

Welchen Weg geht das Licht?

Friedrich Herrmann*, Holger Hauptmann*, Thilo Wünscher⁺

*Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe, ⁺IPN, 24098 Kiel

Kurzfassung

Es werden Bilder der Verteilung von Energie und Energiestrom in Lichtfeldern vorgestellt und diskutiert. Mit Hilfe von wenigen einfachen Regeln können solche Bilder skizziert und gedeutet werden. Als Alternative zu den Lichtstrahlen der geometrischen Optik kann man die Energiestromlinien als Weg des Lichts interpretieren.

1. Einleitung

Wir betrachten das Licht in dem Raum, in dem wir uns gerade aufhalten. Es kommt von Lichtquellen – von der Sonne, von einer Lampe oder von einem Fernsehbildschirm –, und es wird von irgendwelchen anderen Körpern absorbiert. Da Licht Energie trägt, ist mit dem Lichtstrom ein Energiestrom verknüpft. Auch die Energie fließt von den Lichtquellen zu den Absorbern. Sollte uns jemand nach dem Verlauf dieses Energiestroms fragen, so kämen wir aber wahrscheinlich in Verlegenheit.

Tatsächlich ist diese Frage aber kaum weniger nahe liegend als etwa die Frage nach dem Verlauf der Feldlinien in irgendeiner elektrostatischen Standardsituation. Während es uns im letzteren Fall leicht fällt, ein qualitativ richtiges Bild zu skizzieren, haben wir

selbst bei einfachen Anordnungen von Lichtquellen und Absorbern kaum ein Gefühl für den Verlauf der Energiestromlinien.

Man findet leicht Gründe für diesen Unterschied:

– Während wir eine Reihe von einfachen Regeln kennen, die uns helfen, elektrische Feldlinienbilder zu skizzieren, fehlen uns solche Regeln für die Energiestromlinien.

– Während man Bilder von elektrischen Feldern in jedem Physikbuch findet, wird man nach Energieflussbildern in Lichtverteilungen vergeblich suchen.

Im Folgenden soll Abhilfe in beiderlei Hinsicht geschaffen werden. In Abschnitt 2 werden Regeln formuliert und begründet, mit deren Hilfe man solche Bilder interpretieren und skizzieren kann. Man kann sich die

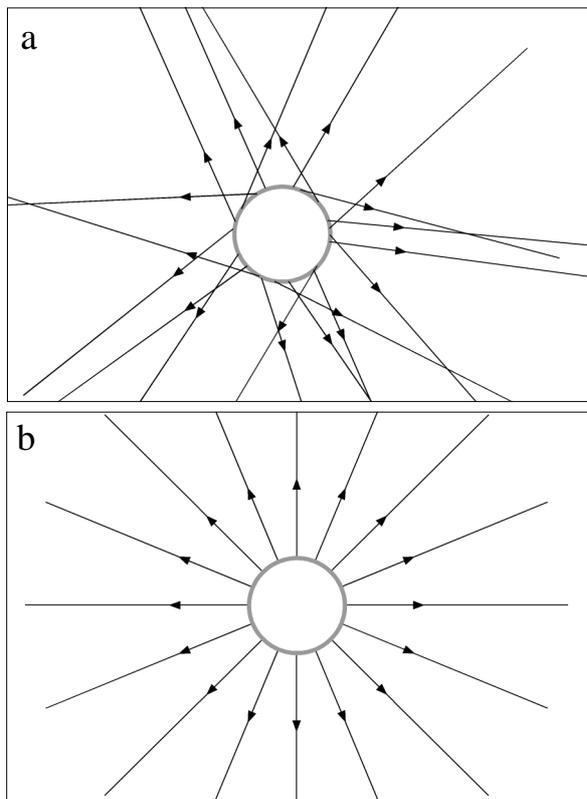


Abb. 1. Das Licht in der Umgebung der Sonne.
(a) Lichtstrahlen; (b) Energiestromlinien

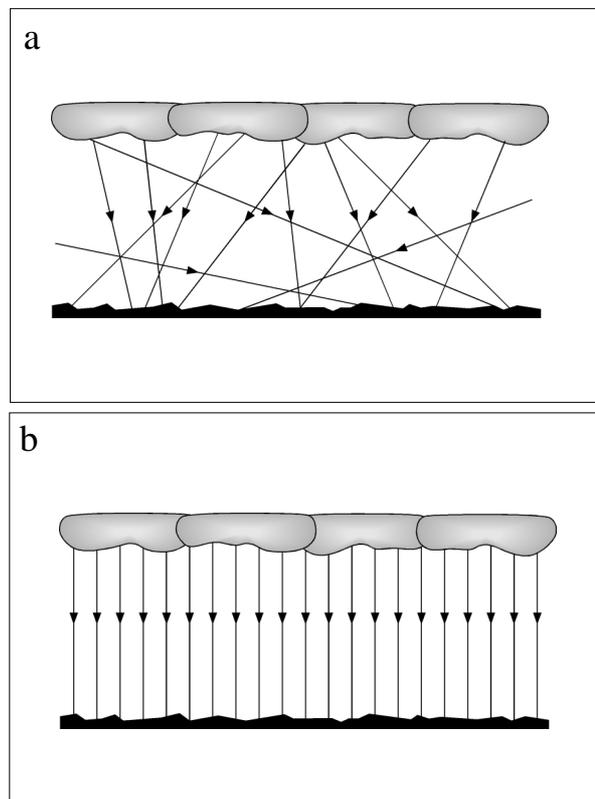


Abb. 2. Bewölkter Himmel.
(a) Lichtstrahlen; (b) Energiestromlinien

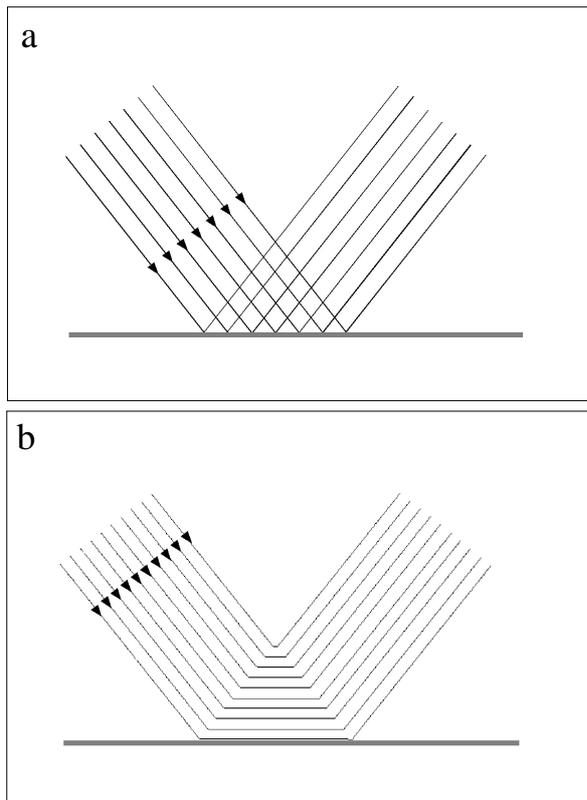


Abb. 3. Reflexion eines Lichtbündels an einem ebenen Spiegel. (a) Lichtstrahlen; (b) Energiestromlinien

Arbeit auch vom Computer abnehmen lassen. Ein entsprechendes Programm wird in Abschnitt 3 vorgestellt. In Abschnitt 4 werden Bilder von Energiestromverteilungen für einige Standardsituationen diskutiert.

Die Kenntnis der Energiestromverteilung ist wichtig für zahlreiche technische Anwendungen. Solche Anwendungen sind Gegenstand der *nichtabbildenden Optik* [1]. Die nichtabbildende Optik fragt nach dem Lichtstrom von einer Fläche A zu einer Fläche B in dem Fall, dass keine Punkt-zu-Punkt-Abbildung von A auf B gefordert wird. Der Grund für eine solche Frage kann sein, dass man das Licht von A auf eine möglichst kleine Fläche B *konzentrieren* möchte [2]. Man benutzt Konzentratoren, um zum Beispiel möglichst viel Sonnenlicht auf die Röhren eines Solarkollektors zu leiten. Ein anderes Problem, mit dem sich die nichtabbildende Optik beschäftigt, besteht darin, das Licht von einer Lichtquelle möglichst gleichmäßig auf eine zu beleuchtende Fläche zu bringen, so wie man es von jeder Lampe, und in besonderem Maß von einer Flutlichtanlage erwartet. Ob ein Konzentrador oder Lampenreflektor seine Aufgabe gut erfüllt, lässt sich am besten mit Hilfe eines Energieflussbildes beurteilen.

Obwohl solche Anwendungen interessant genug sind, sich mit dem Thema zu befassen, ist das wichtigste Ziel, das wir hier verfolgen, ein anderes: Die Beschäftigung mit dem Energiefluss in Lichtverteilungen

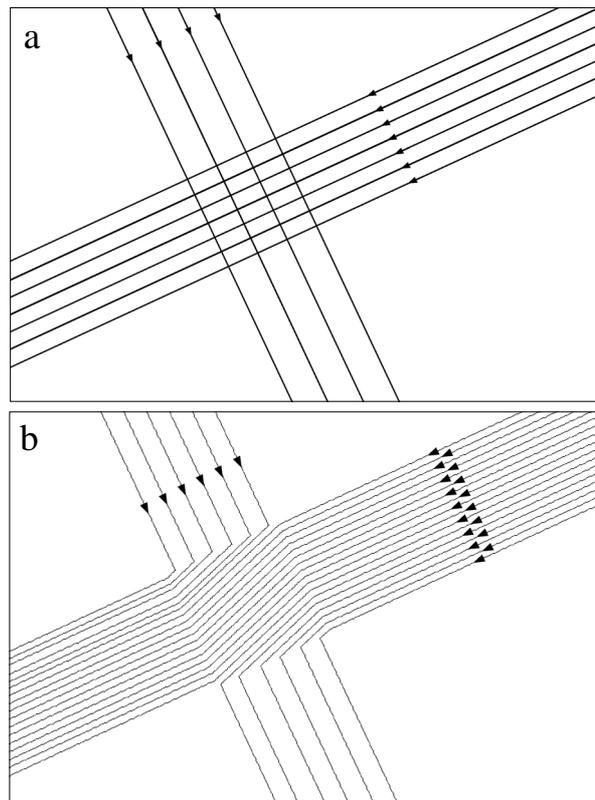


Abb. 4. Ein Lichtbündel "durchdringt" ein anderes. (a) Lichtstrahlen; (b) Energiestromlinien

kann uns Einsichten in die Natur des Lichts vermitteln. Die Beschreibung des Lichts mit Hilfe des Energiestromfeldes kann man als natürliche Ergänzung zu geometrischer Optik und Wellenoptik sehen. In Abschnitt 5 kommen wir daher auf die Frage des Titels zurück: Welchen Weg geht das Licht?

2. Regeln für das Zeichnen und Interpretieren von Energiestrombildern

Um die elektrischen Feldlinien einer elektrostatischen Anordnung zu skizzieren oder zu interpretieren, genügt die Kenntnis von wenigen einfachen Regeln. Zum Vergleich mit den "Energiestromregeln", die wir anschließend aufstellen wollen, sei hier an die wichtigsten dieser "Feldlinien-Regeln" erinnert:

1. Elektrische Feldlinien beginnen auf positiven und enden auf negativen Ladungen.
2. Feldlinien kreuzen sich nicht.
3. Ein Feldlinienbild hat dieselbe Symmetrie wie die Randbedingungen, d. h. wie das System der Quellen, elektrischen Leiter und Dielektrika.
4. Eine Feldlinie hat nur dort einen Knick, wo die Ladungsdichte oder die Dielektrizitätskonstante einen Sprung macht.
5. Feldlinien beginnen oder enden senkrecht auf der Oberfläche von elektrischen Leitern.

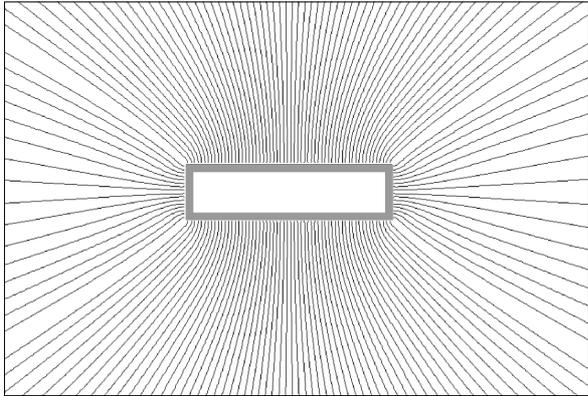


Abb. 5. Lichtquelle

Im folgenden formulieren und begründen wir Regeln, die für Energieflusslinien in Lichtfeldern gelten. Wir setzen dabei voraus, dass das Licht zeitlich inkohärent ist. Für kohärentes Licht würden einige der Regeln nicht mehr gelten [3].

1. *Energiestromlinien beginnen auf Lichtquellen und enden auf Absorbern.*

Diese Regel ist Ausdruck der Energieerhaltung und der Divergenzfreiheit der Strömung außerhalb von Quellen und Absorbern.

2. *Energiestromlinien kreuzen sich nicht.*

Eine solche Regel gilt für jedes Vektorfeld, denn die entsprechende Vektorgröße hat in jedem Punkt einen wohl definierten Wert.

3. *Jede Symmetrie der Objekte – Lichtquellen, Spiegel, Absorber usw. – hat die gleiche Symmetrie im Energiestromlinienbild zur Folge.*

Symmetrieargumente gehören in allen Bereichen der Physik zu den nützlichsten Werkzeugen.

4. *In unmittelbarer Nähe einer vollständig reflektierenden Oberfläche oder auch einer vollständig streuenden, also weißen Oberfläche verlaufen die Energiestromlinien parallel zu dieser Fläche.*

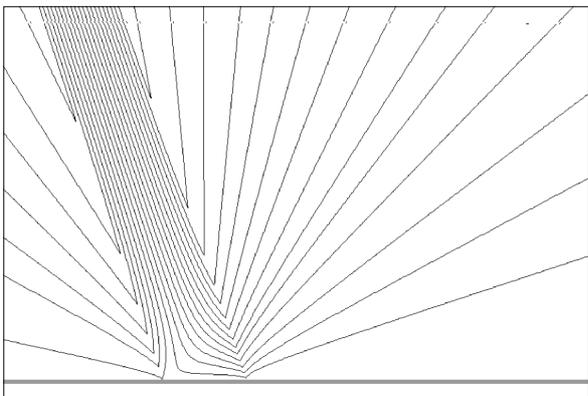


Abb. 6. Streuung eines Lichtbündels an einer weißen Oberfläche

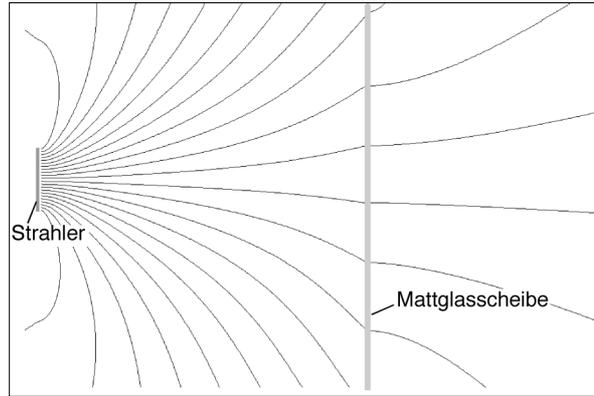


Abb. 7. Streuung des Lichts von einer flächigen Quelle an einer Mattglasscheibe

Die Regel gilt, weil keine Energie in die Fläche eintritt. Der Flussvektor darf keine Komponente haben, die orthogonal zur Oberfläche liegt.

5. *An der Oberfläche eines nicht konkaven Strahlers verlaufen die Energiestromlinien orthogonal zu dieser Fläche, solange keine anderen Körper zum Lichtfeld an dieser Stelle beitragen.*

Diese Regel ist eine Konsequenz der Symmetrieregeln. Nähert man einen Punkt P der Oberfläche des Strahlers, so trägt zur Energiestromdichte in P ein immer kleinerer Bereich der Oberfläche wesentlich bei. (Die entfernteren Bereiche spannen einen Raumwinkel auf, der immer kleiner wird, je näher P an die Oberfläche heranrückt.) Jeder hinreichend kleine Oberflächenbereich kann aber praktisch als eben betrachtet werden. Aus Symmetriegründen muss der Energiestromdichtektor senkrecht auf dieser "Ebene" stehen [4].

3. LightLab

Obwohl man die meisten der Abbildungen von Abschnitt 4 qualitativ mit Hilfe der in Abschnitt 2 vorgestellten Regeln hätte zeichnen können, wurden die Bilder mit Hilfe des Computerprogramms LightLab [5] erstellt. Der Umgang mit dem Programm ist einfach. Mit Hilfe eines Editors platziert man Objekte auf einer Zeichenebene: Lichtquellen, Spiegel, Streuer und Absorber, aber auch Objekte, die teilweise reflektieren, teilweise streuen oder teilweise absorbieren. Diese Objekte bilden die "Szenerie". Da dreidimensionale Darstellungen zu komplex wären, werden nur Fälle betrachtet, in denen die Stromlinien in einer Ebene verlaufen. Das heißt, wir nehmen entweder an, dass alle unsere Objekte senkrecht zur Zeichenebene unendlich ausgedehnt und translationssymmetrisch sind, oder wir stellen uns gleich vor, die Welt sei zweidimensional. LightLab kann sowohl die Energiedichte als auch die Energiestromdichte berechnen und graphisch darstellen [6].

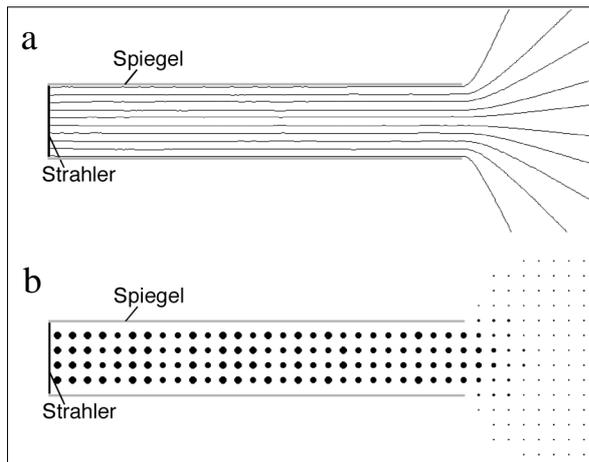


Abb. 8. Flächiger Strahler und “Rohr” mit reflektierenden Wänden. (a) Energiestromdichte; (b) Energiedichte

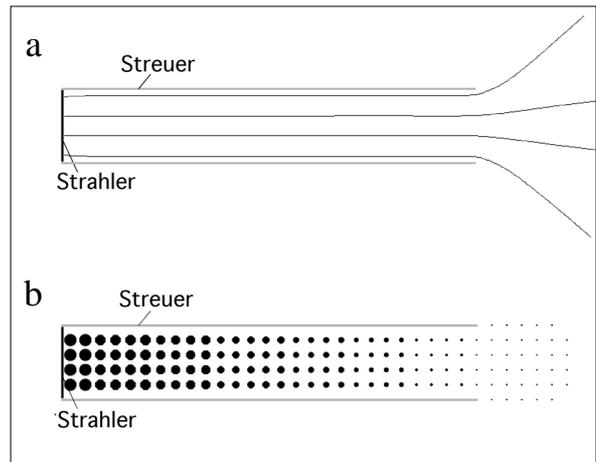


Abb. 9. Flächiger Strahler und “Rohr” mit weißen Wänden. (a) Energiestromdichte; (b) Energiedichte

4. Beispiele

Für alle Beispiele werden die Energiestromlinienbilder gezeigt, in einigen Fällen zum Vergleich auch die vertrauten Lichtstrahlenbilder. Wo es von Interesse ist, ist auch die Energiedichteverteilung dargestellt.

Sphärische Lichtquelle: Eine Realisierung ist die Sonne, eine andere eine Mattglaslampe. In unseren zweidimensionalen Bildern erscheint die Quelle als Kreis. Abb. 1a zeigt einige willkürlich gewählte Lichtstrahlen, Abb. 1b das Energiestromlinienbild. Es erinnert daran, wie Kinder die Sonne zeichnen.

Bewölkter Himmel: Wir stellen uns die Erdoberfläche als eben und absorbierend vor. In einer gewissen Höhe befindet sich eine gleichmäßige Wolkendecke, Abb. 2. Für den Physiker, der die geometrische und die Wellenoptik kennt, ist das eine unbeliebte Situation: vollständig diffuses Licht aus einem Halbraum, also das größte Chaos, das man sich vorstellen kann, Abb. 2a. Das Energiestrombild dagegen zeigt das Lieblingsfeld des Physikers: ein homogenes Feld. Man beachte, dass man dem Energiestrombild nicht die Winkelverteilung der Lichtstrahlen ansieht. Die Sonne im Zenith würde dasselbe Energieflussbild liefern wie die Wolken von Abb. 2.

Paralleles Lichtbündel, das auf einen ebenen Spiegel trifft: Abb. 3a zeigt das bekannte strahlenoptische Bild, Abb. 3b die Energiestromlinien. Außerhalb des dreieckigen Durchdringungsgebiets haben Lichtstrahlen und Energiestromlinien dieselbe Gestalt. Anders innerhalb dieses Gebiets. Wie nach Regel 4 zu erwarten ist, laufen die Stromlinien parallel zur Spiegeloberfläche.

Sich durchkreuzende Lichtbündel: Die Lichtbündel haben unterschiedliche Energiestromdichten. Abb. 4a zeigt den Verlauf der Lichtstrahlen. Das Energiestrombild, Abb. 4b, zeigt, dass im Durchdringungsgebiet Energie aus dem einen in das andere Bündel wechselt.

Konvexe Lichtquelle: Da ein Oberflächenelement der Lichtquelle nicht ein anderes Oberflächenelement “sieht”, ist Regel 5 anwendbar. Der Energiefluss tritt orthogonal zur Oberfläche aus der Lichtquelle aus. Das Bild erinnert an die Feldlinien eines elektrisch geladenen Leiters.

Licht, das auf eine weiße Fläche oder auf eine Mattglasscheibe trifft: In Abb. 6 trifft ein paralleles Lichtbündel auf eine isotrop streuende weiße Fläche. Das Licht in Abb. 7 kommt von einem flächigen Strahler und wird von der Mattglasscheibe sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung isotrop gestreut. Die Rückstreuung erkennt man am Zurückbiegen der Stromlinien links von der Mattglasscheibe. Besonders deutlich ist der Effekt für die beiden äußeren Linien.

Gerades Rohr mit reflektierenden oder weißen Wänden: Am linken Ende befindet sich eine Fläche, die in alle Richtungen des rechten Halbraums strahlt (ein lambertscher Strahler), die Wände sind ideale Spiegel, Abb. 8, bzw. ideal weiße Streuer, Abb. 9. In beiden Fällen ist das Stromlinienbild innerhalb des “Rohrs” (wegen der Zweidimensionalität bei uns der Zwi-

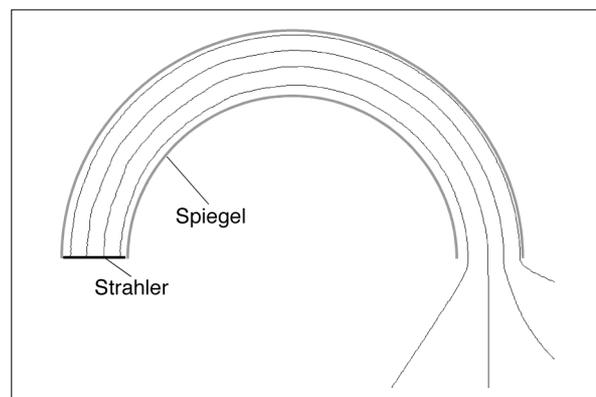
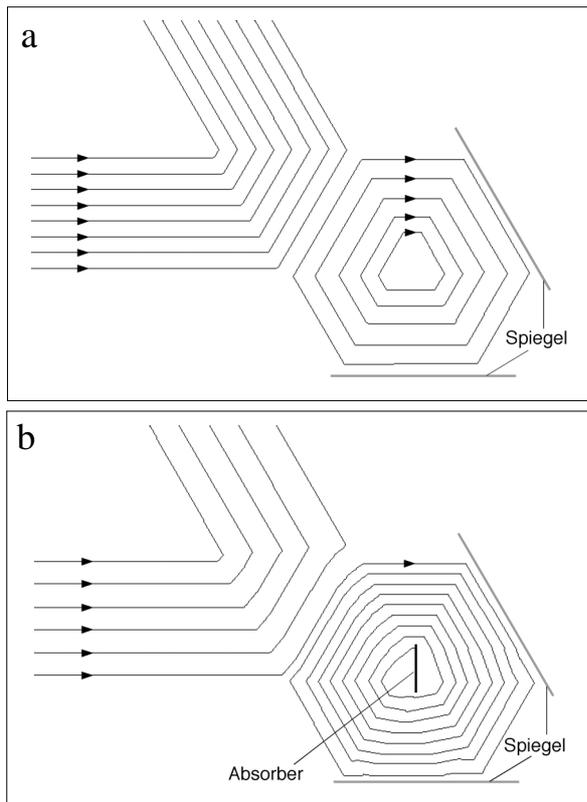


Abb. 10. Energiestromlinien in einem gebogenen “Rohr” mit reflektierenden Wänden



11. (a) Mit Hilfe von zwei Spiegeln kann man geschlossene Energiestromlinien erzeugen. (b) Der Energiefluss spiralt um das absorbierende Körperchen herum. Die Liniendichte gibt den Betrag der Energiestromdichte nicht richtig wieder.

schenraum zwischen zwei ebenen Wänden) das eines homogenen Feldes. Die Stromdichte ist geringer in dem Fall der streuenden Wände, obwohl die Strahler in beiden Fällen identisch sind.

Man erkennt den Grund für diesen Unterschied, wenn man die Energiedichtebilder miteinander vergleicht, Abbildungen 8b und 9b. Im Fall der spiegelnden Wände ist die Energiedichte innerhalb des Rohrs niedrig und konstant. Bei den weißen Wänden dagegen nimmt sie von hohen Werten links zur Rohröffnung auf der rechten Seite hin ab.

In der Sprache der geometrischen Optik wird im letzteren Fall ein Teil des Lichts zurückgestreut und durch die Quelle wieder absorbiert. (Ein Strahler ist auch immer ein Absorber.) Das zurück gestreute Licht trägt zur Energiedichte bei, kompensiert aber teilweise den Energiestrom. Wir wollen uns nun vorstellen, wir machen die Rohre immer länger und länger. Das Stromlinienbild im Fall der spiegelnden Wände würde sich nicht wesentlich ändern. Im Fall der weißen Wände wird aber das "Licht-Leck" nach rechts immer geringer. Aus einem hinreichend langen, perfekt streuenden Rohr kommt praktisch kein Licht mehr heraus. Das Rohr verhält sich wie ein Strömungswiderstand für Licht [7].

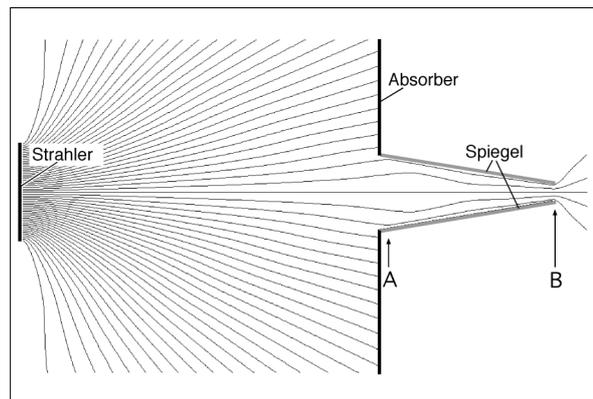


Abb. 12. Einfacher Lichtkonzentrator

Das Stromlinienbild für ein gekrümmtes Rohr mit reflektierenden Wänden, Abb. 10, ist nicht sehr verschieden von dem des entsprechenden geraden Rohrs.

Geschlossene und spiraltige Stromlinien: Abb. 11a zeigt eine Erscheinung, die von Poyntingvektorfeldern bekannt ist: geschlossene Energiestromlinien. Sie treten in vielen Situationen auf. Die Abbildung zeigt eine besonders einfache Realisierung. In Abb. 11b wurde die Szenerie leicht modifiziert. In die Mitte der geschlossenen Linien der Abb. 11a wurde ein kleiner Absorber gesetzt. Man sieht: Eine der Stromlinien spiralt jetzt nach innen zum Absorber. Macht man den Absorber hinreichend klein, so läuft die Stromlinie in einer beliebig eng gewickelten Spirale nach innen. Die Liniendichte gibt dann den Betrag des Stromdichtevektors nicht einmal näherungsweise richtig wieder, siehe auch den Aufsatz *Analogien in der Elektrodynamik mit FieldLab* [8], in dem ein entsprechendes Beispiel für elektrische Feldlinien behandelt wird.

Lichtkonzentrator: Abb. 12 zeigt eine einfache Version eines Lichtkonzentrators. Das Licht das durch die Öffnung A auf der linken Seite der Spiegel eintritt, wird zu Öffnung B kanalisiert. Das dreidimensionale Analogon ist ein konischer Konzentrador.

Sonnenschein und Zimmer mit Fenster und Spiegel: Abb. 13 zeigt eine kompliziertere Situation: Ein Zimmer mit einem Fenster und einem Spiegel, Fußboden und Wände absorbieren und streuen unterschiedlich, die Sonne steht 15° über dem Horizont, vom Himmel kommt diffuses Licht. Die Richtung der Sonne ist im Bild auf zwei Arten zu erkennen: 1. durch die Linie, die die Knicke der Stromlinien links von der Mauer außerhalb des Zimmers verbindet, 2. durch das Lichtbündel, das vom Fenster aus das Zimmer durchquert.

5. Welchen Weg geht das Licht?

Wir betrachten eine Situation, bei der Licht von einer Lichtquelle A erzeugt und von einem Körper B absorbiert wird. Der Vorgang sei stationär, d. h. nichts ändert sich im Verlauf der Zeit. Es besteht sicher kein Zweifel darüber, dass das Licht irgendwie von A nach

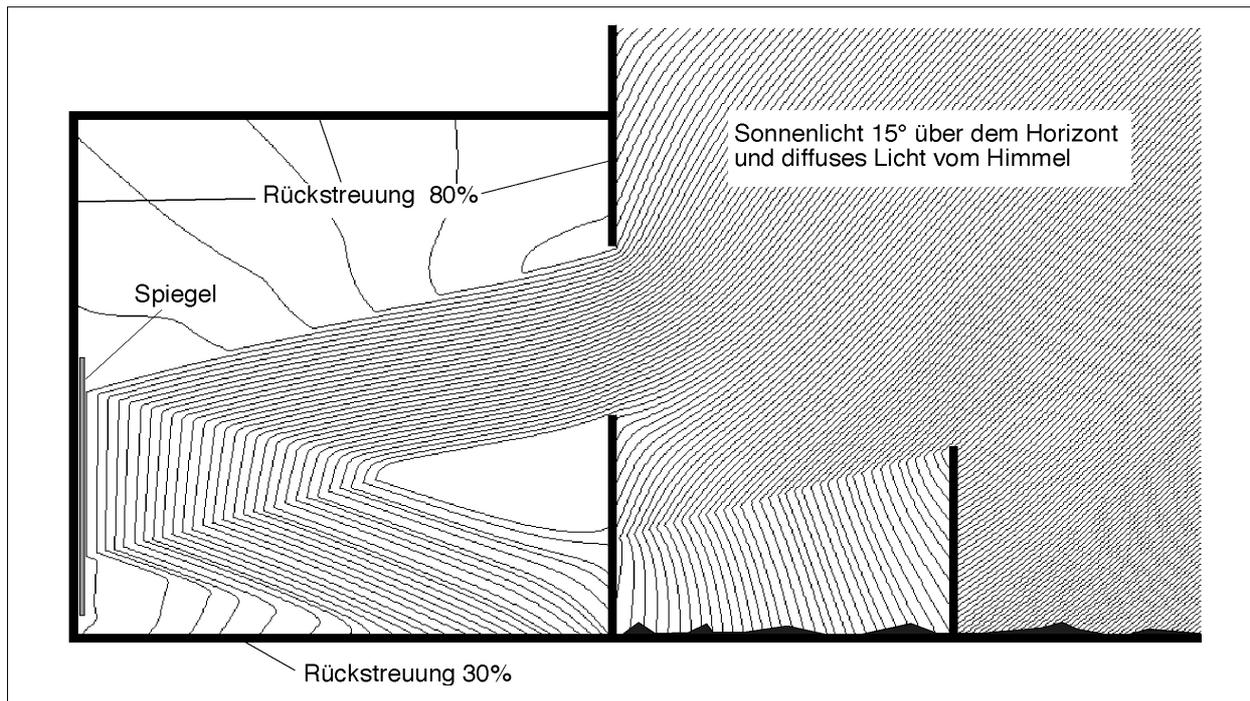


Abb. 13. Zimmer mit Fenster und Spiegel. Licht kommt von der Sonne, die 15° über dem Horizont steht, außerdem Streulicht vom restlichen Himmel.

B gelangt. Problematisch wird es allerdings wenn wir nach dem genauen Weg fragen, denn die Frage nach dem Weg von irgendetwas hat nur dann eine klare Bedeutung, wenn man dieses "Irgendetwas" in Raum und Zeit verfolgen kann, wenn es ein Individuum ist. Nun kann man zwar das Licht in Gedanken in jedem Augenblick in Portionen zerlegen, aber man kann nicht sagen, wo sich die Portionen im nächsten Augenblick befinden. Tatsächlich hat die Frage nach dem Weg des Lichts unterschiedliche Antworten, je nachdem, welches Beschreibungsverfahren, welche Theorie oder welches Modell man benutzt.

Fragen wir die geometrische Optik, so ist die Antwort klar: Den Weg des Lichts geben die Lichtstrahlen an. Wie ernst diese Deutung genommen wird, erkennt man an den bekannten Lehrsätzen: "Licht breitet sich geradlinig aus" oder "Lichtstrahlen durchdringen sich ungestört". Eine Verallgemeinerung dieser Auffassung stellt das Fermatsche Prinzip dar.

Weniger klar ist die Antwort, die die Welenoptik gibt. Vom Lichtweg ist hier meist gar nicht mehr die Rede, höchstens noch von der Bewegung von Wellenfronten. Als Lichtweg könnte man eine Linie betrachten, die überall orthogonal zu den Wellenfronten verläuft. Klare Wellenfronten gibt es bei ebenen Wellen und bei Kugelwellen. Es gibt sie nicht mehr, wenn solche Wellen miteinander interferieren. Gerade in den interessanten Situationen lässt sich also ein eindeutiger Lichtweg nicht angeben. Man kann sich so aus der Klemme helfen, dass man das Licht in Gedanken in Sinuswellen zerlegt. Dafür muss man aber bezahlen: Das Licht hat dann, wie schon in der geometrischen Optik, an einem festen Ort mehrere Bewegungsrichtun-

ungen. Noch höher ist der zu zahlende Preis, wenn man die Welle entsprechend dem Huygensschen Prinzip in Kugelwellen zerlegt. Dann kommt das Licht auf unendlich vielen verschiedenen Wegen von A nach B, und die Vorstellung vom Lichtweg wird im Grunde ad absurdum geführt.

Klar aber ebenfalls enttäuschend ist schließlich die Antwort der Quantenelektrodynamik. Sie sagt uns rundheraus, dass die Frage nach der Bahnkurve der Photonen keinen Sinn hat.

Dass die Antworten so unterschiedlich ausfallen, ist kein Wunder. Beim Licht gibt es das verfolgbare Individuum nicht. Der Weg ist daher nicht einfach eine Eigenschaft des Lichts, sondern des verwendeten Modells. Angesichts dieser Tatsache wollen wir ein weiteres Modell mit seinem Lichtweg betrachten. Wir nehmen als Repräsentanten des Lichts seine Energie und als Weg des Lichts die Stromlinien der Energie. Die Stromlinien einer mengenartigen Größe als Trajektorie zu interpretieren ist in der Physik gängige Praxis [9]. Wir schlagen also die folgende Interpretation vor: Die Energiedichteverteilung sagt uns, wo sich wie viel Licht befindet, und an der Energiestromverteilung erkennen wir, welchen Weg das Licht geht.

Diese Interpretation ist, genauso wie die der geometrischen Optik, weder falsch, noch richtig. Wir meinen auch keineswegs, dass man ihr im Unterricht ein besonders großes Gewicht geben sollte. Die Diskussion dieser Interpretationsmöglichkeit kann aber klar machen, dass manches von dem was wir sagen, um uns verständlich zu machen, hinzuerfunden ist.

6. Literatur

[1] *W. T. Welford and R. Winston: High Collection Nonimaging Optics, Academic Press, New York 1989*

[2] Der Maximalwert des Konzentrationsfaktors $c = A/B$ ist durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik bedingt. Der Konzentrador verformt den Phasenraumbereich, den das Licht einnimmt. Das durch die Fläche A eintretende Licht hat eine große Ausdehnung im Ortsraum und im Allgemeinen eine kleine Winkelausdehnung, d. h. das Volumen im Impulsraum ist klein. (Falls die Winkelausdehnung maximal, d. h. der Raumwinkel, aus dem das Licht kommt, 2π ist, lässt es sich nicht mehr konzentrieren.) Das durch B austretende Licht nimmt ein kleineres Ortsraumvolumen, dafür aber ein größeres Impulsraumvolumen ein. Das "Tauschgeschäft" zwischen Orts- und Impulsraum ist Ausdruck der Reversibilität des Vorgangs. Beim Durchgang durch den Konzentrador wird keine Entropie erzeugt.

[3] Unsere Energiestromdichten sind die zeitlichen Mittelwerte des Poyntingvektors. Bei kohärentem Licht treten Quellen und Senken auf, die sich ständig füllen und leeren. Regel 1 gilt also nicht mehr. Außerdem kann die Symmetrie der Stromverteilung geringer sein als die der "Objekte", da man die Phase als weitere Randbedingung betrachten müsste. Auch Regel 3 gilt also nicht mehr.

[4] Wir haben hier eine etwas intuitive Begründung gegeben. Für eine strenge Formulierung braucht man die Größe *Strahldichte*, d. h. die Energiestromdichte pro Raumwinkel. Die Strahldichte ist eine Größe, die im Wesentlichen das beschreibt, was wir mit den Augen als Helligkeit wahrnehmen. Sie ist eine Funktion von Ort und Richtung. Regel 5 gilt für solche Strahler, für die die Strahldichte an der Oberfläche als Funktion des Winkels symmetrisch zur Flächennormale ist. Das ist für die meisten praktischen Strahler der Fall. Sie gilt damit insbesondere für "lambertsche Strahler", bei denen die Strahldichte unabhängig vom Winkel ist.

[5] LightLab 2.0 kann von www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de kostenlos heruntergeladen werden.

[6] Sowohl die Energiestromdichte als auch die Energiedichte an einem beliebigen Punkt im Raum setzen sich linear zusammen aus den Beiträgen, die die Objekte (Strahler, Spiegel...) liefern. Um diese Beiträge zu berechnen, werden die Oberflächen der Objekte in kleine Flächenstücke zerlegt (diskretisiert). Handelt es sich bei einem kleinen Flächenstück um einen Strahler, so kann der Beitrag, den dieses Flächenstück zu Energiedichte und Energiestromdichte liefert, direkt berechnet werden. Der Beitrag eines reflektierenden oder streuenden Flächenstücks hängt jedoch davon ab, wie es von den anderen Objekten beleuchtet wird. Um ihn zu berechnen, wird der Raumwinkel über einem solchen Flächenstück in kleine Winkelelemente zerlegt. Abhängig von der Strahlung, die von anderen Objekten auf dieses Flächenstück fällt, berechnet LightLab nun die Ausstrahlung dieses Flächenstücks in die jeweiligen Raumwinkelbereiche. Damit lassen sich auch Energiestromdichte- und Energiedichtebeitrag des reflektierenden oder streuenden Flächenstücks berechnen. Da sich dadurch die Voraussetzungen für die bereits berechneten reflektierenden oder streuenden Flächenstücke ändern, wird dieses Verfahren iterativ so oft durchgeführt, bis die Ergebnisse stabil werden. Die Beiträge zur Energiestromdichte werden vektoriell addiert, die zur Energiedichte skalar.

[7] Die Lichtströmung ist der einer isothermen Gasströmung ähnlich. Die Temperatur des Lichts ist konstant, Druck und chemisches Potenzial nehmen nach rechts hin ab.

[8] *H. Hauptmann, F. Herrmann, M. Suleder: Analogien in der Elektrodynamik mit FieldLab, PdN-Ph 4/49 (2000), S. 39*

[9] So interpretieren wir das Stromdichtefeld der elektrischen Ladung als Ausdruck einer Strömungsbewegung, und zwar unabhängig von der Bewegung der Ladungsträgerteilchen – auch wenn man gelegentlich versucht, das Bild durch die Bewegung der Ladungsträger zu rechtfertigen. Eine solche Rechtfertigung ist nicht nur nicht nötig, sondern im Grunde auch kontraproduktiv, denn in einem Stromkreis, in dem die Ladungsträgersorte wechselt, ergäbe sich ein verwirrendes Bild.