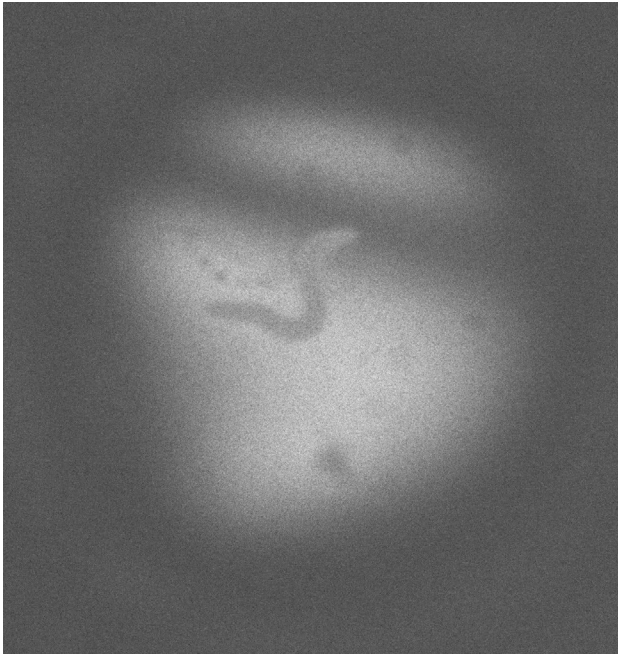


Quantenbildgebung

Wie entstehen Bilder durch indirekte Beobachtung?

Isabelle Castera

Abb. 1: Sumpfwasserwurm in einer Wasserprobe abgebildet mittels Quantenbildgebung, 2021.



Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena
(IOF) ©Fraunhofer IOF

Was ist auf Abbildung 1 zu erkennen? Die nahe liegende Antwort lautet: Die mikroskopische Aufnahme eines Wurms, dessen Umrisse in der Bildmitte sichtbar werden. Diese Deutung liegt zwar nicht falsch, doch sie greift zu kurz. Auf den ersten Blick weicht die Darstellung kaum von anderen wissenschaftlichen Laboraufnahmen ab, selbst wenn sie schemenhaft wirkt. Spannender als die Frage, *was* wir sehen, ist jedoch die Frage, *wie* dieses Bild zustande kommt. Denn tatsächlich wird hier nicht ein Sumpfwasserwurm ins Bild gesetzt, sondern das Interferenzmuster eines solchen, das mit Hilfe der Quantenbildgebung am Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena (IOF) im Jahr 2021 generiert wurde. Die feinkörnige Abbildung in Schwarz-Weiß entsteht durch Quanteneffekte und stellt die klassische Repräsentationslogik einer Bildgenese fundamental auf den Kopf. 100 Jahre nach der mathematischen Formulierung der Quantenmechanik im Jahr 1925 können quantenoptische Interferenzmuster mittlerweile experimentell aufgenommen werden. Das Phänomen der Interferenz basiert auf einer Überlagerung kohärenter Lichtwellen. Dabei entsteht ein Muster aus hellen und dunklen Bereichen der verstärkten oder ausgelöschten Wellen. Die Quantenbildgebung ist eine experimentelle Bildgebung, die seit 2014 mit Hilfe einer indirekten Beobachtungsweise Objekte sichtbar macht, die jenseits des sichtbaren Lichtspektrums liegen oder so lichtempfindlich sind, dass sie unter direktem Lichteinfall zerstört werden würden.¹ Möglich wird dieses Verfahren durch die Verschränkung von Photonen, kleinen Lichtteilchen, die an unterschiedlichen Stellen im Experiment separiert werden.² Die Quantenbildgebung verändert damit unsere bisherige Auffassung einer Bilderstellung auf eine völlig neue Weise: von einer klassischen Bildgebung als Repräsentation, die sich in einem Streben nach mechanischer Objektivität exemplarisch mit der Entwicklung der analogen Fotografie nachvollziehen

1 In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Projekt QUANCER wird ab 2026 ein erstes Rastermikroskop im Infrarot-Lichtspektrum basierend auf der Quantenbildgebung entwickelt, was für die Tumor-Diagnostik eingesetzt werden soll. Vgl. Fraunhofer. Das Magazin, Zeitschrift für Forschung, Technik und Innovation: »Kleine Quanten – Große Wirkung. Statusbericht aus der Quantenphysik: Wo winzige Teilchen bereits Großes bewirken«, München: Fraunhofer-Gesellschaft 2025, S. 36–47; hier S. 45.

2 Vgl. Borish, Victoria/Cole, Garrett D./Lapkiewicz, Radek/Lemos, Gabriela B./Zeilinger, Anton: »Quantum Imaging with Undetected Photons«, in: Nature 512 (2024), S. 409–412.

lässt,³ hin zu einer transklassischen des indirekten Beobachtens korrelieren-der Bildinformation durch die Quantenverschränkung.

Der Begriff der Verschränkung wurde von Erwin Schrödinger im Jahr 1935 eingeführt⁴ und folgt auf eine Debatte in der Physik zu der Beobachtungsabhängigkeit von Quantenphänomenen. Zuvor haben Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen in einem Aufsatz desselben Jahres die Quantenverschränkung theoretisch diskutiert und diese zugleich bezweifelt.⁵ Darin vertraten sie die kritische Annahme, dass bestimmte Eigenschaften eines Systems auch unabhängig von der Beobachtung existieren können und argumentierten, dass die Quantenmechanik unvollständig sei, insofern sie die physikalische Grundannahme eines lokalen Realismus verletzen würde. Der Begriff des Realismus meint in diesem Zusammenhang die Existenz von Eigenschaften, die auch dann vorliegen, wenn gerade nicht gemessen oder hingesehen wird. Die Lokalität bedeutet im Einklang mit Einsteins Relativitätstheorie, dass sich Information nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann und sich Objekte, die weit voneinander entfernt sind, keineswegs über eine nichtlokale Verbindung gegenseitig beeinflussen können. Einstein, Podolsky und Rosen suchten daher nach Gesetzmäßigkeiten, welche die Verschränkung – Einstein nannte sie skeptisch »spukhafte Fernwirkung«⁶ – deterministisch erklären könnten. John Steward Bell stellte darauf ant-

-
- 3 In den frühen Fotografiediskursen wird zunächst eine Unmittelbarkeit in der Naturdarstellung durch die fotografische Technik diskutiert. Vgl. hierzu Louis Jacques Mandé Daguerre, der davon ausgeht die Fotografie sei ein »chemisch und physikalischer Prozess, welcher der Natur hilft, sich selbst abzubilden« Zit. nach: Wiegand, Wilfried (Hg.): *Die Wahrheit der Photographie. Klassische Bekenntnisse zu einer neuen Kunst*. Frankfurt a.M.: S. Fischer 1989, S. 18; William Henry Fox Talbot nimmt in *Der Zeichenstift der Natur* [Orig. *The Pencil of Nature*, 1844] an, die Fotografie wäre »impressed by the agency of light alone«, in: William Talbot/Henry Fox, *The Pencil of Nature*, London 1844, o. S. Dieses objektive Wirklichkeitsversprechen einer technisch erzeugten, kausalen Indexikalität wird mit dem Aufkommen der digitalen Fotografie zunehmend in Abrede gestellt.
 - 4 Vgl. Schrödinger, Erwin: »Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik«, in: *Die Naturwissenschaften* 23, Heft 50 (1935), S. 844–849.
 - 5 Vgl. Einstein, Albert/Podolsky, Boris/Rosen, Nathan: »Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?«, in: *Physical Review* 47 (1935), S. 777–780, hier S. 780.
 - 6 Zit. nach einem Brief von Albert Einstein an Max Born am 03.12.1947. In: Max Born, *Physik im Wandel meiner Zeit*, Braunschweig, Friedrich Vieweg & Sohn 1958, S. 228.

wortend im Jahr 1964 das Theorem der *Bell'schen Ungleichung* auf,⁷ wodurch mit der Durchführung von *Bell Tests* gezeigt werden konnte, dass sich die Verschränkung nicht über eine fehlende Kenntnis verborgener Parameter erklären ließ.⁸ Denn wird die mathematische Bedingung der *Bell'schen Ungleichung* in Experimenten verletzt, liegt eine nichtlokale Verschränkung zwischen korrelierenden Teilchen vor. Mit Alain Aspect, John Clauser, Anton Zeilinger und ihren Forschungsteams wurde die Quantenverschränkung in den Jahren 1972⁹, 1981/82¹⁰ und 1997/98¹¹ weiter experimentell bestätigt, wofür sie 2022 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurden und somit die Grundlage für die praktische Entwicklung der Quantenbildgebung legten.

Im Versuchsaufbau der Quantenbildgebung trifft ein Laserstrahl auf einen nichtlinearen Kristall, der durch seine Materialeigenschaft zwei miteinander verschränkte Photonenstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen generiert, die sodann getrennt und in verschiedene Richtungen gelenkt werden. Während das sogenannte Idler-Photon zu einem Objekt im unsichtbaren Spektrum geleitet wird, führt der Strahlenweg des anderen Photons, genannt Signal-Photon, im sichtbaren Lichtspektrum zu einer Kamera. Mittels ihrer Verschränkung kann über das Signal-Photon die Bildinformation des Idler-Photons gewonnen werden, obwohl die Kamera nie in einem direkten Kontakt zu dem Objekt stand. Dies erfolgt nicht etwa über eine Informationsübertragung im klassischen Sinne, indem eine Information von einem System

-
- 7 Vgl. Bell, John: »On the Einstein Podolsky Rosen paradox«, in: *Physics* 1.3 (1964), S. 195–200.
 - 8 Vgl. Handsteiner, Johannes et al.: »Cosmic Bell Test: Measurement Settings from Milky Way Stars«, in: *Physical Review* 118 (2017), S. 1–8.
 - 9 Freedman, Stuart J./Clauser, John F.: »Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories«, in: *Physical Review* 28 (1972), S. 938–941.
 - 10 Aspect, Alain/Grangier, Philippe/Roger, Gérard: »Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem«, in: *Physical Review* 470.7 (1981), S. 460–463; Aspect, Alain/Grangier, Philippe/Roger, Gérard: »Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities«, in: *Physical Review* 49.2 (1982), S. 91–94; Aspect, Alain/Dalibard, Jean/Roger, Gérard: »Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzer«, in: *Physical Review* 49 (1982), S. 1804–1807.
 - 11 Bouwmeester, Dirk/Pan, Jian-Wei/Mattle, Klaus/Eibl, Manfred/Weinfurter, Harald/Zeilinger, Anton: »Experimental quantum teleportation«, in: *Nature* 390 (1997), S. 575–579; Jennewein, Thomas/Simon, Christoph/Weihs, Gregor/Weinfurter, Harald/Zeilinger, Anton: »Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions«, in: *Physical Review* 81.23 (1998), S. 5039–5043.

zum anderen transportiert wird, sondern ereignet sich gemäß statistischer Korrelation. Das bedeutet, dass man über die Photonen vor der Messung keine genauen Aussagen treffen kann und diese nur mittels mathematischer Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden können. Erst wenn das Signal-Photon gemessen wird, manifestiert sich *zufällig* einer der möglichen Zustände, wobei der Zustand des Signal-Photons dann identisch mit dem des Idler-Photons ist. Beide verschränkten Photonen werden als ein quantenmechanisches System beschrieben. Max Born interpretierte im Jahr 1926 die auf Erwin Schrödinger zurückgehende Wellenfunktion der Quantenmechanik als eine statistische Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Teilchen, wobei ihre Eigenschaften vor der Messung nicht festgelegt und somit abhängig von der Experimentalsituation sind.¹² Der Trick in der Quantenbildgebung ist es nun, dass seitens des Signal-Photons gemessen wird, worüber sich indirekt auch der Zustand des Idler-Photons ableiten lässt – ohne dass dieses jedoch direkt beobachtet wird. Denn würde eine Beobachtung und Messinteraktion stattfinden, verschwände das dadurch erscheinende Interferenzmuster, welches nur entsteht, solange der Zustand des Idler-Photons unbestimmt bleibt. Über das Bild lässt sich also kein direkter, indexikalischer Kontakt zwischen Zeichen und Objekt nachvollziehen, wie es Charles Sanders Peirce als ein Charakteristikum für das fotografische Bild beschrieben hat,¹³ sondern es wird statistisch und indirekt mittels der Photonenverschränkung, sowie über eine Messung am Signal-Photon seitens der Kamera ermittelt.

Wenn die Bildinformation über Quanteneffekte gewonnen wird, liegt zunächst der Gedanke nahe, dass sich in der Quantenbildgebung Bildlichkeit und Medialität voneinander entkoppeln. Doch ich möchte insbesondere hervorheben, dass der nichtlineare Kristall ein Medium ist und die notwendige Abständigkeit zwischen den dadurch verschränkten Photonenstrahlen im Experiment medial hervorgebracht wird. Denn die räumliche Trennung der Strahlen im Experiment ist entscheidend für das Gelingen der Bildgebung, damit ein Zusammenspiel zwischen dem Idler-Photon im unsichtbaren und dem Signal-Photon im sichtbaren Lichtspektrum gewährleistet ist, um indirekt das Interferenzmuster beobachten zu können. Die Bildinformation basiert auf einer Messung seitens des Signal-Photons und der sich dadurch

12 Vgl. Born, Max: »Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge«, in: Zeitschrift für Physik 38 (1926), S. 803–827.

13 Vgl. Peirce, Charles Sanders: »Die Kunst des Razonierens. Kapitel II [1893]«, in: Semiotische Schriften. Band 1, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1986, S. 193.

zufällig ereignenden Manifestation als ein gezeitigter Quantenzustand, der völlig situativ ist. Es lassen sich also nur Aussagen über ein quantenmechanisches System treffen, wenn eine Beobachtung tatsächlich stattfindet. Die räumliche Korrelation zwischen den Lichtteilchen allein liefert noch keine Bildinformation über das Objekt, solange diese nicht gemessen wird. Insofern ist nach Anton Zeilinger die »Information nicht nur etwas Abgeleitetes«, sondern definiert auch das, »was Wirklichkeit sein kann.«¹⁴

Diese Verschiebung von einer Bildgebung, basierend auf direkt nachvollziehbaren Spuren hin zu einer Interferenz, bricht fundamental mit der bisherigen Auffassung einer klassischen Bildentstehung. Galt – etwa nach Roland Barthes – für fotografische Bilder ein eigentümliches Zeit-Raum-Gefüge, indem Vergangenes auf die Gegenwart der momentanen Betrachtung durch den Rezipierenden trifft, wobei sich verschiedene Zeitlichkeiten überlagern,¹⁵ ist der Verweis auf eine zuvor dagewesene Referenz in der Quantenbildgebung nicht mehr eindeutig gegeben. Denn diese hier aufgerufene »Emanation des Referenten«¹⁶ – verstanden bei Barthes noch im Kontext der analogen Fotografie als eine chemisch-physikalische Reproduktion der Wirklichkeit basierend auf der Lichtempfindlichkeit von Silbersalzen – ist in der Quantenbildgebung zunächst unbestimmt. So sind die Lichtteilchen bis zu dem Zeitpunkt einer Beobachtungsintervention ohne definierte Eigenschaften, worauf sich vor der Beobachtung in irgendeiner Weise referieren ließe. Erst durch die Beobachtung reduzieren sich alle Möglichkeiten auf eine Konkrete. Zwar lässt sich der hier eingangs gezeigte Sumpfwasserwurm (Abb. 1) derzeit auch unter einem Mikroskop beobachten, jedoch soll die Quantenbildgebung zukünftig für Bereiche anwendbar gemacht werden, in denen die herkömmliche Bildgebung an ihre Grenzen stößt, wie beispielsweise bei lichtempfindlichen Material- oder Gewebeprobe. Hierfür ermöglicht es die Photonenverschränkung, dass ein unbestimmter Zustand seitens des Idler-Photons ein Interferenzmuster erscheinen lässt, welches auf der anderen Seite über das Signal-Photon indirekt beobachtet werden kann. Nur über die verschränkten Photonen, verstanden

14 Zeilinger, Anton: »Wirklichkeit und Information. Teleportation in der Quantenwelt«, in: Hubert Burda/Christa Maar: *Iconic Turn* (Hg.), Die Macht der Bilder, Köln: DuMont 2004, S. 178–184, hier: 183.

15 Vgl. Barthes, Roland: »Rhetorik des Bildes«, in: Roland Barthes, *Der entgegenkommende und stumpfe Sinn. Kritische Essays III.*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1990, S. 39.

16 Barthes, Roland: *Die helle Kammer. Bemerkungen zur Photographie*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1985, S. 90.

als ein quantenmechanisches System, lässt sich die Objektinformation gewinnen.

Nach Anton Zeilinger stellt »jedes Beobachten, jedes Messen, jedes Experimentieren zuerst die Frage des richtigen Ordners von Information [...] und erst in zweiter Linie die Frage nach dem Referenten der Information.«¹⁷ Versteht Barthes die analoge Fotografie als eine »Botschaft ohne Code«, die zwar mit einer Intention des Fotografierenden einhergeht, worin ihr »fotografisches Paradox«¹⁸ begründet liegt, gehen Vilém Flussers Forderungen in *Für eine Philosophie der Fotografie* (1983) in eine andere Richtung. Denn Flusser macht darauf aufmerksam, dass Fotografien, wie alle technischen Bilder, nicht die Wirklichkeit mimetisch abbilden, sondern erkennen lassen, wie mit dem Apparat die Wirklichkeit beschrieben wird.¹⁹ Diese Perspektive auf die Entstehungs- und Möglichkeitsbedingungen eines Bildes und die Beziehung zwischen Wirklichkeit und Information gewinnt an Relevanz in der Quantenbildgebung. So werden die Interferenzbilder der Quantenbildgebung durch die indirekte Beobachtung im Experimentalsystem als optische Effekte medialisiert, wobei die dabei hervorgebrachten Muster auf Konzepten der Korrelation und Wahrscheinlichkeit beruhen. Folgt man diesem Gedanken weiter, verschiebt sich im Wahrnehmungsvollzug die Referenz der Wirklichkeit hin zu einer Konstitution von Bildinformation im Experimentalkontext.

Ließe sich Barthes' *punctum*, welches er in *Die helle Kammer* (1980) als ein plötzliches Berührtsein beschreibt und das allgemeine *studium* einer Fotografie unmittelbar durchkreuzt,²⁰ in der Quantenbildgebung und deren Interferenzmustern dann überhaupt noch finden? Während das *punctum* für Barthes über die situative Beobachtung eine individuelle Betroffenheit eines Rezipierenden meint, ist der Zufall in der Quantenbildung konstitutiv. Verweist Barthes' *punctum* auf einen Referenten des »Es-ist-so-gewesen«²¹, also auf

17 Zeilinger, Anton: »Physik und Wirklichkeit. Neuere Entwicklungen zum Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon«, in: Hans-Christian Reichel/Enrique Prat de la Riba (Hg.), *Naturwissenschaft und Weltbild. Mathematik und Quantenphysik in unserem Denk- und Wertesystem*, Wien: Hölder-Pichler-Tempsky 1992, S. 99–121, hier S. 120.

18 Barthes, Roland: »Die Fotografie als Botschaft«, in: Roland Barthes, *Der entgegenkommende und der stumpfe Sinn. Kritische Essays III*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1990, S. 12f.

19 Vgl. Flusser, Vilém: *Für eine Philosophie der Fotografie*, 12. Aufl., Berlin: Edition Flusser 2018, S. 35.

20 Vgl. Barthes, Roland: *Die helle Kammer*, S. 36.

21 Ebd., S. 87. [Herv. i. Orig.]

ein intersubjektives Moment durch den tastenden Blick eines wahrnehmenden Subjekts, entspringen Quantenbilder korrelationsbasierten Prozessen, die sich dem direkten Blick entziehen. Führt man sich noch einmal die Abbildung des Sumpfwasserwurms (Abb. 1) vor Augen, so beruht das Bild nicht auf einer klassischen Repräsentation, sondern auf einem Interferenzmuster, was sich nur indirekt mittels der Photonenverschränkung darstellen lässt, da es ansonsten verschwindet. Die quantengenerierte Musterbildung ist hier nicht als ein direkter Wirklichkeitsindex zu verstehen, sondern ereignet sich unter experimentellen Bedingungen über einen Umweg der verschränkten Lichtteilchen zwischen Unsichtbarkeit und Sichtbarkeit.