang bringen lässt [11]. Die Erfahrungen des Verfassers sprechen eindeutig für die Demonstration dieses Experiments, dessen Vorteile darin bestehen, das Phänomen gleichzeitig einem grösseren Auditorium zugänglich zu machen und die Einwände [11] durchzudiskutieren.

Manch einer, der die Schönheit dieses Experiments empfindet und der dabei vielleicht an den Positivisten E. Mach denkt, der bei Vorträgen der «Atomisten» immer wieder die Frage aufwarf: «Habns eins gsehn?», wird wohl dadurch ebenso überzeugt werden wie Mach, als man ihm das erste Spinthariskop demonstrierte, mit dem man die Wirkung einzelner Alphateilchen sichtbar machen kann [15].

Der Wissenschaftshistoriker Jacob Bronowski hat den «Atomisten» unter der Führung Ludwig Boltzmanns folgende Zeilen von William Blake in seinem «Aufstieg des Menschen» [16] gewidmet:

**Die Welt erschau in einem Korn aus Sand,
Den Himmel im Wiesengrunde,
Das Unendliche fang in der Hand,
Die Ewigkeit in einer Stunde.**

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] Brown, Robert, in Philosophical Magazine (4), (1828), 161 ff.
- [2] Brown, Robert in Annalen der Physik und Chemie (2), (1828), 294–312.
- [3] Wöhler, Friederich, «Über künstliche Bildung des Harnstoffs», in Poggendorfs Annalen 12, (1828), 253 ff., wiedergegeben in Klinik, R., «150 Jahre Harnstoffsynthese von Wöhler», in Merck Kontakte 2 (1977), 3–5.
- [4] Gouy, M., in Journal de Phys. (2), 7 (1888), 561 ff.
- [5] Fürth, R. (Editor), Albert Einstein – Investigations on the Theory of the Brownian Movement, Dover Publications, New York, Standard book Number 486-60304-0.
- [6] Müller, E.W., in Zeitschrift f. Physik, 106 (1937), 541 ff.
- [7] Müller, E.W., «Atome und Moleküle werden sichtbar», in Umschau, 5 (1950), 761 ff.
- [8] Müller, E.W., «Die Sichtbarmachung einzelner Atome und Moleküle im Feldelektronen-Mikroskop», in Zeitschrift für Naturforschung, 5a (1950), 473 ff.
- [9] Hecht, Karl, «Das Feldelektronenmikroskop», in Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 5, 35 und 90 (1952/53).
- [10] Seiler, Helmut, Abbildung von Oberflächen mit Elektronen, Ionen und Röntgenstrahlen, BI Hochschultaschenbücher 428, 428a, Bibliographisches Institut Mannheim (1968).
- [11] Hoischen, A., «Die Brownsche Bewegung», in Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 6 (1953), 280–281.
- [12] Greiner, E., in Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 2 (1949), 177 ff.
- [13] Greiner, E., «Beobachtung der Brownschen Molekularbewegung mit blossen Auge», in Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht, 6 (1955/56), 330.
- [14] Groschopf, Gottfried, «Die Beobachtung der Brownschen Molekularbewegung», in Praxis der Naturwissenschaften 10 (1961), 188–189.
- [15] Meyer, Stefan, «Das Spinthariskop und Ernst Mach», in Zeitschrift für Naturforschung (1950), 407–408.
- [16] Bronowski, Jakob, Der Aufstieg des Menschen, Ullstein, Frankfurt am Main-Berlin-Wien (1976).
- [17] Schwankner, Robert, Laseranwendungen in der Experimentalchemie – Ein Praktikum, Carl Hanser Verlag, München-Wien (1978).