

Die Kohärenz

Gegenstand:

Der Kohärenzbegriff wird in Lehrbüchern auf verschiedene Arten erklärt und kommentiert. Die folgenden Zitate entstammen verschiedenen Büchern.

- (1) "Miteinander interferierende Wellenzüge werden als kohärent bezeichnet, nicht miteinander interferierende als inkohärent."
- (2) "Zwei Erreger, die ein gleich bleibendes Interferenzmuster erzeugen, heißen kohärent. Dazu müssen sie mit gleicher Frequenz und fester Phasendifferenz schwingen."
- (3) "Bei einer ausgedehnten Lichtquelle, etwa einem leuchtenden Glühlampenfaden, sind die Wellenzüge, die von zwei verschiedenen Stellen des Fadens in einem Augenblick aufs Auge treffen, inkohärent, d. h. sie haben ganz verschiedene Phasen und Polarisationsrichtungen."
- (4) "Nur Licht, das von einem Punkt einer Lichtquelle ausgegangen ist, kann zur Interferenz gebracht werden, nachdem es geteilt ist und verschiedene Wege durchlaufen hat."
- (5) "Da das spontan emittierte Licht eines heißen Körpers von einzelnen, voneinander unabhängigen Atomen ausgestrahlt wird, ist es ausgeschlossen, dass zwei verschiedene Lichtquellen zufällig die gleiche Schwingung ausführen, also kohärente Wellenzüge ausstrahlen."
- (6) "Ein Spalt sendet kohärentes Licht aus, solange für seine Breite d und für den Öffnungswinkel 2α seines Lichtkegels gilt $d \cdot \sin \alpha < \lambda/2$."

Mängel:

Mit dem Kohärenzbegriff haben nicht nur Schüler, sondern auch Studenten ihre Probleme. Die oben zitierten Erklärungen zeigen, dass das kein Wunder ist. Einige dieser Aussagen geben für sich schon Rätsel auf. Besonders schwierig wird es aber, wenn man versucht, die verschiedenen Erklärungen unter einen Hut zu bringen. Im Folgenden entsprechen die Nummern in Klammern den Nummern der Zitate.

Worauf bezieht sich eine Aussage über Kohärenz? Den Sätzen (1), (3) und (5) zufolge auf eine Beziehung zwischen zwei "Wellenzügen". Was soll man aber unter einem Wellenzug verstehen? Die ganze Welle? Einen räumlichen Ausschnitt einer Welle? Welchen Ausschnitt? Nach Satz (2) drückt die Kohärenz eine Beziehung zwischen zwei "Erregern" aus. Die Erreger müssen mit gleicher Frequenz und fester Phasendifferenz schwingen, heißt es. Demnach sollte es Erreger geben, die zwar mit gleicher Frequenz, aber doch mit sich ändernder Phasendifferenz schwingen? Wie sieht eine solche Schwingung aus? Satz (6) schließlich ordnet die Kohärenz einfach dem "Licht" zu.

Handelt es sich hier nur um unterschiedliche Formulierungen ein und derselben Tatsache oder widersprechen sich vielleicht einige der Sätze (1) bis (6)?

Satz (3) behauptet, nur Licht, das von ein und derselben Stelle kommt, sei kohärent. Satz (4) macht, auch wenn das Wort Kohärenz nicht vorkommt, eine ähnliche Aussage. Was sind aber zwei verschiedene Stellen? Wie weit dürfen die Stellen maximal voneinander entfernt sein? Satz (5) sagt es noch deutlicher: Licht, das von verschiedenen Atomen kommt, könne nicht kohärent sein. Nun benutzt man aber das Licht, das von einem Stern kommt, zur Messung des Sterndurchmessers mit Hilfe des michelsonschen Sterninterferometers. Dabei bringt man Licht zur Interferenz, das von Orten des Sterns kommt, die Millionen von Kilometern voneinander entfernt sind.

Herkunft:

Alle Sätze (1) bis (6) machen Aussagen entweder darüber, wie man kohärentes Licht erzeugt oder wie man die Kohärenz nachweist. Keiner sagt, wie ein kohärentes oder inkohärentes Wellenfeld selbst beschaffen ist. Wenn man nur etwas über die Quellen sagt, wie soll man dann die Kohärenz eines Wellenfeldes beurteilen, dessen Quellen man nicht kennt, z. B. die der Wasserwellen auf dem Meer?

Wir sehen hier die Tendenz, statt ein Phänomen zu beschreiben, den Herstellungsprozess oder den Nachweisprozess in den Vordergrund zu stellen. Diese Prozesse sind aber komplizierter als das Phänomen selbst. Um ein Fahrrad zu verstehen, braucht man nicht den Herstellungsprozess in der Fabrik zu kennen. Um zu verstehen, was eine Schallwelle ist, muss man nicht die Funktionsweise der Orgelpfeife oder des menschlichen Gehörs kennen. Um sich eine Anschauung vom elektrischen Feld zu bilden, braucht man nicht die Kraft auf die Probeladung zu kennen.

Eine andere Ursache der Unstimmigkeiten ist wohl die Tendenz, ein Phänomen erst dann als erklärt zu betrachten, wenn es auf eine Aussage aus dem Bereich der Atomistik zurückgeführt ist. Nun ist aber die Kohärenz eine Erscheinung, die man erschöpfend mit den Mitteln der klassischen Wellentheorie beschreiben kann. Sobald man eine Deutung aus dem Bereich der Quantenphänomene sucht, riskiert man, sich im Gestrüpp der Interpretationen und Modelle zu verlieren.

Entsorgung:

Zunächst zwei allgemeine Bemerkungen zum Kohärenzbegriff:

1. Mehr oder weniger ausgeprägte Kohärenz ist eine Eigenschaft des Lichts. Selbstverständlich verdankt das Licht seine Eigenschaften einer Lichtquelle. Das bedeutet aber nicht, dass die Kohärenz eine Eigenschaft der Quelle ist.
2. Kohärenz ist eine lokale Eigenschaft des Lichts. Das bedeutet, dass eine gegebene Lichtverteilung an einer Stelle kohärenter sein kann und im Allgemeinen auch ist, als an einer anderen. So ist das Licht, das ein Stern emittiert, unmittelbar über der Sternoberfläche räumlich maximal inkohärent, während es hier auf der Erde, also in einer großen Entfernung vom Stern, fast perfekt räumlich kohärent ist. Wenn wir sagen, Kohärenz sei eine lokale Eigenschaft des Lichts, so meinen wir nicht, dass die Kohärenz einem Punkt im mathematischen Sinn zukommt. (In diesem Sinne ist keine physikalische Größe lokal.)

Man kann die Kohärenz auf verschiedene Arten erklären. Sie manifestiert sich in jeder der Theorien, mit denen wir das Licht zu beschreiben pflegen, und das sind im Wesentlichen die geometrische Optik, die klassische Wellenoptik, die Thermodynamik und die Quantenelektrodynamik. Da es hier darum geht, den Begriff Anfängern zu erklären, wählen wir die einfachste dieser Theorien: die geometrische Optik. Anschließend wird noch angedeutet, wie sich die Erklärung in die Wellenoptik übersetzt. Von einer atomistischen oder quantenmechanischen Erklärung raten wir ab. Das ist ein Thema für die Quantenoptik-Vorlesung der Universität. Wir beschränken uns hier auch darauf, die Kohärenz qualitativ zu beurteilen, wir definieren also kein Kohärenzmaß.

Wir wollen das Licht in einem kleinen Raumbereich, direkt vor uns, beschreiben. Was für Lichtstrahlen durchkreuzen diesen Raumbereich? Wir betrachten vier besonders einfache Situationen.

Wir befinden uns im dichten Nebel. Unser Bereich wird von Lichtstrahlen aller Richtungen durchquert. Wir haben ein Lichtgemisch, das Licht aller Spektralfarben enthält, in Abb. 1 angedeutet durch verschiedene Strichelungen der Lichtstrahlen. Als nächstes stellen wir uns vor, es sei Nacht, wieder herrsche dichter Nebel, und wir befinden uns unter einer Straßenlaterne, die spektral reines Licht emittiert. Wieder kommt das Licht aus den verschiedensten Richtungen, Abb. 2. Eine dritte Situation: Es sei Nacht, kein Nebel, kein Mondschein und keine Sterne. In sehr großer horizontaler Entfernung befindet sich eine Glühlampe. Alle Strahlen in unserem Raumbereich haben dieselbe Richtung, aber es ist Licht der verschiedensten Spektralfarben, Abb. 3. Schließlich dieselbe Situation wie eben, nur soll diesmal die Lampe spektral reines Licht aussenden, Abb. 4. Alle Strahlen haben jetzt dieselbe Richtung, und das ganze Licht hat dieselbe reine Spektralfarbe.

Das Licht von Abb. 1 ist völlig inkohärent. Das Licht von Abb. 2 nennt man zeitlich kohärent. "Zeitlich kohärent" ist also dasselbe wie "spektral rein". Das Licht von Abb. 3 heißt räumlich kohärent. "Räumlich kohärent" ist also das Gegenteil von "diffus". Das Licht von Abb. 4 schließlich ist zeitlich und räumlich kohärent.

Hier noch ein Gleichnis, das man den Schülern erzählen kann: Wir betrachten eine große Kiste mit vielen verschiedenen Äpfeln. Die Äpfel unterscheiden sich in zwei Eigenschaften: in der Größe und in der Farbe. Wir wollen die Äpfel sortieren. Wir beginnen damit, sie der Größe nach in 10 verschiedene Kartons einzuordnen,

in jeden ein anderes Größenintervall. Die Äpfel sind jetzt, was das eine der beiden Ordnungskriterien betrifft, in jedem der Kartons einheitlich. Als nächstes ordnen wir die Äpfel jedes Kartons nach der Farbe, indem wir sie wieder auf je 10 verschiedene, kleinere Kartons aufteilen. Insgesamt haben wir nun 100 Kartons, und in jedem befinden sich Äpfel, die nach beiden Ordnungskriterien – Größe und Farbe – einheitlich sind.

Die Übereinstimmung zwischen Äpfeln und Licht geht noch weiter. So sieht man, dass man sich aus dem gemischten Apfelhaufen nur dadurch geordnete Apfelmengen beschaffen kann, dass man alle Äpfel, die nicht passen, aussortiert. Man kann ein Apfelmisch nicht in eine reine Apfelmenge verwandeln, genauso wie man inkohärentes Licht nicht in kohärentes verwandeln kann. Das wäre mit Entropievernichtung verbunden und würde dem zweiten Hauptsatz widersprechen. Man kann aber Apfelbäume züchten, die von vornherein nur eine Apfelsorte produzieren. Das Entsprechende geht beim Licht. Es gibt Lichtquellen, die von vornherein nur kohärentes Licht erzeugen, nämlich die Laser.

Die wellenoptische Erklärung sei hier nur angedeutet: Licht ist zeitlich kohärent, wenn die Streuung des Betrages der k -Vektoren des Lichts gering ist, es ist räumlich kohärent, wenn deren Richtungsstreuung gering ist.

Man sieht einem graphisch dargestellten Wellenfeld die Kohärenz auch direkt an. Ein ausgedehntes Wellenfeld, sagen wir von Wasserwellen auf einem See, lässt Bereiche erkennen, die aussehen wie Ausschnitte aus einer ebenen harmonischen Welle. Diese haben eine gewisse Länge und eine gewisse Breite. Die Länge ist ein Maß für die zeitliche, die Breite für die räumliche Kohärenz.

F. H.

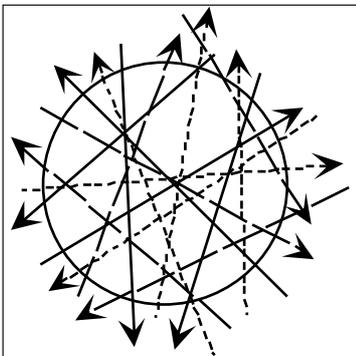


Abb. 1. Alle Farben, alle Richtungen. Das Licht ist zeitlich und räumlich inkohärent.

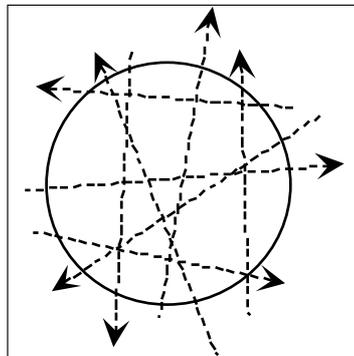


Abb. 2. Eine einzige Farbe, alle Richtungen. Das Licht ist zeitlich kohärent.

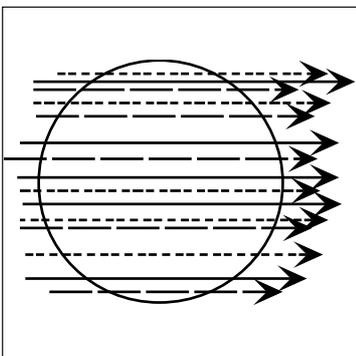


Abb. 3. Eine einzige Richtung, alle Farben. Das Licht ist räumlich kohärent.

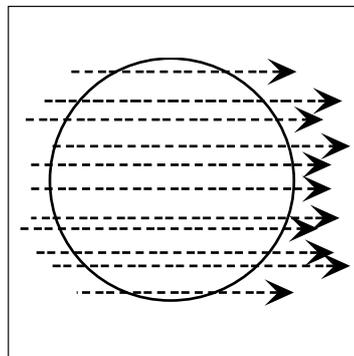


Abb. 4. Eine einzige Farbe, eine einzige Richtung. Das Licht ist zeitlich und räumlich kohärent.