

Über einige historische und einige hypothetische Verbindungen von Quantentheorie und Biologie

Ein transdisziplinärer Annäherungsversuch

Konrad Oexle

In jenen Jahren an der Seite des Genetikprofessors machte ich die Bekanntschaft einer Physikstudentin aus Burkina Faso. Sie war so neugierig wie verunsichert. [...] Heute leitet sie eine Nähmaschinenfabrik in Ouagadougou.

Elke Androxo

Einleitung

Quantentheorie und Biologie scheinen sich in unterschiedlichen Welten zu entwickeln. Die Biologie baut auf einer anschaulichen Grundlage und behandelt Moleküle, Zellen oder Organismen im Sinne eines klassischen Objektbegriffes, während die Quantentheorie relationalistisch aufgestellt und als abstrakter Symbolismus entwickelt wurde und Begriffe der Anschauung wie Identität und Lokalität unterwanderte. Ein transdisziplinärer Blick scheint dennoch von Zeit zu Zeit gerechtfertigt, übten doch gerade Quantenphysiker wie Max Delbrück und Erwin Schrödinger in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der Molekulargenetik und damit der modernen Biologie aus.

Zu diesem Einfluss trugen sicher der Nimbus der Quantenphysik bei und die Öffnung im Denken, die sie verlangt. Inhaltlich war es aber vielleicht auch einer je eigenen Distanz zur Quantenphysik bzw. ihrer vorherrschenden Interpretation zu verdanken, dass gerade Delbrück und

Schrödinger so förderlich wirken konnten. Hinweise dafür werden hier aufgeführt. Einige Quantenphysiker wie etwa Pauli wandten sich gezielt gegen eine Biologie der molekularen Mechanismen auf dem Boden der klassischen Physik. Die Motive dafür waren nicht immer nur wissenschaftlicher Art, wie im Falle von Pascual Jordans Quantenbiologie gezeigt werden kann.

Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie verwies auf den Beobachter und seine komplementären Sichtweisen. Die Frage nach dem Bewusstsein ergab sich also inmitten der Mikrophysik. Meist übersprang die Antwort auf diese Frage den Bereich der Biologie und bewertete das Angebot ihrer Erkenntnisse implizit als unzureichend. In neuerer Zeit legten jedoch Penrose und Hamerhoff Überlegungen zu Quantentheorie und Molekularbiologie des Bewusstseins vor. Diese sollen hier etwas näher betrachtet werden, obgleich sie sowohl biologisch als auch physikalisch als hoch spekulativ eingeordnet wurden.

Insofern die Molekularbiologie auf der Chemie fußt und diese auf der Quantenphysik, ist letztere Voraussetzung der Biologie. Stabilität und Wechselwirkung von Molekülen sind ohne Quantenphysik nicht zu verstehen. Von besonderem Interesse ist jedoch die Frage, ob Effekte der Quantenphysik »an der Chemie vorbei« im Organischen auftauchen. Einige Hypothesen dazu sollen hier beleuchtet werden.

Derzeit wird intensiv an der technischen Realisierung eines sogenannten Quantencomputers gearbeitet, also eines Rechners, der unter Ausnutzung der Gesetze der Quantenphysik zu besonderen Rechenleistungen befähigt ist. Manche vermuten, dass die biologische Evolution diese Möglichkeit der Informationsverarbeitung schon entwickelt haben könnte. Diese Hypothese hat der Beziehung von Quantenphysik und Biologie einen neuen Reiz gegeben. Nichtphysiker müssen in dieser Beziehung allerdings einen steilen Pfad erklimmen, was ich hier zunächst versuchen will. Der Aufsatz kann jedoch weitgehend auch ohne diesen Teil gelesen werden.

¹ Überblicke in
Röpke 1983,
Haken und
Wolf 1993,
Audretsch 1994

Ein Blick in die Quantentheorie

Die Quantentheorie¹ begann 1900 mit einer neuen Wendung im Streit um die korpuskulare Natur des Lichts, den Newton gegen Huygens ver-

loren zu haben schien. Planck und 1905 Einstein erkannten, dass Materie die Energie elektromagnetischer Strahlung (Lichtwellen) nicht kontinuierlich, sondern in Quanten (Photonen) absorbiert und emittiert, deren Energiemenge E sich proportional zur Strahlungsfrequenz ν verhält, $E = h\nu$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist.

Bohr verwandte 1913 die Idee einer Quantisierung der Energie, um für die atomaren Elektronen, welche die Interaktion von Materie und Licht bestimmen, diskrete stabile Energieniveaus zu bestimmen. Diese Niveaus leitete er ab aus dem Postulat einer einfachen ganzzahligen Reihung möglicher Elektronenbahnen. Mittels angenommener Elektronensprünge zwischen diesen Niveaus konnte er materialtypische Absorptions- und Emissionsquanten, d. h. -frequenzen erklären. Laut der klassischen Physik würden die Elektronen, indem sie ihre Energie in kontinuierlich zunehmender Frequenz abstrahlen, auf einer Spiralbahn in den Atomkern stürzen. Erst mit Bohrs Postulat und mit Paulis 1926 formulierter Ausschlussregel, wonach mögliche Elektronenzustände nicht von mehr als einem Elektron eingenommen werden können, lassen sich Atome als stabil und gemäß dem periodischen System geordnet verstehen.

Bohrs ganzzahlige Relationen ließen an Resonanzschwingungen denken. Dies führte de Broglie 1924 zur Deutung von Elektronen und Materieteilchen generell als Wellen und Schrödinger 1926 zu einer Wellengleichung gemäß des Energieerhaltungssatzes. Die Schrödingergleichung stellte sich als die allgemeine Form der Zustandsbeschreibung und Zustandsentwicklung in der Quantentheorie heraus. Aus der Wellennatur von Teilchen lässt sich auch Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation (1927) ableiten, laut derer bei gemeinsamer Messungen bestimmter Größen (z. B. Ort x und Impuls p) die Messresultate notwendige Unschärfen aufweisen, $\Delta x \Delta p > \hbar/2$. Wird ein Teilchenstrahl in senkrechter Ebene durch einen Spalt örtlich eingegrenzt, so entsteht hinter dem Spalt eine Wellenbeugung, die anzeigt, dass der Teilchenimpuls in der senkrechten Ebene nicht mehr exakt gleich Null ist, wobei das Beugungsbild umso breiter wird, je enger der Spalt eingrenzt. Auch für Zeit und Energie gibt es eine Unbestimmtheitsrelation, $\Delta t \Delta E > \hbar/2$. So ließe die punktuelle raumzeitliche Beobachtung einer Welle deren Frequenz und damit deren Energie völlig unbestimmt.

Eine Darstellung der Quantentheorie im Sinne einer klassischen Wellenmechanik, wie sie insbesondere Schrödinger vorschwebte, war

nicht möglich. Ende der 20er Jahre wurde unter Mitwirkung von Born, Jordan, Dirac und von Neumann dagegen folgendes mathematisches Gerüst der Quantentheorie erarbeitet. Der Zustand eines Systems (z. B. eines Teilchens) ist durch eine Zustandsfunktion $|\psi\rangle$ gegeben, einem Vektor im sogenannten Hilbert-Raum. Dieser Funktion entspricht keine beobachtbare physikalische Größe. Den Observablen sind vielmehr bestimmte (lineare selbstadjungierte) Operatoren (Matrizen) zugeordnet, deren Form – soweit möglich – durch Analogie zur klassischen Physik erraten wurde. Wenn in einem Zustand eine Observable (z. B. der Ort) einen scharfen Wert a_k annehmen kann, muss es eine sogenannte Eigenfunktion $|\varphi_k\rangle$ des zugehörigen Operators A geben, die mit a_k als Eigenwert die Gleichung $A|\varphi_k\rangle = a_k|\varphi_k\rangle$ löst.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Messung des Zustandes $|\psi\rangle$ der Wert a_k bestimmt wird, ergibt sich aus der Projektion von $|\psi\rangle$ auf die Eigenfunktion $|\varphi_k\rangle$ des Operators. Mathematisch wird dabei das – generell komplexzahlige – Skalarprodukt $\langle\varphi_k|\psi\rangle$ gebildet, die sogenannte Wahrscheinlichkeitsamplitude, deren Betragsquadrat $|\langle\varphi_k|\psi\rangle|^2$ die gesuchte – reellzahlige – Wahrscheinlichkeit ergibt. Entsprechend des Projektionsverfahrens kann $|\psi\rangle$ als additive Linearkombination (Superposition) der Eigenfunktionen des Operators ausgedrückt werden, $|\psi\rangle = \sum|\varphi_i\rangle\langle\varphi_i|\psi\rangle$, wobei die »Länge« von $|\psi\rangle$ und damit die Größe der Faktoren $\langle\varphi_i|\psi\rangle$ anhand der totalen Wahrscheinlichkeit $\langle\psi|\psi\rangle = 1$ normiert werden. Der Erwartungswert $\langle A \rangle$ einer Messung ist das gewichtete Mittel der möglichen Eigenwerte, $\langle A \rangle = \sum a_i |\langle\varphi_i|\psi\rangle|^2 = \sum \langle\psi|\varphi_i\rangle a_i \langle\varphi_i|\psi\rangle = \langle\psi|\sum|\varphi_i\rangle a_i \langle\varphi_i|\psi\rangle$. Im Ausdruck $\sum|\varphi_i\rangle a_i \langle\varphi_i|$ findet sich der Operator A wieder, wie sich leicht zeigen lässt durch Einsetzen in die Eigenwertgleichung unter Berücksichtigung der Orthogonalität der Eigenfunktionen ($\langle\varphi_i|\varphi_j\rangle = 1$ für $i = j$ und sonst 0). Für Operator und Erwartungswert ergibt sich also die einfache Beziehung $\langle A \rangle = \langle\psi|A|\psi\rangle$.

Angenommen, der Zustand eines Systems sei durch Superposition von Eigenfunktionen $|\varphi_i\rangle$ beschrieben. Nun wird dieses System einer Messung unterworfen, der der Operator B zugeordnet ist. Es erfolgt eine Projektion auf die Eigenfunktionen $|\chi_j\rangle$ dieses Operators. Die Wahrscheinlichkeitsamplitude eines bestimmten Messwertes b_j ist dann gegeben als $\langle\chi_j|\psi\rangle = \langle\chi_j|\sum|\varphi_i\rangle\langle\varphi_i|\psi\rangle = \sum\langle\chi_j|\varphi_i\rangle\langle\varphi_i|\psi\rangle$. In die Rechnung gehen also alle Eigenfunktionen $|\varphi_i\rangle$ ('Möglichkeiten') ein, deren Superposition den Zustand $|\psi\rangle$ bildeten. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit $|\langle\chi_j|\psi\rangle|^2$

des Messwertes b_i werden dabei jedoch nicht die Wahrscheinlichkeiten $|\langle \chi | \varphi_i \rangle|^2$, sondern die komplexzahligen Wahrscheinlichkeitsamplituden $\langle \chi | \varphi_i \rangle$ in gewichteter Weise addiert.

Der Addition der Wahrscheinlichkeitsamplituden entspricht physikalisch die Interferenz, z. B. die Interferenz der beiden Teilwellen im Doppelspaltexperiment. Beugung von Materie am Doppelspalt konnte für Makromoleküle gezeigt werden, die aus 60 Kohlenstoffatomen zusammengesetzt sind.²

² Arndt et al.
1999

Es ist nicht selbstverständlich, dass die Operatoren bzw. deren Eigenfunktionen klassische Beobachtungswerte ergeben (s. u.). Besteht ein quantenphysikalisches System aus zwei oder mehreren Teilchen, kann gemäß des Superpositionsprinzips die Verschränkung (*entanglement*, *quantum correlation*) der Teilchen dargestellt werden, wobei das einzelne Teilchen keinen eindeutigen Zustand mehr hat. Die Messung an einem Teilchen bestimmt dann, was am bzw. an den räumlich getrennten anderen gemessen wird, und zwar so, dass das Messergebnis nicht durch die lokale Funktion eines der Teilchen innewohnenden »verborgenen« Parameter beschrieben werden kann. Einstein und Kollegen haben 1935 die Verschränkung als paradoxe Folge der Quantentheorie bezeichnet. Dennoch konnten – basierend auf Überlegungen von Bell, der 1964 ein widerlegbares allgemeines Modell mit verborgenem Parameter aufstellte – Aspect und Kollegen das Prinzip der quantenphysikalischen Verschränkung empirisch bestätigen.³

³ Aspect et al.
1982

Nicht alle Observablen eines Systems sind gleichzeitig messbar. Das kommt in der Nichtvertauschbarkeit der entsprechenden Operatoren zum Ausdruck, $AB|\psi\rangle \neq BA|\psi\rangle$. Wird das System durch die Messung etwa so präpariert, dass es einen exakt bestimmten Ort hat, verliert es dadurch die Bestimmbarkeit eines Impulses, und umgekehrt. Durch die vertauschbaren Operatoren, z. B. Orts- und Spinoperator, wird das System im quantentheoretischen Sinne vollständig erfasst. Aus der Nichtvertauschbarkeit bestimmter Operatoren (z. B. Orts- und Impulsoperator) kann die Unbestimmtheitsrelation hergeleitet werden. Dazu wird der mittleren quadratische Abweichung als einer Messgröße ein Operator zugeordnet, $(\Delta A)^2 = (A - \langle A \rangle)^2$, und dann für das Produkt der Erwartungswerte abgeleitet, dass $\langle (\Delta A)^2 \rangle \langle (\Delta B)^2 \rangle > \langle AB - BA \rangle \neq 0$. Die Unbestimmtheitsrelation verdeutlicht den Unterschied zur klassischen Physik prominent. Die für bestimmte Paare von Observablen (z. B. Ort und Impuls)

notwendige Unbestimmtheit bei gemeinsamer Messung unterläuft die Vorstellung von Teilchen auf exakt beschreibbaren raumzeitlichen Bahnen. Bohr entwickelte zur Deutung den Begriff der *Komplementarität* (s. u.), z. B. von raumzeitlicher Verortung versus kausaler Ordnung mikrophysikalischer Ereignisse.

Masse und Zeit sind Parameter der klassischen Physik, die nicht unmittelbar in Observablen der Quantentheorie übersetzt wurden. Die Diskussion um das Wesen dieser Parameter hält bis heute an. Die Quantentheorie stößt dabei auf bisher nicht endgültig geklärte Konflikte mit Allgemeiner Relativitätstheorie und Thermodynamik, worauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden kann.⁴

⁴ Jammer 1964,
Zurek 2002,
Gambini et al.
2004

Wenn die Information über ein System unvollständig ist, kann es nicht durch nur eine Zustandsfunktion als »reiner Zustand« beschrieben werden, sondern muss vielmehr als Wahrscheinlichkeitsverteilung (»Mischung«) von reinen Zuständen modelliert werden. Diese Mischung wird durch den Dichteoperator erfasst, $\rho = \sum p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$, wobei p_i die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen von Zustand $|\psi_i\rangle$ angibt. Der Erwartungswert einer Messung ergibt sich als sogenannte »Spur« (»trace«) des Tensorproduktes von Dichteoperator und Operator der Observablen, $\langle A \rangle = \text{tr}[\rho A]$. In der Matrizenrechnung bedeutet Spurbildung die Summierung der Diagonalelemente einer Matrize. Falls nur ein Zustand vorkommt, es sich also um einen reinen Zustand handelt mit $p_i = p = 1$, ergibt sich erwartungsgemäß $\text{tr}[\rho A] = \langle\psi|A|\psi\rangle$. Der Dichteoperator erlaubt eine alternative Beschreibung von Quantensystemen, wobei er in gewissem Sinne die Rolle der Zustandsfunktion übernimmt.

Hat man es mit einem zusammengesetzten Metasystem zu tun, das aus einem System H und dessen Umgebung E besteht, dann lässt sich der Dichteoperator des Systems H durch Spurbildung über die Umgebung gewinnen, $\rho^H = \text{tr}_E[\rho^{HE}]$. Diese Teilspurbildung erlaubt die Beschreibung der Entwicklung eines Systems, das mit seiner Umgebung in Wechselwirkung tritt. Wenn die Superposition von Zuständen des Systems H durch diese Wechselwirkung zerstört wird, spricht man von Dekohärenz. Durch die Teilspurbildung lassen sich die Dekohärenzzeiten berechnen. Je größer und wärmer ein System ist, desto kürzer ist die Dekohärenzzeit.

⁵ Überblick in Krips 1999 Die Quantenphysik hat eine spezielle Betrachtung des Messprozesses induziert.⁵ Während sich im nicht-beobachteten Fall ein System reversibel

entwickelt, wird der Zustand im Messprozess so präpariert, dass sich von den möglichen Ergebnissen eines ergeben kann (z. B. ein bestimmter Ort in einem Messbereich). Dieser Übergang vom Möglichen zum irreversibel Faktischen wird laut der sogenannten Kopenhagener Interpretation durch die Beobachtung bedingt.⁶ Entscheidend für den Beobachtungsprozess sei ein kategorialer Schnitt zwischen dem quantenphysikalischen System und der klassischen, irreversiblen Welt, in der der Beobachter seinen Messapparat betreibt. Die Zustandsfunktion des Phänomens ist in radikalen Versionen der Kopenhagener Interpretation nicht physikalisch zu deuten, sondern nur als mathematisches Hilfsmittel, durch das Messergebnisse in Zusammenhang gebracht werden können.

⁶ Heisenberg
1959

Wenn die Quantentheorie allerdings universelle Bedeutung hat, dann gilt sie auch für die makroskopische Messapparatur und den Beobachter selbst. In der Tat sind die Folgen des Superpositionsprinzips bzw. der Interferenz für makroskopisch ausgedehnte Objekte experimentell nachgewiesen worden (s. o.). Von Neumann hat die quantentheoretische Beschreibung auf den Messapparat ausgedehnt. Er beschrieb einen »Kollaps« (Reduktion) der Zustandsfunktion als physikalischen Prozess eigener Art, der von der »unitären« Entwicklung des Systems gemäß der Schrödingergleichung zu unterschieden sei. Beim Kollaps geht das Gesamtsystem aus zu messendem System und Messapparat aus einem »verschränkten« Zustand superponierter Eigenzustände in eine Mischung messbarer Zustände über. Der Kollaps wird vom Beobachter verursacht.

Die Dekohärenztheorie versucht, auf den »Kollaps der Zustandsfunktion« zu verzichten, indem sie in die quantentheoretische Analyse des Messprozesses auch die Umgebung der Messapparatur einbezieht. Der Superpositionszustand der Messapparatur wird aufgehoben durch Wechselwirkung mit der Umgebung (»einselection«, environmentally induced superselection). Die Auswahl der Ergebnisse, die der Messapparat anzeigen kann, wird mit der Vorhersagbarkeit klassischer Systeme erklärt, d. h. mit einem initialen Entropieminimum.⁷ Die Dekohärenztheorie unterstützt damit in gewissem Sinne Bohrs Intuition, wonach die klassisch-physikalische Welt des Beobachters Voraussetzung ist für die Beobachtung eines Quantensystems.⁸

⁷ Zurek 2002

⁸ Bacciagaluppi
2004

Der historische Einfluss von Quantenphysikern auf die Biologie

Komplementarität

Vordenker bzw. Stimulatoren der Molekularbiologie waren zu einem erheblichen Teil Physiker, die ›hauptsächlich‹ die Quantenphysik auf den Weg gebracht hatten. Zu nennen ist zunächst Bohr bzw. dessen Wirkung auf Max Delbrück.⁹ Bohr glaubte, eine allgemeine Version seines Komplementaritätsprinzips sei auch in der Biologie wiederzufinden, zumal die Quantenphysik die wesentliche Begrenztheit einer mechanistischen Beschreibung der Welt aufgezeigt habe. So müsse Leben als »elementares Faktum« betrachtet werden, das eine zur mechanistischen komplementäre vitalistische (d. h. teleologische) Deutung verlange. Das Studium der molekularen Mechanismen eines lebendigen Objektes zerstöre dieses notwendigerweise und stoße daher an eine unüberwindliche Grenze. Bohrs Komplementaritätsdenken kann als Relationalismus gedeutet werden, der in der Tradition Kants steht, wobei allerdings die Bedingungen der Erkenntnis von den inneren Begriffen nach außen in die experimentelle Konstellation verlagert wurden, und nicht mehr wie bei Kant apriorische innere Begriffe der Anschauung bestimmen, was beobachtet werden kann, sondern die Art des außen stattfindenden Beobachtungsprozesses bestimmt, welche von zwei komplementären Beschreibungen ausgewählt wird.¹⁰ Komplementarität kommt nicht nur im Welle-Teilchen-Dualismus bzw. in den Nichtvertauschbarkeits-Regeln der Quantenphysik zum Ausdruck, sondern immer dann, wenn zur vollen Erfassung eines Phänomens zwei sich gegenseitig ausschließende Perspektiven nötig sind.

⁹ McKaughan
2005

¹⁰ Folse 1985,
Krips 1999

¹¹ Bohr 1933

Bei Bohrs Vortrag *Licht und Leben* im Jahre 1932¹¹ war der damals 26-jährige Max Delbrück anwesend. Delbrück hatte zu diesem Zeitpunkt schon mit prominenten Physikern wie Born, Pauli, Meitner und Bethe zusammengearbeitet und sich etwa mit der Vorhersage eines speziellen Streuphänomens einen Namen gemacht. Als er jedoch im rückblickenden Gespräch gegen Ende seines Lebens über seine Zeit als Physiker und speziell über seine Unfähigkeit berichtete, die Kernspaltung als fast triviale Erklärung der entsprechenden Experimente zu erkennen, bestätigte er die Interviewerin¹², die ihm unterstellte: »The theoretical physical problems never seemed to have really caught your wholehearted interest.« Bohrs Vortrag veranlasste Delbrück, sein Interesse der Biologie zuzuwenden. 1937 emigrierte er in die USA und wurde dort zum intel-

¹² Harding 1978

lektuellen Kopf der entstehenden Molekulargenetik. Aus seiner *Phagenschule*, benannt nach den Bakteriophagen, Bakterienviren, die als einfach handhabbares Untersuchungsobjekt dienten, ging u. a. James Watson hervor, einer der beiden Entdecker der DNA-Doppelhelix.

Bohrs Vortrag hatte in Delbrück die Hoffnung geweckt, dass im wissenschaftlichen Verständnis des Lebens eine Qualität der Erkenntnis zu erwarten sei, die der Quantentheorie in der Physik entspreche. Speziell vermutete er zunächst, dass die Betrachtung des Lebens gemäß des Komplementaritätsprinzips ein Paradox aufzeigen könnte, dass den Weg zu einer solchen tieferen Gesetzmäßigkeit weisen würde.¹³ Allerdings stieß die von Delbrück angeführte Molekulargenetik nicht auf ein solches Paradox und erbrachte nicht die erhoffte Neuerung in der Wahrnehmung der Realität. Seine Enttäuschung über den »lächerlich einfachen Trick« (»ludicrously simple trick«), das »mystery of gene replication« durch die Doppelhelix zu erklären, konnte er in der wissenschaftlichen Zusammenschau *Mind from Matter?*, die er am Ende seines Schaffens verfasste, nicht gänzlich verhehlen.¹⁴

Gunther Stent attestierte seinem Lehrer: »Through Delbrück, Bohr's epistemology became the intellectual infrastructure of molecular biology [...]. It provided [...] philosophical guidance for navigating between the Scylla of crude biochemical reductionism, inspired by nineteenth century physics, and the Charybdis of obscurantist vitalism, inspired by nineteenth century romanticism.«¹⁵ Heute mag man sich fragen, ob die Molekularbiologie dem »crude biochemical reductionism« tatsächlich entgangen ist oder nicht ihr Erfolg gerade diesen Reduktionismus bestätigt. 1949, in jener Zeit als Delbrück seinen entscheidenden Einfluss auf die Biologie ausübte, vollzog Delbrück zumindest eine klare Abgrenzung zur Atomphysik: »[We] may find features of the living cell which are not reducible to atomic physics but whose appearance stands in a complementary relationship to those of atomic physics«¹⁶. Allerdings ließ er – anders als Bohr – auch das aus der Quantentheorie verallgemeinerte Komplementaritätsprinzip nicht den Rang eines die Molekularbiologie konkret limitierenden Gesetzes annehmen. Noch in dessen letzten Lebensjahr 1962 forderte Delbrück Bohr zu einem Vortrag auf, um die Vorstellungen zu *Licht und Leben* zu überdenken.¹⁷ Delbrücks eigene Auseinandersetzung mit dem Komplementaritätsprinzip blieb offen. So könnte er – entgegen Stents These – die Molekularbiologie auch vor ei-

ner Behinderung durch Bohrs Epistemologie bewahrt haben. Er erzeugte einen Freiraum, in dem es möglich war, unabhängig von den Vorgaben aus Physik und Chemie nach den Prinzipien der Molekulargenetik zu forschen, die zu Zeiten der Phagengenetik als abstrakter Formalismus entwickelt wurden. Sein später selbst eingestandener Mangel an »wholehearted interest« für die theoretische Physik (s. o.) mag die persönliche Seite gewesen sein, die ihm erlaubte, diesen Freiraum zu schaffen.

Während Delbrücks Einstellung zur weiteren Entwicklung der Molekularbiologie vielleicht als ambivalent bezeichnet werden kann, entwickelten andere Quantenphysiker, die von Bohrs Komplementaritätsprinzip überzeugt waren, eine ablehnende Einstellung. Das kann am Beispiel von Wolfgang Pauli aufgezeigt werden.¹⁸ Pauli stieß sich am Zeitbegriff der Biologie, welche offenbar die Krise dieses Begriffs, den die moderne Physik erzeugt hatte, ignorierte. Im Gegensatz zur wahrgenommenen Zeit ist die Zeit in der Quantentheorie ein reversibler Parameter. Die reversible quantenphysikalische Zeit und die ablaufende psychische Zeit können laut Pauli als komplementär betrachtet werden. Über diese Kritik des Zeitbegriffs gelangte Pauli zu einer Rehabilitierung teleologischer Erklärungen und lamarckistischer Positionen in der Biologie. Damit geriet er in Konflikt mit der Molekularbiologie. Das von quantentheoretischen Erwägungen induzierte Komplementaritätsprinzip war also nicht notwendigerweise förderlich für die Entwicklung der Molekularbiologie. In der Tat haben sich Biologen, die einen synthetischen, gestalterfassenden Ansatz gegen den molekularbiologischen Ansatz verteidigten, auf das Komplementaritätsprinzip berufen¹⁹.

What is life?

Erwin Schrödinger war eine weitere prominente Figur der Quantenphysik, deren Überlegungen zur Biologie auch dort entscheidende Wirkung hatte. Schrödinger entwickelte die nach ihm benannte Grundgleichung der Quantentheorie, mit der »Quantenspringerei« (zitiert nach von Weizsäcker²⁰) und der grundsätzlichen Unbestimmtheit des unbeobachteten Zustandes konnte er sich aber nicht abfinden. Dies verdeutlichte er am Beispiel eines makroskopischen Objektes, nämlich der berühmten Katze²¹, deren Leben vom Zustand eines mikrophysikalischen Objekts

¹⁸ Atmanspacher
und Primas
2006

¹⁹ Vogel 1972

²⁰ von
Weizsäcker
1985

²¹ Schrödinger
1935

abhängt. Wenn die mikrophysikalischen Zustände superponiert sind, so folgerte Schrödinger, müsse die Katze eine Superposition von lebendem und totem Tier darstellen, solange ihr Zustand nicht beobachtet werde, eine Implikation, die Schrödinger als absurd empfand. Als Gegner der Kopenhagener Deutung versuchte er diese durch das biologische Beispiel ad absurdum zu führen.

Als Erklärung organismischer Ordnung erwartete Schrödinger neue Gesetzmäßigkeiten, die mit den quantenphysikalischen Ergebnissen vereinbar sind, aber über diese hinausgehen. Er skizzierte seine Überlegungen in einem 1944 erstmals erschienenen Essay mit dem ambitionierten Titel *What is life?*²² Schrödinger orientierte sich darin an einer nahezu trivialen Alternative. Er unterschied »Ordnung aus Ordnung« von »Ordnung aus Unordnung«. Beides förderte bedeutende Entwicklungen. »Ordnung aus Unordnung« deutete er thermodynamisch im Sinne des Ordnungserhalts durch Entropieexport (»feeding on negative entropy«), was die Theorie dissipativer Strukturen anregte, wie deren Vordenker Prigogine rückblickend betonte.²³ Für die Entwicklung des Gedankens »Ordnung aus Ordnung« ließ sich Schrödinger von einer zuvor kaum bekannt gewordenen Arbeit von Timoféeff-Ressovsky, Zimmer und Delbrück anregen, die nahelegte, dass es sich bei Genen um Makromoleküle handelt.²⁴ Schrödinger forderte als Substrat der geordneten Vererbung einen »aperiodischen Kristall« als ausreichend stabilen molekularen Träger der genetischen Informationscodierung. Dieses Postulat hatte eminenten Einfluss auf die Gründergeneration der Molekularbiologie.²⁵ Die DNA-Doppelhelix nach Watson und Crick enthält einen aperiodischen Stapel komplementärer Basen.

Schrödinger argumentierte, dass die Stabilität von Makromolekülen nur durch die Quantentheorie erklärt werden könne und die Biologie insofern darauf aufbaue. Abgesehen von molekularen Fluktuationen komme dem Quantenindeterminismus dagegen »keine biologisch relevante Rolle« zu. Tatsächlich sind beide Entwicklungen, die Schrödingers *What is life?* anregte, auf dem Boden der klassischen Physik geblieben. Schrödingers Ruf als Quantenphysiker hat sicher zum Erfolg seines Buches beigetragen, quantentheoretische Anschauungsweisen hat er jedoch damit eher von der Biologie ferngehalten. So ist etwa der Begriff der *komplementären Basen*, den die Molekulargenetik verwendet, ohne jede epistemologische Konnotation.

²² Schrödinger 1948

²³ Prigogine 1992

²⁴ Timoféeff-Ressovsky et al. 1935

²⁵ Jacob 1970, Yoxen 1979, McKaughan 2005

Perutz hat Schrödingers Überlegungen in *What is life?* retrospektiv scharf kritisiert: »[What] was true in his book was not original, and most of what was original was known not to be true even when it was written.«²⁶ Zu seiner Verteidigung sei erwähnt, dass Schrödinger selbst einräumte, kein Biologe zu sein, so dass ihm Unkenntnis der zeitgenössischen Forschung nachgesehen werden muss. Wichtiger ist, dass Perutz die Dimension von Schrödingers Diskussion nicht erkannte, nämlich die abstrakte Frage nach der Entfaltung von Ordnung und damit implizit nach dem Wesen der Information, womit Schrödinger vorwegnahm, was die Biologie seither beschäftigt.²⁷ Das Thema Information gewinnt auch in der Quantentheorie zunehmend an Bedeutung.²⁸ Hier könnten sich zukünftig neue Berührungspunkte finden.

²⁶ Perutz 1987,
558

²⁷ Jacob 1970,
Yoxen 1979

²⁸ Zurek 2002

»Quantenbiologie« und NS-Ideologie

Pascual Jordan war wie Heisenberg, Pauli oder Dirac eines der ›Wunderkinder‹, die, kaum zwanzigjährig, die mathematische Physik der Quantentheorie vorantrieben. Mit Beginn der 30er Jahre wandte auch Jordan sein Interesse der Biologie zu. Seine *Quantenbiologie* sollte eine Alternative darstellen zum mechanistisch-deterministischen Ansatz, den in der Physik die Quantentheorie unterlaufen habe und der nun auch in der Biologie zu überwinden sei.²⁹ Jordan suchte zunächst die Nähe zu antireduktionistisch, holistisch orientierten Biologen. Ihn interessierten jedoch weniger Gestaltprinzipien als vielmehr Erklärungen für Gestaltveränderungen bzw. für deren sprunghafte und unvorhersagbare Natur. Jordan vermutete mikroskopische, quantentheoretisch zu deutende Steuerungszentren, die teleologisch operierten. Mit dem Ziel, seine Vorstellungen empirisch zu untermauern, machte sich Jordan ab dem Ende der 30er Jahre die sogenannte *Treffertheorie* zu Eigen. Im Rahmen dieser Theorie wurde strahleninduzierte Mutagenese modelliert und aus Dosis-Effekt-Kurven auf die Zahl getroffener mikroskopischer Ziele geschlossen. Die Treffertheorie hat historische Bedeutung für die Entwicklung der Molekulargenetik, denn sie förderte die Deutung von Genen als Moleküle. Eine frühe, an unbedeutender Stelle publizierte, aber spätestens durch Schrödingers *What is life?* (s. o.) bekannt gewordene Arbeit in diesem Zusammenhang stammt von Delbrück und Kollegen.³⁰

³⁰ Timoféeff-
Ressovsky et al.
1935

Gleichzeitig mit seinen quantenbiologischen Vorstellungen produzierte Jordan zunächst unter Pseudonym und ab 1933 als Mitglied der NSDAP unter eigenem Namen antidemokratische, d. h. die Mechanismen der liberalen Willensbildung verurteilende Publikationen, die dem »Führerprinzip« huldigten. Auf den Zusammenhang zwischen den politischen und biologischen Thesen hat Beyler hingewiesen.³¹ In Publikationen Jordans aus den 40er Jahren werden die mikroskopischen Steuerungszentren der Zelle als Beispiel dafür benannt, dass die gesamte Natur dem Führerprinzip gehorche. Dementsprechend gehörte laut Jordan die Zukunft auch politisch solchen Strukturen, die instrumental effizient einem rigorosen Willen unterworfen seien.³² Inwieweit Jordan, der als freundlich, aber persönlich unsicher beschrieben wurde, noch seinem wissenschaftlichen Verstand gehorchte oder schon einem politischen Fanatismus bzw. Opportunismus unterlag, ist schwer zu sagen. Für Opportunismus sprechen seine willfähigen Geheimberichte über Kongresse im Ausland.³³ Reiner Opportunismus scheint nicht vorgelegen zu haben, denn Jordan lehnte eine völkische Bewertung wissenschaftlicher Ergebnisse auch nach 1933 ab.³⁴ Freilich tat er dies nur, weil er darin eine Beeinträchtigung der Funktion der Wissenschaft im Zeitalter der »zunehmenden Technisierung des Krieges« erkannte.³⁵ Jordan hatte eindeutige organisatorische Vorstellungen zur diesbezüglichen Zweckbindung der Naturwissenschaft³⁶ (übrigens mit fataler Ähnlichkeit zu heutigen Vorstellungen dieser Art, auch wenn der von Jordan avisierte kriegerische Zweck eines deutschen »Willens zur Macht« nicht mit dem heutigen ökonomischen Zweck identisch ist.) Dass er den, seinem teleologischen Ansatz eigentlich nahe stehenden Lamarckismus (also die Idee der Vererbung erworbener Charakteristika) aufgab, um stattdessen in der darwinistischen Position eine naturalistische Begründung der NS-Rassenideologie zu behaupten, deutet an, dass Fanatismus oder Opportunismus schließlich die Oberhand über seine grundlagentheoretischen Ansätze gewannen.³⁷

In Jordans Quantenbiologie, die zwischen holistischem Antireduktionismus und *treffertheoretischem* Reduktionismus oszillierte, spiegelte sich laut Beyler der virulente Konflikt innerhalb des Nationalsozialismus, der eine »völkische«, antiwissenschaftliche Propaganda betrieb, aber einen technologisch effizienten Apparat aufbaute.³⁸ Diesem Gedanken soll hier nicht weiter nachgegangen werden. Von Interesse ist dagegen die Verbin-

dung Jordans mit anderen Quantenphysikern, die sich der Biologie zu-
 wandten. So wurde auch Jordans biologisches Interesse durch Bohrs Vor-
 lesung *Licht und Leben* (1932) stimuliert und lud dieser speziell Jordan
 noch 1936 zu einer Konferenz über Kausalität in Physik, Biologie und
 Psychologie ein³⁹, so hat Heisenberg 1941 Jordans *treffertheoretischen* An-
 satz begrüßt und ihm 1943 zu einer Professur in Berlin verholfen, und so
 führte Pauli Jordans holistische Ideen in seine Korrespondenz mit C.G.
 Jung ein, der daran Gefallen fand.⁴⁰ Zwar haben sich Bohr, Delbrück
 und insbesondere Schrödinger⁴¹ spätestens ab der zweiten Hälfte der 30er
 Jahre von Jordans Positionen distanziert, die Frage kommt jedoch auf,
 ob Jordans *Quantenbiologie* nicht eine irrationalistische Wurzel letztlich
 der Quantentheorie überhaupt offenlegte. Vielleicht konnte sich nur im
 Schutz des »großen Nebels aus dem Norden«, wie die Kopenhagener
 Deutung der Quantentheorie heute bisweilen bezeichnet wird, nachdem
 ihre artifizielle Trennung von klassischer und quantenphysikalischer Welt
 für viele als überwunden gilt⁴², eine Theorie der Materie entwickeln, die
 sich der Anschaulichkeit entzieht. In diesem Nebel konnte aber offenbar
 allerlei gedeihen, was am Beispiel von Jordans biologischen Thesen deut-
 lich wird. Auch die Molekularbiologie hat zunächst vom Nimbus und
 von der Aufbruchsstimmung Bohrs und seiner Schüler profitiert. Für
 ihre weitere Entwicklung musste sie sich aber diesem Einfluss entziehen.
 Denkbar ist, dass die beiden Quantenphysiker, die die Molekularbiolo-
 gie maßgeblich beförderten, nämlich Delbrück und Schrödinger, auch
 deshalb so wirken konnten, weil sie in angelsächsische Länder emigriert
 waren. Allerdings kommen heute quantenbiologische Spekulationen
 vorwiegend aus dem angelsächsischen Raum. Das mag mit einer größe-
 ren Unbefangenheit nach dem zweiten Weltkrieg zusammenhängen. So
 findet sich Jordans Versuch, die Nicht-Determiniertheit des menschli-
 chen Denkens durch die Quantentheorie zu erklären, in der Theorie von
 Roger Penrose wieder, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

Objective reduction

Die besondere Bedeutung des Messprozesses und der Rolle, die laut der
 Kopenhagener Deutung der Beobachter dabei zu spielen scheint, hat in
 der Quantentheorie zur Frage nach dem Bewusstsein geführt.⁴³ Bohr,

³⁹ Hoffmann
1988

⁴⁰ Beyler 1996

⁴¹ Schrödinger
1936

⁴² Zeh 2001

⁴³ Atmanspacher
2004

Delbrück, Schrödinger und viele andere haben dazu Stellung genommen. Wigner setzte Schrödingers Katzenmetapher im Sinne einer Iteration von Beobachtern fort (Beobachter des Beobachters; »Wigners Freund«) mit der Frage, bei welchem Beobachter der Kollaps der Zustandsfunktion wohl einträte. Pauli entwickelte in Anlehnung an Jung den Gedanken einer Welt jenseits von Materie und Bewusstsein (*unus mundus*), die durch die reversible Beschreibung der Quantentheorie und die zeitlich gerichtete, kausal geordnete Wahrnehmung des Bewusstseins komplementär erfasst wird.

Andere suchen rein physikalische Erklärungen. Ein kühner und in vielen Aspekten hypothetischer Entwurf stammt von Roger Penrose.⁴⁴ Er ^{44 Penrose 1995} beginnt mit einer Kritik an der Vorstellung, dass das Denken durch eine Datenverarbeitungsmaschine zureichend erklärt werden kann. Zum Beleg dieser These verweist er auf den seit Gödel bekannten Umstand, dass das Denken zu wahren, aber nicht maschinell berechenbaren Schlüssen gelangt, bzw. auf das sogenannte Halte-Problem für Turing-Maschinen, wonach nicht maschinell geschlossen werden kann, dass eine Maschinenberechnung nicht zum Schluss gelangt, d. h. nicht anhält. Zum Wesen der Nichtberechnung im Bewusstsein lässt sich Penrose durch die Quantentheorie führen, und zwar über den Kollaps der Zustandsfunktion (»reduction- bzw. R-Prozess« in Penroses Terminologie), durch den eine der Möglichkeiten, die die Zustandsfunktion beinhaltet, manifest wird. Penrose glaubt, dass dieser Vorgang physikalisch zu deuten ist (*objective reduction*, OR) durch eine noch auszuarbeitende Theorie der Quantengravitation. Er lehnt sich dabei an die sogenannte GRW-Theorie (benannt nach Ghirardi, Rimini und Weber, die sie 1986 formulierten) des spontanen Kollapses an. Als Indiz dafür, dass das Nicht-Berechenbare in dieser Weise physikalisch realisiert sein könnte, verweist Penrose auf geschlossene Raumzeitkurven, die mit der Gravitationstheorie gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie verträglich sind. Eine Turing-Maschine auf einer solchen Kurve ergibt, da ihre Zukunft zu ihrer Vergangenheit wird und also gegenwärtig ist, physikalisch, ob sie anhält oder nicht.

In der gravitationsbedingten OR wäre die Halbwertszeit der Superposition von Raumzeiten umso kleiner, je größer der Unterschied in den (Selbst)-Energien der superponierten Geometrien wäre.

In Zusammenarbeit mit Hameroff entwickelte Penrose die Vorstellung, dass Mikrotubuli der zelluläre Bestandteil sind, an dem sich Be-

⁴⁵ Hameroff und Penrose 1996 wusstsein etabliert.⁴⁵ Mikrotubuli sind röhrenförmige Strukturen im intrazellulären Netzwerk, die aus einer regelmäßigen Anordnung von Monomeren bestehen, bzw. dynamisch auf- und abgebaut werden. Sie sind wesentlich an zellulären Bewegungs-, Ordnungs- und Teilungsprozessen beteiligt. Unter der Annahme, dass die Monomere in den Mikrotubuli unterschiedliche Konformationen annehmen können, behaupten Hameroff und Penrose, dass Mikrotubuli nicht nur als Netzwerk Information im klassischen Sinne prozessieren, sondern dass sich in ihnen auch kohärente Superpositionen der Monomer-Konformationen etablieren können, die sich auf das Polymer ausdehnen und die Funktion von Quantencomputern (s. u.) annehmen. Mit zunehmender Ausdehnung, d. h. Energiedifferenz der superponierten Geometrien würden die kohärenten Zustände instabil und »kollabierten« spontan im Sinne der OR auf einen nicht vorhersagbaren klassischen Zustand. Durch strukturelle Verbindungen der Mikrotubuli soll dieser Prozess orchestriert sein (»Orch-OR«) und so Bewusstsein im Whiteheadschen Sinne als *occasion of experience* bzw. durch Repetition einen diskontinuierlichen Strom solcher *occasions* erzeugen.

Die Vorstellungen von Penrose und Hameroff profitieren vom Umstand, dass Penrose einen hervorragenden Ruf sowohl als Mathematiker als auch als Physiker hat, werden aber sowohl von Biologen als auch von Physikern sehr skeptisch betrachtet. Die kaum vorhandene empirische Basis wie auch die über weite Strecken hypothetische Theorie wurden scharf kritisiert. Fraglich erscheint, wie die angenommenen superponierten Zustände ausreichend lange vor der Dekohärenz im intrazellulären Milieu bewahrt werden und wie sie über Zellgrenzen hinweg einen neuronalen Zellverband erfassen können.⁴⁶

⁴⁶ Tegmark
2000

Andere neuere Entwicklungen

Davies hat in einem Artikel aus jüngerer Zeit die möglichen Bedeutungen der Quantenphysik für Lebensvorgänge zusammengefasst. Er meinte damit quantenphysikalische Prinzipien jenseits der Erklärung des klassischen chemischen Verhaltens von Molekülen, also jenseits einer Erklärung des »ball-and-rod view of life [...] according to which all essential biological functions may be understood in terms of the arrangements

and rearrangements of classical molecular units of various shapes, sizes and stickiness.«⁴⁷ Quantenphänomene könnten laut Davies a) für den Beginn der biologischen Evolution entscheidend gewesen sein, b) makromolekulare biologische Prozesse in einer anders nicht zu erklärenden Weise beherrschen, und es könnten c) evolvierende Spezies als selektiven Vorteil das Potential der Quantenphysik in der Informationsverarbeitung »entdeckt« haben. (»This is an extension of the dictum that whatever technology humans invents, nature normally gets there first.«⁴⁸)

⁴⁷ Davies 2004,
70

⁴⁸ Davies 2004,
71

a) Bei der Überlegung über den Beginn der Evolution geht es um die Frage, wie sich in der präbiotischen Suppe jene Untergruppe von Molekülen etablieren konnte, die die Eigenschaft der Selbstreplikation haben. Davies verweist auf eine Hypothese von McFadden, die sich von Modellen der molekularen Evolution auf dem Boden der klassischen Thermodynamik abhebt. Demnach könnte eine quantenphysikalische Superposition der verschiedenen kombinatorischen Ausformungen eines Polymers (Polynukleotids) angenommen werden und »a self-replicator would trigger a ›collaps of the wave function‹ (i.e., strong decoherence); thus ›locking in‹ the ›discovery‹ of this crucial molecule.«⁴⁹ Dieser quantenphysikalische Suchalgorithmus wäre deutlich effizienter als jeder klassische, da nicht jede molekulare Möglichkeit de facto synthetisiert werden müsste. In diesem Zusammenhang erwähnt Davies auch, dass die Quantentheorie eine Evolution gemäß dem klassischen Zeitpfeil nicht erzwingt. Dies erinnert an die biologischen Überlegungen von Pauli (s. o.).

⁴⁹ Davies 2004,
76

b) Als eine mögliche Bedeutung der Quantenphysik für makromolekulare biologische Vorgänge erwähnt Davies die maximal mögliche Dauer T eines zeitlich koordinierten Prozesses. Zurückgehend auf Überlegungen von Salecker und Wigner⁵⁰ lässt sich nämlich aus Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation für die Laufzeit T einer Uhr der Masse m und Größe l ein Maximum ableiten, wonach $T < m^2 l / \hbar$, wobei \hbar das Planck'sche Wirkungsquantum ist. (Vereinfachte Erklärung: Eine Uhr bestehe aus einem Teilchen der Masse m , dessen Ort die Zeit anzeigt. Das Teilchen bewege sich in einem Bereich, dessen Ausmaß der Größe l der Uhr entspricht. Das Teilchen und damit die Genauigkeit der Uhr gehorchen Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation, $\Delta p > \frac{1}{2} \hbar / \Delta x$. Da Impuls und Geschwindigkeit über die Masse proportional verknüpft sind, $\Delta p = m \Delta v$, ergibt sich eine

⁵⁰ Salecker und
Wigner 1958

Unbestimmtheit der Geschwindigkeit von $\Delta v > \frac{1}{2}h/(m\Delta x)$ und somit nach einer Zeit T eine zusätzliche Unbestimmtheit des Ortes von $T\Delta v > \frac{1}{2}Th/(m\Delta x)$. Die räumliche Zeitanzeige hat dann also eine Ungenauigkeit von $Ug > \Delta x + \frac{1}{2}Th/(m\Delta x)$. Das Minimum dieser Ungenauigkeit ergibt sich für den Wert von $\Delta x = (\frac{1}{2}Th/m)^{1/2}$ und beträgt $Ug_{\min} = (2Th/m)^{1/2}$. Wenn diese Ungenauigkeit die Größe l der Uhr erreicht, ist eine Zeitangabe nicht mehr möglich. Daher gilt $l > (2Th/m)^{1/2}$, was bis auf den Faktor 2 der obigen Formel entspricht, $T < mPl/h$. Die Zeitdauer der Faltung einer vom Gen abgelesenen Aminosäurenkette zur Konfirmation des fertigen Proteins liegt tatsächlich in dieser Größenordnung, wenn m und l aus durchschnittlicher Zahl, Masse und Größe der Aminosäurenuntereinheiten berechnet werden. Auch für die Arbeitsschrittdauer der DNA-Polymerase, also des Enzyms, das die DNA repliziert, zeigt Davies einen entsprechenden Zusammenhang, der auf die Quantenunschärfe der Synchronisation als limitierenden Faktor hinweist.

Davies nennt weitere Quanteneffekte, die im Größenbereich zwischen Makromolekülen und Zellorganellen auftreten könnten, u. a. die Quantisierung nonlinearer Vibrationen (Phononen), die laut einer vergleichsweise frühen Überlegung von Fröhlich an der Oberfläche biologischer Membranen zu finden sein könnten.

c) Hinsichtlich der informationstechnischen Optionen, die die Quantenphysik bietet und die sich Organismen schon zu Nutzen gemacht haben könnten, verweist Davies auf den Quantencomputer, an dessen technischer Realisierung derzeit intensiv gearbeitet wird. Die Idee geht auf Feynman zurück und wurde von Deutsch weiterentwickelt.⁵¹ Der Vorteil eines Quantencomputers gegenüber einem herkömmlichen Computer besteht in »massivem Parallelismus«, der sich aus dem Superpositionsprinzip ergibt. Im Gegensatz zur klassischen Informationseinheit (»bit«), d. h. zur 0-1-Alternative, ist das sogenannte »qubit« die Superposition dieser beiden Alternativen. Während in einem String von n klassischen Komponenten n bit enthalten sind und bearbeitet werden können, umfassen solche Komponenten, sofern sie ein kohärentes Quantensystem bilden, n qubit, d. h., die Superposition von 2^n orthogonalen Eigenvektoren. Kohärente Prozessierung dieses Quantensystems entspräche einer parallelen Verarbeitung aller alternativen Versionen des klassischen Strings. Im besten Falle ist also eine exponentielle Beschleunigung

⁵¹ Milburn
1998,
Bennett und
DiVicencenzo
200

von Rechenvorgängen möglich. Für eine große Klasse von Problemen ist allerdings nur eine geringere (s.u.) und für manche Probleme gar keine Beschleunigung möglich.

Eine Quantenberechnung verlangt die Präparation eines initialen Zustandes, die (reversible, »unitäre«) quantenphysikalische Entwicklung der superponierten Wellenfunktion(en) gemäß der Schrödingergleichung und eine Messung, die das Ergebnis ausliest, indem sie den Kollaps der Wellenfunktion bzw. starke Dekohärenz und den Übergang in einen klassischen Zustand herbeiführt. Allerdings ist die technische Umsetzung, bei der unkontrollierte Dekohärenz, also Wechselwirkung mit der Umgebung vermieden werden muss, anspruchsvoll und bisher nicht in ausreichendem Umfang vollzogen. Auch das Auffinden von real relevanten Problemlösungen, bei denen die Vorteile des Quantencomputers zum Zuge kommen, ist nicht trivial. Shors Algorithmus zur Faktorisierung (Primzahlzerlegung) großer Zahlen war das erste solcher Problemlösungen, denn der für herkömmliche Computer exponentiell mit der Zahl wachsende Aufwand einer Faktorisierung ist von Bedeutung im Datenschutz.

Biologisch von Interesse könnte Grovers Algorithmus sein. Dieser bezieht sich auf den Rechenaufwand bei der Zielsuche unter n ungeordneten Möglichkeiten und erbringt für Quantencomputer einen Vorteil gegenüber Suchalgorithmen auf klassischen Computern, der nicht exponentiell, aber doch immerhin mit der Wurzel der Zahl zu durchsuchender Objekte ($n^{1/2}$) wächst. Davies zitiert Patel, der Grovers Algorithmus bei der Polynukleotid- und Proteinsynthese wiederzuerkennen glaubte: Bei $n = 4$, entsprechend der vier verschiedenen Nukleotide, die zur Basenpaarung bei der DNA- oder RNA-Synthese in Frage kommen, braucht Grovers Algorithmus nur eine Suchoperation zur Identifikation des richtigen (im Gegensatz zu 2 *bit*, die bei klassischer Suche anfallen). Mit 3 Suchoperationen kann gemäß Grovers Algorithmus das richtige unter $n = 20$ Objekten gefunden werden, was auffälligerweise den 20 verschiedenen Aminosäuren entspricht, die bei der Proteinsynthese Nukleotid-Triplets (»Codons«) zugeordnet werden. Vielleicht bewahrheitet sich hier das von Davies zitierte Diktum (s. o.), »that whatever technology humans invents, nature normally gets there first«; vielleicht handelt es sich aber auch um reine Koinzidenz der Zahlen. Dem Diktum könnte abschließend die Frage entgegengehalten werden, ob sich biologische

Systeme, die ja auf Selbstkontrolle und damit eindeutige Selbstbeobachtung angewiesen sind, vielleicht nicht zufällig in einer Dimension entwickelt haben, in der, wie die Chemie zeigt, eine klassische Betrachtung möglich wird.

Danksagung: Ich danke Herrn Klaus Freudenberg für kritische Durchsicht und stimulierende Diskussionen.

Literatur

- Arndt, M. et al.: Wave-particle duality of C60 molecules. In: *Nature* 401 (1999), 680-682.
- Aspect, A. et al.: Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities. In: *Physical Review Letters* 49 (1982), 91-94.
- Atmanspacher, H.: Quantum approaches to consciousness. In: Zalta, E.N. (Hg.): *Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2004)*.
<http://plato.stanford.edu/archives/win2004/entries/qt-consciousness/>
- Atmanspacher, H.; Primas, H.: Pauli's ideas on mind and matter in the context of contemporary science. In: *Journal of Consciousness Studies* 13 (2006), 5-50.
- Audretsch, J.: Die Unvermeidbarkeit der Quantenmechanik. In: Mainzer, K.; Schirmacher, W. (Hg.): *Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik*. Mannheim 1994, 75-106.
- Bacciagaluppi, G.: The role of decoherence in quantum theory. In: Zalta, E.N. (Hg.): *Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2005)*.
<http://plato.stanford.edu/archives/sum2005/entries/qm-decoherence/>
- Bennett, C.H.; DiVincenzo, D.P.: Quantum information and computation. In: *Nature* 404 (2000), 247-255.
- Bohr, N.: Licht und Leben. In: *Naturwissenschaften* 21 (1933), 245-250.
- Bohr, N.: Licht und Leben – noch einmal. In: *Naturwissenschaften* 72 (1963), 725-727.

- Davies, P.C.W.: Does quantum mechanics play a non-trivial role in life?
In: *Biosystems* 78 (2004), 69-79.
- Delbrück, M.: A physicist looks at biology. In: *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 38 (1949), 173-190.
- Delbrück, M.: *Mind from matter? An essay on evolutionary epistemology*. Palo Alto 1986.
- Folse, H.J.: *The Philosophy of Niels Bohr: The framework of complementarity*. Amsterdam 1985.
- Gambini, R. et al.: Realistic clocks, universal decoherence, and the black hole information paradox. In: *Physical Review Letters* 93, 240401 (2004).
- Haken, H.; Wolf, H. C.: *Atom- und Quantenphysik. Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. 5. verbess. u. erweit. Auflage. Berlin 1993.
- Hameroff, S.; Penrose, R.: Conscious Events as Orchestrated Space-Time Selections. In: *Journal of Consciousness Studies* 3 (1996), 36-53.
- Harding, C.: *Interview with Max Delbrück*. Oral History Project, California Institute of Technology Archives, Pasadena 1978.
- Heisenberg, W.: *Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie*. In: Heisenberg, W.: *Physik und Philosophie*. Stuttgart 1959, 27-42.
- Hoffmann, D.: Zur Teilnahme deutscher Physiker an den Kopenhagener Physikerkonferenzen nach 1933, sowie am 2. Kongreß für Einheit der Wissenschaften, Kopenhagen 1936. In: *NTM – Schriftenreihe zur Geschichte der Naturwissenschaften, Technik und Medizin* 25 (1988), 49-55.
- Jacob, F.: *La logique du vivant*. Paris 1970.
- Jammer, M.: *Der Begriff der Masse in der Physik*. Darmstadt 1964.
- Jordan, P.: Quantenphysikalische Bemerkungen zur Biologie und Psychologie. In: *Erkenntnis* 4 (1934), 215-252.
- Jordan, P.: Olympiade der Wissenschaft. In: *Der Student in Mecklenburg-Lübeck* (5.12.1936), 8-9.
- Jordan, P.: *Physik und das Geheimnis des organischen Lebens*. Braunschweig 1941.
- Jordan, P.: Naturwissenschaft im Umbruch. In *Deutschlands Erneuerung* 25 (1941a), 452-458.
- Koch, J.: *Dekohärenz und Quanten-Fehlerkorrektur*. Berlin 2002.

- Krips, H.: Measurement in quantum theory. In: Zalta, E.N. (Hg.): *Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 1999)*.
<http://plato.stanford.edu/archives/win1999/entries/qt-measurement/>
- McKaughan, D.J.: The influence of Niels Bohr on Max Delbrück. Revisiting the hopes inspired by »light and life«. In: *Isis* 96 (2005), 507-529.
- Milburn, G.J.: *The Feynman Processor*. Reading 1998.
- Penrose, R.: *Schatten des Geistes. Wege zu einer neuen Physik des Bewusstseins*. Deutsche Übersetzung. Heidelberg 1995.
- Perutz, M.F.: Physics and the riddle of life. In: *Nature* 326 (1987), 555-558.
- Prigogine, I.: Schrödinger and the riddle of life. In: Ji, S. (Hg.): *Molecular theories of cell life and death*. New Brunswick 1991, 238-242.
- Röpke, G.: *Quantenphysik*. Berlin 1983.
- Salecker, H.; Wigner E.P.: Quantum limitations of the measurement of space-time distances. In: *Physical Review* 109 (1958), 571-577.
- Schrödinger, E.: Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. In: *Naturwissenschaften* 23 (1935), 807-812.
- Schrödinger, E.: Indeterminism and free will. In: *Nature* 138 (1936), 13-14.
- Schrödinger, E.: *What is life?* Cambridge 1948.
- Schücking, E.L.: Jordan, Pauli, politics, Brecht, and a variable gravitational constant. In: *Physics Today* 52 (1999) 10, 26-31.
- Stent, G.S.: Introduction and Overview. In: Delbrück, M.: *Mind from matter? An essay on evolutionary epistemology*. Palo Alto 1986, 1-18.
- Tegmark, M.: The importance of quantum decoherence in brain processes. In: *Physical Review E* 61 (2000), 4194-4206.
- Timoféeff-Ressovsky, W. et al.: Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen: Mathematisch-Physikalische Klasse* 6 (1935), 190-245.
- Vogel, St.: Komplementarität in der Biologie und ihr anthropologischer Hintergrund. In: Gadamer, H.-G. / Vogler, P. (Hg.): *Neue Anthropologie. Band 1*. Stuttgart 1972, 152-194.
- Von Weizsäcker, C.F.: *Aufbau der Physik*. München 1985.
- Yoxen, E.J.: Where does Schroedinger's »What is life?« belong in the history of molecular biology? In: *History of Science* 17 (1979), 17-52.

Zeh, H.D.: Ist das Problem des quantenmechanischen Meßprozesses nun endlich gelöst? In: *Spektrum der Wissenschaft*, April 2001, 72.

Zurek, W.H.: Decoherence and the transition from quantum to classical – revisited. In: *Los Alamos Science* 27 (2002), 2-25.