

aus der sich die Affinität sofort berechnen lässt:

$$\mathcal{A} = -dW/d\xi. \quad (6)$$

Wieder ist es hierfür belanglos, ob die Zelle gleichzeitig über andere Pfade (zum Beispiel infolge Wärmeleitung durch die Gefäßwände) Energie aufnimmt oder abgibt.

Die Aufgabe, die Kolben und Zylinder in unserem ersten Anwendungsbeispiel haben, wird in unserem zweiten von Elektroden und Elektrolyten übernommen. Beides sind lediglich Handhaben, um die uns interessierende Variable, V im ersten Fall und ξ im zweiten, gezielt verändern zu können. Kolbenstange und Anschlussdrähte fungieren als Kanäle, über welche

unser System Energie W mit seiner Umgebung austauscht, wobei $-p$ bzw. $-\mathcal{A}$ angeben, wie viel es ist, wenn V und ξ sich ändern:

$$dW = -pdV \quad \text{bzw.} \quad dW = -\mathcal{A} d\xi.$$

12 Schlussbemerkung

Nach demselben Muster lassen sich auch andere intensive Größen definieren und messen – wie das elektrische Potenzial φ , das chemische Potenzial μ , das gravitative Potenzial ψ , die Temperatur (= thermisches Potenzial) T usw. bzw. die Differenzen dieser Größen $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$, $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1$, $\Delta T = T_2 - T_1$ zwischen verschiedenen Orten. Aber das erfordert, dass man sich mit den betroffenen Gebieten etwas näher befasst. ■

Literatur

- [1] G. Falk u. W. Ruppel: *Energie und Entropie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1976.
 [2] F. Herrmann: *Der Karlsruher Physikkurs – Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I*, Köln: Aulis Verlag Deubner 2003.
 [3] G. Job: *Neudarstellung der Wärmelehre – Die Entropie als Wärme*. Frankfurt: Akademische Verlagsgesellschaft 1972.
 [4] G. Job: *Chemische Reaktionen physikalisch beschrieben*. – In: G. Falk u. F. Herrmann (Hrsg.): *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts*, Heft 4 – Hannover: Schroedel 1981, 14-31.

Anschrift der Verfasser

Dr. Georg Job, Eduard-Job-Stiftung c/o. Institut für Physikalische Chemie, Grindelallee 117, 20146 Hamburg, E-Mail: Georg.Job@gmx.de

Altlasten der Physik (139): Unpolarisiertes Licht

F. Herrmann

Gegenstand

Was versteht man unter unpolarisiertem Licht? Die folgenden Zitate versuchen eine Antwort zu geben.

„Die E -Feldvektoren der Lichtwellen schwingen in keiner Vorzugsrichtung. Von Polarisation spricht man, wenn sich die E -Feldvektoren in einer bestimmten Weise bewegen. Weißes Licht ist im allgemeinen unpolarisiert.“

„... handelt es sich bei elektromagnetischer Strahlung in der Regel um die Überlagerung einer Vielzahl von Einzelwellen unterschiedlicher Lage der Schwingungsebene und relativer Phase. Das meiste in der Natur vorkommende Licht ist als thermische Strahlung zunächst unpolarisiert, das heißt, die Einzelwellen sind in ihren Eigenschaften statistisch verteilt.“

„Natürliches Licht ist in der Regel nicht polarisiert. Es entsteht durch atomare Strahlungsübergänge einer großen Anzahl von Atomen. Jedes dieser Atome strahlt eine Lichtwelle ab, deren Polarisationsrichtung statistisch im Raum verteilt ist, so dass sich die Schwingungsebene des ausgesendeten Lichts fortlaufend ändert.“

Unpolarisiertes Licht wird manchmal mit einer Skizze wie der von Abb. 1 veranschaulicht, offenbar einer Momentaufnahme der elektrischen Feldstärke (genauer: der Spitze des Vektorpfeils) über der Ortskoordinate in Laufrichtung des Lichtstrahls. Zu sehen sind mehrere „Wellen“ gleichzeitig am selben Ort.

Mängel

Es ist sicher nicht schwer zu verstehen, was eine polarisierte elektromagnetische Welle ist. Auch versteht man leicht, was ein Polarisator bewirkt. Schwieriger scheint die Frage zu sein, was man sich unter unpolarisiertem Licht vorzustellen hat. In Lehrbüchern kommt dieses Thema oft etwas zu kurz.

Es gibt verschiedene Theorien des Lichts: die geometrische Optik, die klassische Elektrodynamik, die Quantenelektrodynamik, die Thermodynamik. Je nach Theorie benutzt man andere Modelle und je nach Theorie fällt die Erklärung, was unpolarisiertes Licht ist, etwas anders aus. Wir wollen uns hier auf die klassische Elektrodynamik beschränken.

Man beschreibt den Polarisationszustand eines Lichtbündels am besten, in-

dem man eine Aussage darüber macht, wie sich der elektrische Feldstärkevektor in einer festen Schnittebene quer zum Lichtbündel im Verlauf der Zeit verhält; oder in graphischer Darstellung: wie sich die Vektorpfeilspitze bewegt. (Wir nehmen an, dass das Lichtbündel in seiner Querausdehnung homogen ist.)

Licht kann in den verschiedensten „Polarisationszuständen“ vorliegen. Unter ihnen sind die wichtigsten und bekanntesten die lineare Polarisation, die elliptische (mit dem Sonderfall der zirkularen) Polarisation und die völlige Abwesenheit von Polarisation.

Beim linear polarisierten Licht macht die Vektorpfeilspitze eine harmonische Bewegung, bei elliptischer Polarisation eine Ellipsenbewegung. Man kann noch viele andere Lichtfelder präparieren, bei denen der Vektorpfeil die verschiedensten mehr oder weniger regelmäßigen Bahnen durchläuft, z. B. Lissajous-Figuren. Bei unpolarisiertem Licht schließlich bewegt sich die Feldstärkevektorpfeilspitze auf einer unregelmäßigen Bahn, die keinerlei Periodizität erkennen lässt. Die mittlere Geschwindigkeit dieser Bewegung hängt von

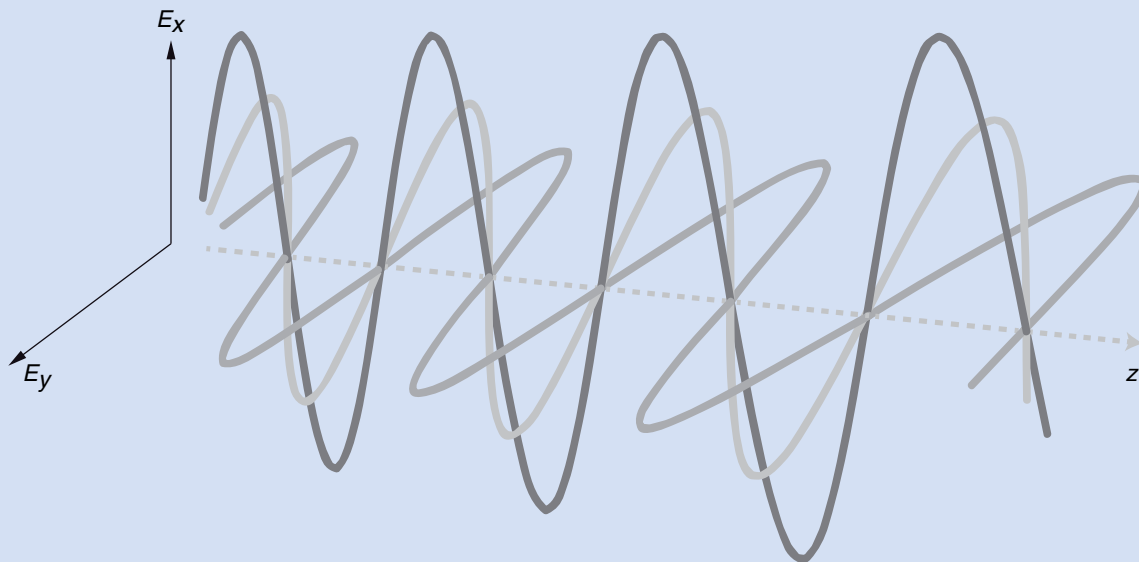


Abb. 1: „Momentaufnahme“ des Verlaufs der elektrischen Feldstärke einer elektromagnetischen Welle. Ist die Welle unpolarisiert?

der Temperatur des Lichts ab und die mittlere Länge des Vektorpfeils von der Lichtintensität. Sowohl die Richtung, als auch der Betrag des Vektors zeigen einen unregelmäßigen Verlauf. Man hätte den Vektor auch durch seine kartesischen Komponenten beschreiben können. Dann hätte man gesagt: Sowohl die x - als auch die y -Komponente des Vektors zeigen einen unregelmäßigen Verlauf. In beiden Beschreibungsweisen hat man zwei Beiträge zur „Unordnung“ des Zustandes des Lichts und damit zur Entropie, die das Lichtbündel transportiert.

Nun zu unseren Zitaten.

1. Das erste Zitat sagt, dass die E-Feldvektoren schwingen, aber dabei keine Richtung bevorzugen. Nun versteht man unter einer Schwingung allgemein einen periodischen Vorgang. Bei weißem Licht macht aber die Vektorpfeilspitze keine periodische, sondern eine unregelmäßige Bewegung.
2. Im zweiten Zitat wird gesagt, dass es sich bei thermischer Strahlung um eine Überlagerung aus Einzelwellen handelt. Diese Aussage geht etwas zu weit. Zunächst müsste erklärt werden, was man unter einer Einzelwelle versteht. Man könnte annehmen, mit „Einzelwelle“ sei „Sinuswelle“ gemeint. Die Einzelwellen wären also einfach die Fourierkomponenten des Lichts. In diesem Fall wäre es aber wohl geschickter zu sagen, man kann die Strahlung in solche Komponenten zerlegen, – genauso wie man es auf noch viele andere Arten zerlegen kann. Vielleicht sind aber doch nicht die Fourierkomponenten gemeint. Einen Hinweis gibt unser drittes Zitat.
3. „Jedes dieser Atome strahlt eine Lichtwelle ab,...“. Eine Lichtwelle ist also

nicht eine reine Sinuswelle, denn wenn sie von einem Atom kommt, muss sie einen Anfang und ein Ende haben. Sie scheint, nach einer Ansicht, die man auch bei vielen Studenten antrifft, ein individuell verfolgbares und identifizierbares Gebilde zu sein. Und hier spukt wohl das Photon herein, auch wenn es nicht ausgesprochen wird – allerdings in einer etwas vulgarisierten Form: Ein Gebilde, das irgendwie einen Wellenschwanz darstellt und, auch wenn es Teil eines Lichtstrahls ist, im Prinzip immer seine Individualität, d. h. seine Erkennbarkeit bewahrt. Auch die Abbildungen, an denen es nie fehlt, weisen darauf hin, dass diese Vorstellung herrscht.

4. Man findet oft Bilder, die die Wirkungsweise des Polarisationsfilters erklären. Darin wird das Licht vor dem Filter manchmal so dargestellt, wie es unsere Abb. 1 zeigt. Hier sieht man drei „Einzelwellen“. Diese haben in einigen Darstellungen, die wir gefunden haben, alle dieselbe Wellenlänge und sind in Phase. Wie lang sie sind, ist in den Abbildungen nicht zu erkennen. Wenn man nur den dargestellten Teil betrachtet, so ergibt die Addition der Teilwellen wieder nur eine linear polarisierte Welle. Die Vorstellung von einem maximal ungeordneten Feld vermittelt die Darstellung nicht.

Herkunft

Das Problem scheint verschiedene Ursachen zu haben.

1. Die Aussage, Licht sei eine Transversalwelle, die wir alle lernen, wird leicht so interpretiert, dass der elektrische Feldstärkevektor eine Schwingungsbewegung quer zur Laufrichtung der Welle ausführt.

2. Die Tendenz, die spektralen Komponenten nicht als etwas zu betrachten, was nur durch eine mathematische Zerlegung entsteht, sondern als eine Realität: Eine Welle besteht aus Wellenzügen, so wie ein Buch aus Papierblättern besteht.
3. Die etwas zu naiv verstandenen Photonen, die man sich als Bestandteile des Lichts vorstellt (und fast nie als Bestandteile von Radiowellen).
4. Die Scheu, Licht unter thermodynamischen Gesichtspunkten zu betrachten.

Entsorgung

Weißes, in jeder Hinsicht inkohärentes Licht ist allgegenwärtig. Man zögere nicht, die Feldstärkeverteilung auch von solchem Licht zu beschreiben und die verschiedenen Dimensionen oder Typen der Unordnung zu diskutieren.

Man lasse die Vermutungen, die man von der „wahren Natur des Lichts“ haben mag, lieber beiseite und halte sich an das, was man weiß, nämlich wie der Begriff der Polarisation des Lichts (einschließlich der Abwesenheit von Polarisation) mit Hilfe der Elektrodynamik beschrieben werden kann. Etwas Thermodynamik ist dabei nicht schädlich.

Man vermeide im Zusammenhang mit dem unpolarisierten Licht das Wort „schwingen“, denn schwingen wird immer als etwas Regelmäßiges verstanden. Der Feldstärkevektor wackelt aber chaotisch herum. ■

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Institut für Theoretische Festkörperphysik, KIT, 76128 Karlsruhe, E-Mail: f.herrmann@kit.edu