

**Kohärent oder nicht-kohärent? Ist das hier die Frage?**  
- Über das Naturphänomen zu einem erweiterten Kohärenzbegriff -

Adel Moussa

Institut für Didaktik der Physik  
Westfälische Wilhelms-Universität  
Wilhelm-Klemm-Str. 10  
D-48149 Münster  
a\_mous01@uni-muenster.de

**Kurzfassung**

Der Begriff der „Kohärenz“ zählt zweifelsohne zu den am wenigsten verstandenen Konzepten der Wellenoptik. Als Eigenschaft bestimmter Lichtquellen missverstanden er scheint sie Schülern/innen wie Studenten/innen als binäre Größe, die Auskunft darüber gibt, ob Interferenz stattfindet, oder nicht. Am Beispiel alltäglicher Specklephänomene wird aufgezeigt, dass ein derart verkürztes Verständnis des Kohärenzbegriffes auch abseits aufwendiger Laborexperimente an seine Grenzen stößt und die Vermittlung eines differenzierteren Kohärenzbegriffes keinesfalls außerhalb der Reichweite von Schul- oder gar Hochschulphysik liegt.

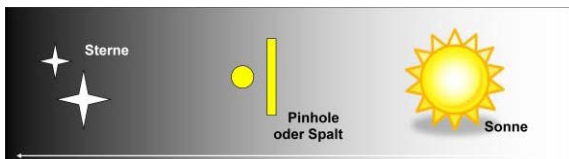
**1. Einführung**

„Kohärent oder nicht-kohärent?“ So einfach diese an den berühmten Ausspruch Hamlets in gleichnamigen Shakespeare Klassiker angelehnte Frage auf den ersten Blick auch zu beantworten zu sein scheint, birgt sie doch in sich eines der klassischen Missverständnisse der Wellenoptik: ein binäres, zu meist gegenstandsbezogenes Verständnis von Kohärenz.

Nicht-kohärente Lichtquellen	Kohärente Lichtquellen
Glühlampen, Leuchtstoffröhren, Feuerquellen, Energiesparlampen, usw.	Laser

**Tabelle 1:** Charakteristisch für einen binären, objektbezogenen Kohärenzbegriff ist die Unterteilung von Lichtquellen in „kohärente“ und „nicht-kohärente“ Lichtquellen

Dass die Kohärenz von jeher geradezu das Stiefkind der Wellenoptik gewesen ist, belegt auch folgende kurze Anekdote aus einem autobiografischen Artikel Emil Wolfs: Von seinem Mentor Max Born darauf angesprochen, wann er gedenke mit seinem Beitrag zum gemeinsamen Lehrbuch „Principles of Optics“ endlich fertig zu werden, entgegnete Wolf, er müsse nur noch das Kapitel zur Kohärenz fertigstellen. Der Physiknobelpreisträger Born reagierte auf diesen seiner Meinung nach irrelevanten Einwand mit den Worten: „Wolf, who apart from you is interested in coherence? Leave the chapter out and send the manuscript to the printers.“ [1]



**Abb.1:** Der erweiterte, qualitative Kohärenzbegriff ordnet Lichtquellen bereits von „sehr kohärent“ (links) nach „wenig kohärent“ (rechts)

An dieser Einstellung der Kohärenz gegenüber hat sich, zu mindest was die Lehre betrifft, bis heute wenig geändert. So weist Friedrich Herrmann im Jahr 2002 in einem Beitrag, der in einer bezeichnender Weise mit „Altlasten der Physik“ titulierten Reihe in *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* erschienen ist [2], darauf hin, dass die Kohärenz ungeachtet ihrer zentralen Stellung innerhalb der Begriffsstruktur der Wellenoptik im Rahmen der Schul-, aber auch der Hochschulphysik, kaum als expliziter Lerninhalt in Erscheinung tritt. Dort, wo sie das tut, geschieht es in aller Regel im Zusammenhang mit der Einführung der Interferenz, für deren Auftreten das Vorhandensein einer „kohärenten Lichtquelle“ als explizite Voraussetzung genannt wird. Ohne es zu beabsichtigen trägt die Lehre auf diese Weise zu eben jenem binären (kohärent oder nicht-kohärent) Verständnis von Kohärenz bei, das auch der im Titel dieses Beitrags gestellten hamlet'schen Frage nach dem „kohärent oder nicht-kohärent“ sein innewohnt.

**2. Kohärenz heißt Korrelation**

Im Vergleich zum von Hamlet im Nachsinnen über Leben und Tod ausgesprochenen „Sein oder Nichtsein?“, ist die Frage „Kohärent oder nicht kohärent?“ allerdings nicht nur von weit weniger existenzieller Bedeutung, sie ist, physikalisch gesehen, schlichtweg unzulässig, ja falsch; zumal sie nach einer skalaren Größe, der Kohärenz, fragend nur eine binäre Antwort zulässt. Angebracht hingegen wäre die sicherlich weit weniger poetisch anmutende Frage nach dem „Grad der Kohärenz“, einem skalaren Wert, also, der im Wertebereich  $0 < C < 1$  liegende eine Aussage macht über die räumliche und zeitliche Korrelation der von der Quelle in einem Zeitraum  $T$  emittierten und im Raumgebiet  $R$  beobachteten elektromagnetischen Wellen  $A(\mathbf{r}, t)$ .

$$C(\mathbf{r}_0, \tau) = \langle A(\mathbf{r}, t)A(\mathbf{r}, t)^* \cdot A(\mathbf{r} + \mathbf{r}_0, t + \tau) \cdot A(\mathbf{r} + \mathbf{r}_0, t + \tau)^* \rangle_{\tau, t} \{1\}$$

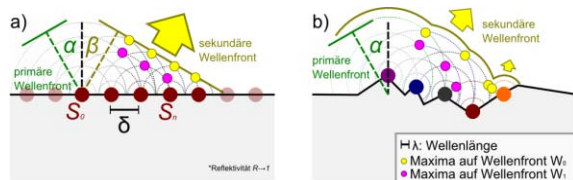
Kohärenz, das drückt Gleichung {1} in der für die Physik so charakteristischen geometrisch-mathematischen Symbolsprache aus, *Kohärenz bedeutet Korrelation*.

Damit ist zugleich ein weiteres weitverbreitetes Missverständnis aus dem Weg geräumt. Zumal die Feststellung, dass es sich bei der Kohärenz um ein Korrelationsmaß handelt, ihre Deutung als grundlegende, räumlich und zeitlich unabänderliche Eigenschaft einer Lichtquelle und/oder der Gesamtheit des von selbiger abgestrahlten Lichtes ausschließt.

### 3. Specklephänomene im Alltag als Zugang zu einem (halb-)quantitativen Kohärenzbegriff

Gerade im Hinblick auf die Schulphysik, der im Allgemeinen die entsprechenden mathematischen Formalismen fehlen und von der zu recht gefordert wird, dass sie sich stärker an für die Lebenswelt der Schüler relevanten Phänomenen orientieren müssen [3], könnte man nun argumentieren, dass ein derart differenziertes quantitatives Verständnis von Kohärenz für das Verstehen alltäglicher optischer Phänomene keinerlei Rolle spielt.

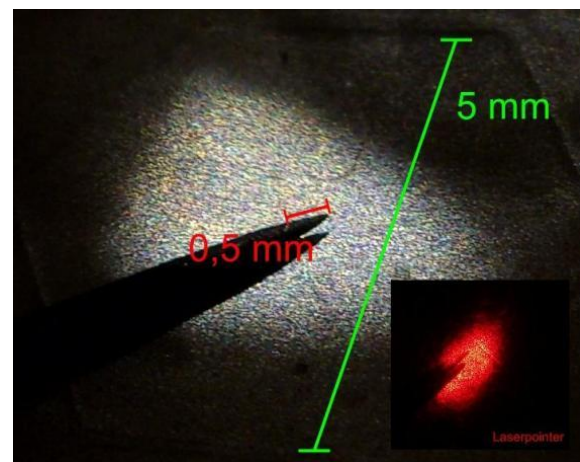
Tatsächlich aber lassen sich viele der im Physikunterricht besprochenen Interferenzphänomene ohne einen zu mindest halbquantitativ ausdifferenzierten Kohärenzbegriff kaum oder nur in unzureichender Weise erklären. Warum et was sprechen wir im Zusammenhang mit Quetelet'schen Ringen und ähnlichen alltäglichen Interferenzphänomenen vom „hinreichend“ oder „in guter Näherung“ kohärenten Sonnenlicht, scheitern dann aber bei dem Versuch mit eben diesem „kohärenten Licht“ den wohl grundlegendsten aller Interferenzversuche, den Young'schen Doppelspaltversuch, durchzuführen? Warum brauchen wir hier einen „Beleuchtungsspalt“ und wieso wirkt sich dessen Breite in so charakteristischer Weise auf die Qualität des Beugungsbildes aus? Ein binärer Kohärenzbegriff, wie er weiter oben diskutiert wurde, lässt die Beantwortung dieser und ähnliche Fragen nicht zu und steht damit der im Physikunterricht zu leistenden Vermittlung lebensweltrelevanter Orientierungswissens im Weg [4].



**Abb.2:** Speckle entstehen in Folge der Streuung an einer optisch rauen Oberfläche bedingten Phasendifferenzen zwischen den von der Oberfläche kommenden Elementarwellen

Auch im Fall der anlässlich der DPG Tagung 2009 bereits vorgestellten Specklephänomene [5], jene bunten Lichtgranulationen, an denen wir im Alltag – obschon sie auf den sonnenbeschienenen optisch rauen Metall- und Kunststoffoberflächen unserer Lebenswelt allgegenwärtig zu sein scheinen – Tag für

Tag achtlos vorbeigehen, wirft die vermeintlich vereinfachende Annahme, das uns von der in etwa 150 Mio. km zur Erde befindlichen Sonne erreichende Licht sei „kohärent“ mehr Fragen auf, als sie zu beantworten in der Lage wäre. Insbesondere die 2009 unter physiologischen Gesichtspunkten behandelte Frage der „Specklesichtbarkeit“ lässt sich ohne Überlegungen zum Kohärenzgrad des Sonnenlichts und dessen unmittelbaren Auswirkung auf die Fähigkeit des von den Objektoberflächen in Richtung unseres Auges gestreuten Lichtes, kontrastreiche Interferenzmuster auszubilden, kaum abschließend beantworten.

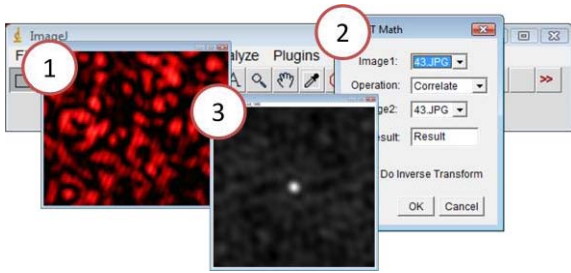


**Abb.3:** Speckle auf einer Alufolie im teilweise durch eine Blende beschränkten Licht einer 12V Halogenlampe (groß); gleiche Aufnahme mit Laserlicht (klein)

Wie etwa lässt sich erklären, dass selbst eine kleine Wolke ausreicht, um die zuvor noch klar sichtbaren Lichtpunkte vor unseren Augen verschwinden zu lassen? Oder was hat es mit der herausragenden Kontrastschärfe von Speckle auf sich, die sich von Zeit zu Zeit in den von Martin Wagenschein als „Sonnentalern“ [6] bezeichneten kreisförmigen Lichtflecken beobachten lassen?

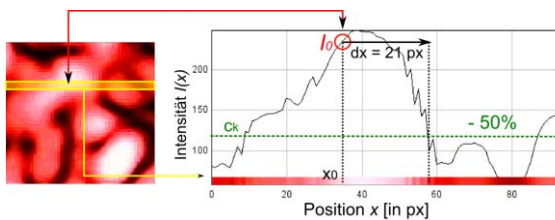
### 4. Von der Autokorrelation der Intensitäten zur Kohärenz des Wellenfeldes

Im Bezug auf die Motivation des zur Klärung dieser Fragen notwendige quantitative Verständnis von Kohärenz erweist sich ein bereits im Rahmen der anlässlich der DPG Tagung in Bochum vorgestellten Untersuchungen zur „Specklegröße“ im menschlichen Auge verwendetes Hilfsinstrument, als didaktisch ungemein wertvoll: die softwarebasierte Autokorrelation von Bilddaten. Was von der frei erhältlichen Bildbearbeitungs- und -verarbeitungssoftware ImageJ [7] mit den Bilddaten gemacht wird, ist schließlich nichts anderes als die Ausführung der in {1} gegebenen, die Kohärenz eines Wellenfeldes auswertenden mathematischen Operation der Autokorrelation für die unmittelbar beobachtbaren und im Versuch mit Hilfe einer einfachen Digitalkamera erfassbaren Intensitäten (vgl. [5]).



**Abb.4:** Die Autokorrelation mittels Digitalkamera aufgenommener Intensitätsverteilungen lässt sich mit der Software ImageJ [7] in 3 einfachen Schritten erledigen.

Im Ergebnis unterscheidet sich das Vorgehen der Maschine dabei nur unwesentlich von dem eines Menschen, der gefragt nach der „Größe“ eines Speckle einen bestimmten Punkt  $P_0(x_0, y_0)$  innerhalb der Intensitätsverteilung herausgreifen (aufgrund der Tatsache, dass die meisten Menschen „Speckle“ mit die hellen, nicht die dunklen Raumgebieten assoziieren, wird intuitiv meist ein besonders heller Punkt gewählt) und dessen „Helligkeit“, d.h. die Intensität  $I_0(x_0, y_0)$ , mit der Intensität benachbarter Punkte  $I_0(x_0 + dx, y_0 + dy)$ , vergleichen wird (vgl. Abb. 5 für den 1-dimensionalen Fall).



**Abb.5:** Schematische Darstellung des intuitiven Vorgehens bei der Bestimmung der „Specklegröße“ durch Vergleich der Ähnlichkeit der Intensität an den Punkten  $P(x_0)$  und  $P(x_0 + dx)$  mit einem Grenzwert  $c_k$  (hier -50%)

Sinkt die in diesem Fall selbstverständlich stark subjektiv bemessene „Ähnlichkeit“ mit der zuvor herausgegriffenen Referenzintensität  $I_0(x_0, y_0)$  unter einen kritischen Wert, respektive das Korrelationskriterium  $c_k$  (vgl. Abb. 5), so glaubt man den „Rand“ oder die „Kante“ des jeweiligen Speckles erreicht zu haben und kann eine zwar subjektive aber doch quantitative Größenabschätzung vornehmen.

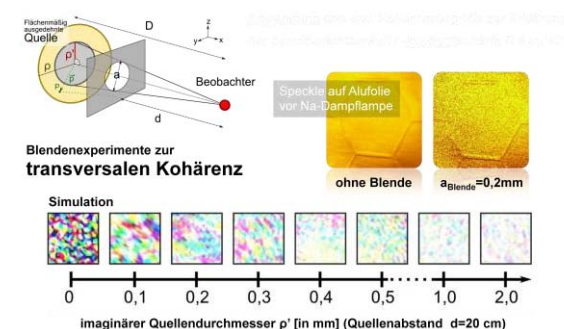
Durch entsprechende Überlegungen das eigene Vorgehen bei der messur Auswertung größerer Specklemuster ungeeigneten manuellen Messen der Specklegröße mittels Bildbearbeitungssoftware betreffend (vgl. [5]), können Schülerinnen und Schüler somit das Prinzip der Autokorrelation im Sinne eines mathematischen Messprozesses nachvollziehen, ohne die ihnen in aller Regel (noch) nicht zur Verfügung stehenden mathematischen Formalismen im Detail studieren zu müssen. Dem Verständnis zugute, kommt hierbei, dass sich am grundlegenden Vorgehen, anders als an der Komplexität des entsprechenden mathematischen Formalismus, auch beim Übergang von stationären, real

beobachtbaren Intensitäten zu raum- und zeitabhängigen komplexen Amplituden nichts ändert: Die Korrelation und mit ihr die in {1} als Autokorrelation des komplexen Wellenfeldes definierte Kohärenz ist und bleibt ein Maß für die „Ähnlichkeit“ der Wellenfunktionen im Raum (räumliche bzw. transversale Kohärenz) und Zeit (zeitliche bzw. longitudinale Kohärenz)..

### 5. Fazit

Ein auf diese Weise als skalares „Ähnlichkeitsmaß“ eines Wellenfeldes eingeführter Kohärenzbegriff ist nicht nur geeignet das eingangs beschriebene Missverständnis, es handele sich bei der Kohärenz um eine unabänderliche Eigenschaft der Quelle der jeweiligen elektromagnetischen Strahlung. Ein dergleicher Kohärenzbegriff legt auch den Grundstein für eine „sinnvolle“, weil von der sinnlichen, d.h. mit den eigenen Sinnen vorgenommenen „Korrelation“ von Bilddaten ausgehende und damit im wahrsten Sinne des Wortes „begreifbare“ mathematische Behandlung der Kohärenz, deren mathematischer Formalismus für einfache Blenden oder monochromatische Filter darüber hinaus durchaus mit den Mitteln der Oberstufenphysik zu bewältigen ist.

Im Wissen um die zeitlich wie räumlich kaum korrelierte Emission elektromagnetischer Wellen in der Photosphäre der Sonne, die an den Wassermolekülen in Wolken stattfindenden Streueffekte und die blendenartige Wirkung natürlicher Schattenspendler, wie sie auch für das Entstehen von „Sonnentälern“ verantwortlich sind, lassen sich mithilfe eines auf diese Weise erworbenen quantitativen Verständnisses von Kohärenz auch die starken Kontrastunterschiede alltäglicher Specklephänome erklären. Letztere sind offenbar immer dann am besten zu sehen, wenn sich die an ihrer Entstehung beteiligten elektromagnetischen Wellen durch eine hohe zeitliche (verbessert durch: Farbfilter; ein farbige, dunkle Oberflächen) und/oder räumliche (verbessert durch: geringe oder durch Blende reduzierte Winkelausdehnung der Quelle; vgl. Abb. 6) Kohärenz auszeichnen.



**Abb.6:** Kohärenz & „Specklesichtbarkeit“ bei Verwendung einer Blende. Versuch mit Na-Dampflampe und Alufolie (oben); Simulation für verschiedene Quellendurchmesser  $\rho'$  [in mm] bei einem Quellenabstand von  $d = 20\text{cm}$  (unten)

Was den bereits im Titel dieses Beitrags konnotierten Zweifel an der Angemessenheit der bei Hamlet

entlehnten Frage nach dem „kohärent oder nicht-kohärent“ sein anbetriift, so sollte dieser bei Schülerinnen und Schülern im Verlauf einer auf dem hier skizzierten phänomenorientierten Zugang zum Kohärenzbegriff fußenden Unterrichtseinheit nicht nur gewachsen sein. Er sollte darüber hinaus die Einsicht motiviert haben, dass der eingangs beschriebene rudimentäre, objektorientierte Kohärenzbegriff, der die Welt in „kohärent“ und „nicht-kohärent“ zu teilen sucht, einem physikalischen Verständnis des nicht vernachlässigbaren Einfluss der Kohärenz auf die Sichtbarkeit von Speckle und anderen alltäglichen Interferenzphänomenen im Weg steht. Ein erweiterter Kohärenzbegriff, der die Kohärenz als korrelatives Gradmaß versteht, zwar mathematisch weitaus komplexer sein mag, sich aber unter Rückgriff auf die dargelegte sinnstiftende Analogie zu einer intuitiven Bestimmung der „Specklegröße“ begreifen lässt und die Kohärenz mittels der in {1} gegebenen Rechenvorschrift, zunächst per Software, dann ,von Hand,,quantifizierbar macht.

## 6. Literatur

- [1] Wolf, E.: “Early days of coherence theory and the first Rochester conference on coherence”. In: Journal of the European Optical Society. Rapid Publications 5, 10044S. 2010.
- [2] Hermann, F.: "Altlasten der Physik 57: Kohärenz". In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51(1). 2002. S. 45-47.
- [3] W. Müller: „Lebensweltorientierung – ein Weg aus der Krise des Physikunterrichts, Evaluation des Wahlkurses ‚Physik und Medizin‘, In: GDGP-Band 1999, Alsbach, Leuchtturmverlag.
- [4] Muckenfuss, H: Lernen im sinnstiftenden Kontext. Cornelsen, Berlin 1995.
- [5] Moussa, A.: „Flickenteppich aus Licht: Specklephänomene im Alltag“. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft - Physikertagung Bochum 2009.
- [6] Wagenschein, M.: Verstehen lehren: genetisch - sokratisch - exemplarisch. Beltz, Weinheim 1999.
- [7] ImageJ. Image Processing and Analysis in Java. Open Sorce Software verfügbar unter <http://rsbweb.nih.gov/ij/> (Stand: 27.05.11)
- [1] Wolf, E.: “Early days of coherence theory and the first Rochester conference on coherence”.