

Adalbert Feltz

Quantenverschränkung ein Werkzeug der Evolution?

Veröffentlicht: 09.03.2019

Die Sicht auf eine mögliche quantenphysikalische Verschränkung von Teilbereichen unserer makroskopischen Wirklichkeit hat in den zurückliegenden Jahren beträchtlich an Boden gewonnen. Der Quantenverschränkung wurde in neueren Publikationen der Rang einer zweiten Quantenrevolution zuerkannt [1]. Im Vordergrund stehen bisher vorrangig neue Konzepte der Informationstechnologie und Informationsübertragung.

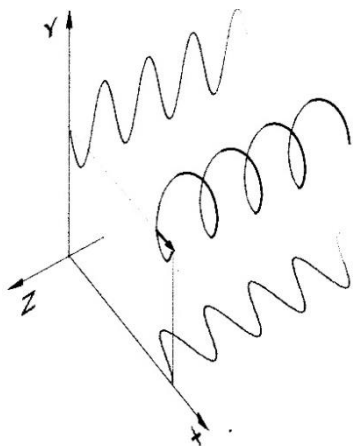


Abb.1: Überlagerung zweier zueinander senkrecht und um $-\pi/2$ phasenverschobener Wellen zu einer rechts zirkular polarisierten Welle $+\pi/2$ ergibt eine gegenläufige links zirkular polarisierte Welle. (Bild nach „Polarisation-Wikipedia“)

Es handelt sich um miteinander korrelierte physikalische Objekte, die ununterscheidbar sind und erst durch die vom Beobachter frei wählbare Art der Messung einer bestimmten Identität zuordenbar sind. Häufig handelt es sich um Objekt-Paare mit zueinander komplementären Eigenschaften, z.B. um vertikal und horizontal oder auch links- und rechtszirkular polarisierte elektromagnetische Wellen bzw. Photonen, die zeitgleich gemeinsam entstehen und unabhängig vom räumlichen Abstand zueinander ein Gesamtsystem bilden, dessen Zustand nicht aus den Zuständen und Eigenschaften seiner Bestandteile ableitbar ist, vielmehr nur als eigenständige Ganzheit auf einer abstrakt-mathematischen Ebene vollständig beschrieben werden kann [2,3]. Es erweist sich definitiv als unmöglich, im Fall vorliegender Verschränkung aus der Erscheinung und Beobachtung eines oder mehrerer der Einzelobjekte auf das Wesen der Gesamtheit zu schließen. Dass aber auch durch eine abstrakt-mathematische Beschreibung des Gesamtsystems, ohne eine bildhafte (korpuskuläre) Anschauung zu vermitteln, die Wirklichkeit hinreichend und in Übereinstimmung mit unserer Erfahrung vollständig erfasst werden kann, damit hinreichend erkennbar ist und eine praktische Nutzung somit möglich wird, wurde in einer vorangegangenen Abhandlung kommentiert [4].

Der dualen Natur sich ausbreitender elektromagnetischer Felder liegt offenbar gleichfalls eine dialektische Beziehung zwischen Wesen und Erscheinung zugrunde [5]. Seinem Wesen nach verhält sich Licht in Beugungsexperimenten wie eine sich ausbreitende elektromagnetische Transversalwelle. Bei der Wechselwirkung mit Korpuskeln, wie bei der Emission oder Absorption oder auch im Compton-Effekt, tritt sie dagegen als Photon in Erscheinung. Das Doppelspalt-Experiment führt allerdings bei hinreichend langer Ausföhrung mit einzelnen Photonen – erkennbar an Lichtblitzen auf dem Bildschirm (Absorption/Emission) – gleichfalls zum charakteristischen Beugungsmuster, wobei die Streu-

ung im Korpuskularbild durch die Heisenberg'sche Unschärfe-Relation $\Delta x * \Delta p \sim h$ eine Erklärung findet. Elektronen- und Neutronenstrahlen ebenso wie Molekularstrahlen, etwa von H_2 , ergeben am entsprechend angepassten Doppelspalt in gleicher Weise ein Beugungsmuster, und letzteres ist sogar für ein Strahlenbündel von C_{60} -Fulleren erhalten worden [6].

Bilden elektromagnetische Felder und deren zeitliche Veränderung in ihrem der Anschauung nicht unmittelbar zugänglichen, wohl aber abstrakt-mathematisch exakt beschreibbaren Wesen die tatsächliche Daseinsform der Materie, die sich bei Überschreiten bestimmter Energie-Grenzwerte, wie bei der Paarbildung, in Elementarteilchen und deren Antiteilchen mit Ruhemasse manifestiert, wobei diese Teilchen weiterhin Welleneigenschaften beibehalten?

Ausgehend von ersten experimentellen Belegen 1982 [7], die die mit dem EPR Paradoxon [8] verknüpfte Infragestellung einer universellen Gültigkeit der Quantenmechanik widerlegten, konzentriert sich die Forschung nach wie vor auf miteinander verschränkte Photonen, die in nichtlinearen optisch zweiachsigen Kristallen durch parametrische Fluoreszenz [9,10] unter Aufrechterhaltung ihrer Phasenbeziehungen (Kohärenz) erzeugt werden. Eingestrahlte Photonen, kurzzeitige Laserimpulse einer bestimmten Frequenz, ergeben bei optimaler Anordnung der Kristalle in hoher Ausbeute jeweils zwei Photonen mit halbiertes Frequenz, die sich in einem Öffnungswinkel voneinander entfernen, miteinander aber selbst über große Entfernungen korreliert bleiben. Deren Polarisationszustand erweist sich als unbestimmt. Erst die vom Beobachter willkürlich gewählte Einstellung des Detektors legt den Polarisationszustand des an einem Ort registrierten Photons fest, und damit ist zugleich ohne irgendeine Signalübertragung, allein aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein Gesamtsystem handelt, der komplementäre Polarisationszustand des Partner-Photons am anderen Ort gleichfalls festgelegt. Der Vorgang wird auch als Teleportation oder „beamen“ bezeichnet.

Außerhalb des Labors wurde der Zustand verschränkter Photonen wohl erstmals von Wiener Forschern 2004 über eine Länge von 600 m in einem Lichtwellenleiter unterhalb der Donau realisiert [11]. 2007 und 2012 wurde über die Teleportation verschränkter Photonen über eine Entfernung von 144 bzw. 143 km zwischen den Inseln Teneriffa und La Palma [12,13] berichtet. 2016 entsandte China in Zusammenarbeit mit den Wiener Physikern Zeilinger und Mitarbeiter einen Satelliten mit einer Apparatur, die verschränkte Photonen auf Abruf bereitstellt, wobei die verlustlose Ausbreitung überwiegend im luftleeren Raum den Nachweis von Quantenverschränkung zwischen zwei ca. 1200 km entfernten Orten auf der Erde ermöglichte [14,15]. 2017 konnte auf Grund der binären Komplementarität quantenverschränkter Photonen ein erstes abhörsicheres digitales Video-Telefonat zwischen Wien und Peking via Satellit mittels einer quantenverschränkten Laserlicht-Verbindung realisiert werden [16].

Bereits 2010/11 gelang die Verschränkung von Gitterschwingungen bestimmter Moden hochfrequenter optischer Phononen in zwei millimetergroßen Diamanten, die sich im Abstand von 15 cm befanden, indem nach Anregung mit ultrakurzen Laser-Impulsen nur die Emission eines gemeinsamen Photons mit entsprechend verminderter Frequenz festgestellt wurde. Dieses lässt sich nicht einem der beiden Kristalle gesondert zuordnen, woraus auf verschränkte Phononen in den beiden räumlich getrennten Kristallen geschlossen werden konnte [17]. Im Zusammenhang mit den breit gefächerten Interessen, Quantenverschränkung in der Informationstechnik und -übertragung nutzbar zu machen, richtet sich die Aufmerksamkeit neuerdings auf quantenverschränkte Vielteilchensysteme. Über erfolgversprechende Ansätze, diese durch Simulation näher zu erforschen, ist neuerdings berichtet worden [1,18].

Da der Zustand quantenverschränkter Photonen, die ihrem Wesen nach elektromagnetische Wellen sind, über hunderte Kilometer hinweg bestehen bleiben kann, erscheint es naheliegend zu vermuten, dass Quantenverschränkung angesichts der kurzen mittleren freien Weglängen und auf Grund der Wellennatur atomarer Teilchen sowie von Molekülen mit inneren Schwingungen in einem Vielteilchensystem zumindest temporär ebenfalls möglich ist. Handelt es sich um Gase oder fluide Medien, etwa auch um Ensembles von Biopolymeren in einem kolloiddispersen System, ist die thermische Bewegung der im ständigen Energieaustausch befindlichen Partikel in Betracht zu ziehen.

Als ein der Verschränkung elektromagnetischer Schwingungen entgegenwirkender Effekt erweist sich in einem mobilen Vielteilchensystem die mit der Brownschen Molekularbewegung verknüpfte Störung einer festen Phasenbeziehung, was zur Aufhebung der Kohärenz führt und den Bestand einer quantenphysikalischen Verschränkung auf stochastische, allenfalls temporär auftretende Ereignisse reduziert. C. Hörhammer greift in seiner Dissertation 2007 [19] das Modell einer quantenmechanischen Beschreibung der Brownschen Molekularbewegung [20,21] auf und zeigt in Modellrechnungen, dass im Fall moderater nicht-markovscher Einflüsse [22] der Verlust von Interferenzfähigkeit und Quantenkorrelation beträchtlich verzögert sein kann. Es werden Bedingungen genannt, die eine zeitliche Entwicklung von Korrelationen verschränkter Zwei-Moden-Zustände erwarten lassen. Die Ausbildung und Aufrechterhaltung verschränkter Quantenzustände in derartigen Vielteilchensystemen hat demnach zumindest für eine kurze Zeitspanne durchaus eine reale Chance.

Über Vielteilchen-Quantenverschränkung in einem biologischen System ist von M. Sarovar et al. [23] 2010 im Zusammenhang mit der Photosynthese berichtet worden. R.M. El-Shishtawy et al. [24] haben 2018 über den Mechanismus des Quanten-Energietransfers publiziert. Bestimmte Meeresalgen nutzen die quantenmechanisch kohärenten Anregungen ihrer Pigmentmoleküle bei der Photosynthese. Das grüne Schwefelbakterium *Chlorobium tepidum* nimmt mit seinen lichtsammelnden Chlorosom-Antennen Photonen auf und leitet die Anregungsenergie in elektronischer Form mittels eines Chromo-Proteids, dem sogenannten Fenna-Matthews-Olson-(FMO)-Komplex, zum Reaktionszentrum, wo die Photosynthese stattfindet. Die durch den FMO-Komplex vermittelte korrelierte Wirkung von Photonen ermöglicht die hohe Lichtausbeute der Photosynthese. Der FMO-Komplex besteht aus drei gleichen Proteinen mit jeweils sieben Bakteriochlorophyll-Molekülen oder Chromophoren, die nur teilweise benachbart sind. Auf experimentell ermittelte Anregungsenergien und energetische Kopplungen gestützt, führen Simulationen zu dem Resultat, dass bei Anregung zweier benachbarter Chromophore innerhalb von 100 fs alle 7 Chromophore im Abstand bis zu 2,8 nm in einen verschränkten Quantenzustand übergehen und demzufolge in Bezug auf den Anregungszustand ununterscheidbar sind. Für die Dauer der Aufrechterhaltung des verschränkten Zustandes wurden bei 77 K 5 ps, bei Raumtemperatur 2 ps ermittelt. Das ist vergleichsweise lang, folgt doch aus einer Abschätzung der mittleren Häufigkeit thermisch bedingter Kollisionen, dass in einem solchen Zeitintervall mindestens ca. 5 bis 10 Annäherungen stattfinden. Deren Wirkung beschränkt sich vermutlich vor allem auf eine Beeinflussung des Schwingungsspektrums im Grundzustand, so dass die Quantenkorrelation (Phasenbeziehung) im elektronisch angeregten Zustand der Chromophore länger bestehen bleiben kann.

Das Zustandekommen von quantenverschränkten elektromagnetischen Schwingungen (optischen Phononen), wie im Fall der beiden Diamantkristalle und die mögliche Effektivitäts-steigernde Wirkung Photonen-induzierter quantenverschränkter Anregungszustände in einem so fundamentalen Prozess wie der Photosynthese lassen es naheliegend erscheinen, dass Quantenverschränkung elektromagnetischer Wellen als ein möglicher Wirkungsmechanismus der Evolution auch bei der Entstehung der Artenvielfalt Bedeutung hatte und hat.

Joachim Bauer [25] macht im Ergebnis seiner molekular- und neurobiologischen Studien darauf aufmerksam, dass die für die Reproduktion sowie für die Proteinsynthese und damit für die Lebensfunktionen eines Organismus entscheidenden DNS-Abschnitte, die artspezifischen Gene, kooperatives und zugleich kreatives Verhalten erkennen lassen. Sie reagieren auf Veränderungen ihrer Umgebung zielgerichtet, indem sie dem „stress“ ausweichen. Evolution gründe sich demzufolge nicht, wie es der Darwinismus lehrt, zumindest nicht vorrangig, auf kontinuierliche Veränderungen, rein zufällig auftretende Mutationen und darauf folgende natürliche Auslese. B.C. McClintock [26] gelangte bereits Jahrzehnte zuvor zu der Erkenntnis: „Das Genom ist ein hochgradig wahrnehmungsfähiges Organ“ und „Zellen treffen weise Entscheidungen“.

Erdgeschichtliche Umbrüche und damit verbundene vergleichsweise rasche Veränderungen der Existenzbedingungen für lebende Organismen lösten, wie die Paläobiologie aus der Analyse von Ablagerungen in Sedimenten gezeigt hat, nachweislich genomische Entwicklungsschübe aus, die die

These einer nach Darwin vorrangig auf Statistik gegründeten Mutationsrate bei der Entwicklung der Arten widerlegen, so z. B. Stress-Situationen,

- wie die einer Erdvereisung zwischen 650 und 635 Mio Jahren, in deren Folge vor ca. 600 Mio Jahren erste mehrzellige Lebewesen auftraten, woran sich die Kambrische Arten-Explosion vor ca. 570 bis 530 Mio Jahren anschloss, und diese brachte die bilateralen und „oben/unten“-Baupläne aller späteren Lebewesen hervor (zitiert nach [25]),
- hervorgerufen durch Meteoriteneinschläge und/oder Vulkanismus, dadurch bedingte Klima- veränderungen, elektrische Entladungen in der Atmosphäre, langfristig wirkende, zumindest lokale Temperaturbelastung und/oder in Kombination mit Änderungen des pH-Werts,
- erhöhte UV-Strahlung nach Zerstörung der schützenden Ozonschicht durch starken Einfall kosmischer Strahlung.

Aus der Analyse von Primärgesteinen kann auf Grund des radioaktiven Zerfalls verschiedener Isotope auf das Alter der Erde relativ sicher geschlossen werden: $4,55 \pm 0,03 \cdot 10^9$ a [27], und ein vergleichbares Alter ergeben sowohl Messungen an Mineralproben vom Mond [28] als auch Untersuchungen an Meteoriten für das Sonnensystem insgesamt [29]. In dieser Phase der Herausbildung unseres Planetensystems muss für die Erde an der Oberfläche ein lang andauernder Zeitabschnitt stark reduzierender Bedingungen angenommen werden, denn Sauerstoff wurde an Wasserstoff und zu gesteinsbildenden Mineralien der Siderosphäre praktisch vollständig gebunden. In der Hydrosphäre unseres Wasserplaneten herrschten offenbar lokal und zeitlich schwankende Temperatur- und Druckbedingungen, die die Entstehung einer großen Vielfalt vor allem Kohlenstoff und Stickstoff, aber auch andere Elemente enthaltender Verbindungen in teilweise beträchtlicher Konzentration ermöglichten. Man schätzt die Mannigfaltigkeit organischer Verbindungen auf ca. 40 Millionen [30].

Es ist höchst erstaunlich, dass molekulare Bausteine zu Einheiten zusammenfanden, deren periodische Verknüpfung zu kettenförmigen Polymeren führte, die unter der Wirkung weiterer, auch katalytisch wirkender Makromoleküle, vor allem von Polypeptiden, sich als replikationsfähig erwiesen. Aus einer vermutlich sehr großen Anzahl verschiedener molekularer Aggregationen in der „Ursuppe“ hat sich jene Tripeleinheit eines **Nukleotids** aus **Ribose**, **Pyrimiden-** bzw. **Purinbase** und **Phosphorsäure** offenbar als besonders erfolgreich durchsetzen können, um zum universellen Grundbaustein für alle Lebensformen auf unserem Planeten zu avancieren.

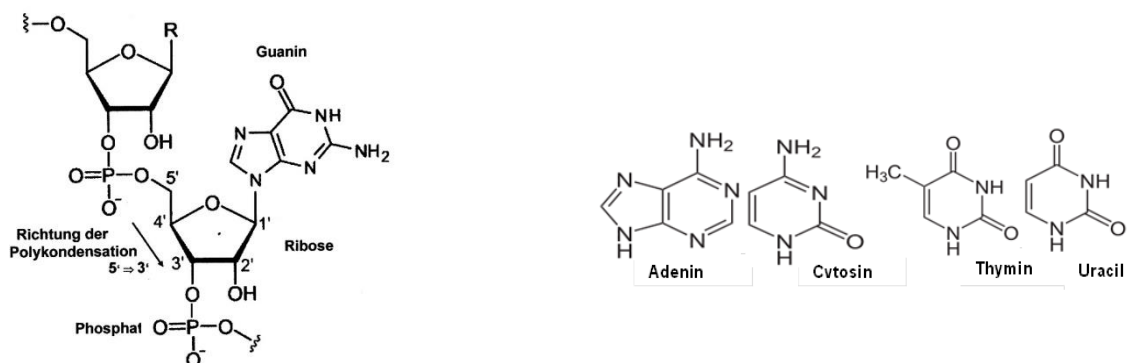
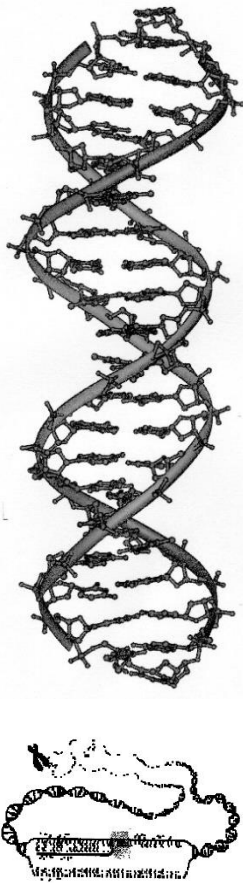


Abb. 2: Nukleotid – es gibt noch drei weitere Nukleotid-Versionen, die anstelle von **Guanin (G)** die Base **Adenin (A)**, **Cytosin (C)** oder **Uracil (U)** im Polymerstrang der **Ribonukleinsäure RNS** enthalten. In der **Desoxyribonukleinsäure DNS**, z. B. der Gene, ist Uracil durch **Thymin (T)** ersetzt und anstelle der OH-Gruppe am C-Atom C2' befindet sich ein H-Atom.

Die mit dem Polymerstrang der RNS wechselwirkenden Polypeptide weisen eine weitaus größere Mannigfaltigkeit auf. Bei deren Synthese wird die Abfolge von bis zu 20 verschiedenen Aminosäuren in der Polypeptidkette durch die Anordnung der Nukleotide G,C,A,U im RNS-Strang gesteuert. Andererseits vermitteln bestimmte Polypeptide an der Matrix eines RNS-Moleküls die Synthese einer Kopie mit entgegengesetzter Abfolge der Nukleotidbasen, wobei das Nukleotid mit der Base G stets an das Nukleotid mit der Base C des neu entstehenden RNS-Strangs mittels H-Brückenbindung ankopelt und analog Nukleotidbase Adenin A stets mit U auf dem Strang der Kopie verbunden ist. In der durch Kooperativität (J.Bauer) erzeugten Duplizierung, der anschließenden Trennung der beiden Stränge und danach erneut einsetzenden Synthese eines jeweils wieder komplementären RNS-Stranges lassen sich unschwer erste Lebensformen erkennen, die in einer RNS-Welt vor ca. 640 Millionen Jahren entstanden.



Der nächste Schritt bestand in der Stabilisierung der zur Replikation befähigten RNS-Moleküle durch Umbau zur DNS mit Ersatz von Nukleotidbase U durch C und deren Konservierung in einer Doppelhelix, deren Struktur von J.D. Watson und F.H.C. Crick 1953 [31] aufgeklärt wurde. Zu den bedeutendsten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts gehört weiterhin die Erkenntnis, dass jeweils eine oder mehrere von 61 Dreier-Kombinationen der Nukleotide mit den Basen G, A, C und T – insgesamt sind $4^3 = 64$ Tripel (Codons) möglich – der Synthese einer von 20 Protein bildenden Aminosäuren zugeordnet ist. Das Schlüsselexperiment gelang 1961 mit UUU zuständig für Phenylalanin [32]. Ein die Synthese eines bestimmten Proteins oder Proteids steuerndes Gen ist demzufolge durch eine fixierte Abfolge von Codons im Makromolekül der DNS gekennzeichnet.

Abb. 3: Ausschnitt aus der DNS-Doppelhelix eines Chromosoms mit entfaltetem Gen zur Kopie von RNS für die Synthese eines bestimmten Proteins. (Bild nach „Doppelhelix Modell“ aus dem Internet)

Die DNS-Stränge sind paarweise schraubenförmig gegenläufig analog zur rechtszirkular polarisierten elektromagnetischen Welle der Abb.1 rechtshändig umeinander gewunden, wobei der leicht wieder lösbare Zusammenhalt innerhalb der Doppelhelix durch H-Brückenbindungen zwischen den ins Innere der Doppelhelix hineinragenden Nukleotid-Basen zustande kommt. Dabei sind stets Guanin-Cytosin (G/C) und Adenin-Thymin (A/T) paarweise einander zugeordnet. Stabilität beruht vor allem auf Stapelwechselwirkung zwischen den infolge Bindungskonjugation eingeebneten Ringen der sich in der Doppelhelix gegenüberstehenden und paarweise übereinander angeordneten Nukleotid-Basen.

Das menschliche Genom besteht aus 46 Chromosomen in 23 Paaren mit im Mittel 140 Mio Basenpaaren und je >1000 Genen pro Paar Chromosomen, insgesamt ca. 3,2 Md Basenpaaren, von denen aber nur 1,2% in etwas weniger als 24 000 Genen für die Proteinsynthese codierend wirken und auf diese Weise 34 300 Proteine, Proteide, Enzyme mit jeweils eigener Stoffwechselfunktion

gebildet werden (zitiert nach [25]). Die Hausmaus hat 40 Chromosomen in 20 Paaren mit insgesamt ebenfalls ca. 3 Md. Basenpaaren, und ca. 24 000 Genen, und selbst der Fadenwurm hat noch 6 Chromosomen mit > 100 Mio. Basenpaaren und 23 217 Genen.

Wesentliche Ergebnisse der neueren Genforschung findet man in den Büchern von Joachim Bauer [25] mit Verweis auf zahlreiche Originalarbeiten zusammengefasst:

- Die Aktivität der im Zellkern befindlichen Gene als DNS-Abschnitte, die nach Öffnen der Doppelhelix im betreffenden Bereich das Abgreifen einer RNS-Kopie für die Synthese bestimmter Proteine im Zellplasma ermöglichen, wird von der Zelle reguliert. Jedem Gen ist ein Genschalter (Promotor) zugeordnet, der Signale von der Zelle empfängt, die Umwelteinflüsse, sog. „Stressoren“ einschließen können. Die Promotoren entscheiden darüber, welcher Funktionsmodus zum Tragen kommt, Blockade oder Aktivierung des Gens zur Synthese einer bestimmten RNS oder zur eigenen Duplizierung.
- Duplizierung hat im Zusammenhang mit Umbau-Aktionen des Genoms Bedeutung, die mittels sog. Transpositionselemente zustande kommen und die Entstehung neuer Arten befördern kann. Diese sind in den reichlich vorhandenen Bereichen der DNS-Stränge angesiedelt, die außerhalb der für die Proteinsynthese zuständigen codierenden Gene liegen. 40% der Basenpaare des menschlichen Genoms lassen sich diesen Transpositionselementen zuordnen. Ihre Aktivität ist allerdings an die Aufhebung einer strikten Hemmung durch ein molekulares System gebunden, das als „RNS-Interferenz“ bezeichnet wird. Eine solche Blockade garantiert die stabile Reproduktion der betreffenden Art, so dass sie auf lange Zeit bestehen bleiben kann. Als mögliche Auslöser einer Enthemmung der blockierten Transpositionselemente wurden Umweltstressoren erkannt.

Es ist nicht zu übersehen, dass diese im Ergebnis einer umfangreichen und akribisch durchgeführten Genforschung erkannten Zusammenhänge im Wesentlichen eine phänomenologische Beschreibung wiedergeben. Die Rückführung der Erscheinungen auf grundlegende physikalische Gesetze steht bisher aus. Auf welche Weise kommt durch den Einfluss von Temperatur- oder pH-Wert-Änderungen, mechanischen Impulsen oder auch UV-Strahlung das An- oder Abschalten von Promotoren zustande, die die Genaktivierung und damit die Protein-Synthese kontrollieren? Welcher Mechanismus liegt dem durch Umweltveränderungen beeinflussbaren Abschalten von RNS-Frequenz zugrunde, so dass anschließend durch Transpositionselemente ausgeführte Umbauaktionen des Genoms in Gang kommen, die zur Entstehung neuer Arten führen können? Die Mutationen verlaufen zielgerichtet im Sinne einer Anpassung, indem sie dem Einfluss des von außen einwirkenden Stressors ausweichen.

Rein formal erinnern die definierte Phasenbeziehung in der Doppelhelix und die ebenso streng fixierte Komplementarität der Basenpaare (G/C) und (A/T) an Analogien zu quantenverschränkten Teilchenpaaren. Könnte angesichts der Wellennatur atomarer und molekularer Partikel in einem Vielteilchen-Ensemble von Biopolymeren der Körperzelle Quantenverschränkung die gesuchte physikalische Basis sein, um zu einem tieferen Verständnis der sensiblen Wechselwirkungen zwischen Umweltfaktoren (Stressoren) und RNS- bzw. DNS-Molekülen zu gelangen? Letztere sind offensichtlich in der Lage, sich auf kreative Weise dem Stress zu entziehen, indem sie ihre Konstitution neu ausrichten und zwecks Sicherung ihrer Existenz ausbauen und vollkommener gestalten.

Dass Quantenverschränkung in Vielteilchensystemen in Gestalt angeregter kohärenter elektromagnetischer Bewegungszustände in einem Ensemble von Partikeln temporär für kurze Zeit möglich sein sollte, ist durch experimentelle Untersuchungen und in theoretischen Arbeiten begründet worden [23,24]. Brownsche Molekularbewegung schließt die stochastische und kurzzeitig existente Ausbildung kohärenter Schwingungszustände unter Einbeziehung benachbarter und nicht zu weit voneinander entfernter Partikel in sich ständig und sehr rasch ändernden Spektrum periodischer Bewegungskomponenten nicht aus [19,20,21].

Schließt womöglich die Komplementarität der Eigenschaften quantenverschränkter Objekte bereits das Konzept ein, auf eine „Attacke“ von außen alternativ und damit im Sinne eines Ausweichens zu reagieren? Die Indizierung eines quantenverschränkten Phonons als zum Beispiel horizontal polarisiert durch ein Stressor-Signal in Gestalt einer polarisierten elektromagnetischen Welle, die stochastisch und wiederholt mit im Vielteilchensystem temporär existenten verschränkten Phononen-Zuständen in Wechselwirkung tritt, schließt im räumlichen Abstand die vertikale Polarisation des Partner-Phonons ein. Im digitalen Hin und Her eines binären Wechsels horizontal und vertikal indi-

zierter Phononen-Zustände käme die dem Stress ausweichende und daher vorteilhaftere Alternative schließlich zum Zuge. Es sei daran erinnert, wie gravierend die Auswirkungen sein können, die allein das „Kippen“ der Tertiärstruktur von Proteinen, wie bei den Prionen, nach sich ziehen kann. Nach J.A. Shapiro [33] ist der Einfluss, den Wahrnehmungen der Zelle haben, kaum zu überschätzen, und in diesem Zusammenhang wird das Verhalten in einer Terminologie beschrieben, die „Gen Informatics“ und „Cellular Computations“ einschließt.

In einem weiteren Sinn wird die Mitwirkung von Vielteilchen-Quantenverschränkung bei der Schwarmbildung im Tierreich, z. B. zur Erklärung eines weitgehend kohärenten Verhaltens in Fisch- und Vogelschwärmen für möglich gehalten. Lassen Kommunikation und Organisation in Bienenvölkern und Ameisenstaaten ebenfalls an Quantenverschränkung denken? Große Ensemble von Einzelindividuen lassen in ihrem Verhalten eine Gleichschaltung, bis hin zur Ununterscheidbarkeit erkennen, und insgesamt agiert der Insektenstaat wie ein qualitativ eigener Organismus, dessen Eigenschaften sich nicht umfassend aus den Eigenschaften einzelner Individuen herleiten lassen. Vermutlich eröffnet sich auf diesem Gebiet in der Zukunft ein weites Feld biophysikalischer Forschung.

Literatur

- [1] „Quantenverschränkung auf den Kopf gestellt“ - Universität Innsbruck
<https://www.uibk.ac.at/.../quantenverschränkung-auf-den-kopf-gestellt>
www.didaktik.phys.uni-erlangen.de/quantumlab/Verschraenkung/.../index.html
- [2] Quantenverschränkung <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenverschränkung>
- [3] A. Jurenkow, „Bell'sche Ungleichung und verschränkte Photonen“, Fachbereich Physik, Technische Universität Kaiserslautern 2010
- [4] A. Feltz, „Erkennbarkeit und Quantenphysikalische Verschränkung“,
<https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2013/11/feltz.pdf>
- [5] K. Czasny, „Quantenphysik als Herausforderung der Erkenntnistheorie“, Verlag Karl Alber in Verlag Herder GmbH, Freiburg im Breisgau 2010
- [6] M. Arndt, O. Nairz, J. Voss-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, „Fullerene Interference“, Nature 401, 680-682 (1999)
- [7] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, “Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment”, A New Violation of Bell's Inequalities”, Physic. Rev. Lett. 49 (2) 91-94 (1982)
- [8] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” Phys. Rev 47, 777 (1935),
- [9] „Wie werden verschränkte Photonen erzeugt? – QuantumLab“
www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/Verschraenkung/.../index.html
- [10] Erzeugung von Photonenwillingen-forPhys. www.forphys.de/Webs/qm/gloss/g14html
- [11] R. Ursin, T. Jennewein, M. Aspelmeyer, R. Kaltenbaek, M. Lindenthal, P. Walther, A. Zeilinger: “Quantum teleportation across the Danube”, Nature 430, 849 (2004)
- [12] R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Schmitt-Manderbach, H. Weier, T. Scheidl, M. Lindenthal, B. Blauensteiner, T. Jennewein, J. Perdigues, P. Trojek, B. Ömer, M. Fürst, M. Meyenburg, J. Rarity, Z. Sodnik, C. Barbieri, H. Weinfurter, A. Zeilinger, „Entanglement-based quantum communication over 144 km“, Nature Physics 3, 481 - 486 (2007)
- [13] X.-S. Ma, T. Herbst, T. Scheidl, D. Wang, S. Kropatschek, W. Naylor, B. Wittmann, A. Mech, J. Kofler, E. Anisimova, V. Makarov, T. Jennewein, R. Ursin, A. Zeilinger, “Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward”, Nature 489, 269–273 (2012)

- [14] „China: Erster Quantensatellit erfolgreich gestartet“, <https://derstandard.at> › Wissenschaft ›
- [15] [Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers](#), J. in, Y.Y Cao, YH Li, SK Liao, L Zhang, JG Ren et al.2017 - science.sciencemag.org
- [16] **Erstes abhörsicheres Quanten-Videotelefonat** <https://medienportal.univie.ac.at/.../erstes-abhoer-sicheres-quanten-videotelefonat-zwischen-wien-und-peking...>
- [17] [K. C. Lee et al., “Entangling Macroscopic Diamonds at Room Temperature,” Science 334, 1253 \(2011\), DOI: 10.1126/science.1211914](#) K. C. Lee; et al., “Comparing phonon dephasing lifetimes in diamond using Transient Coherent Ultrafast Phonon Spectroscopy”. *Diam. Relat. Mater.* 19, 1289 (2010)
- [18] M. Dalmonte, B. Vermersch, P. Zoller “Quantum simulation and spectroscopy of entanglement Hamiltonians”, *Nature Phys.*14, 827-831 (2018).
- [19] C. Hörhammer, Dissertation 2007 „Nicht-Markovsche Dynamik Dekohärenz und Verschränkung in dissipativen Quantensystemen – mit Anwendungen in der Quanteninformationstheorie von Systemen kontinuierlicher Variablen“
https://epub.uni-bayreuth.de/670/1/Dissertation_CHOerhammer.pdf
- [20] JJ. Halliwell, “Two derivations of the master equation of quantum Brownian motion” *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 40, 3067 (2007)
- [21] **Quantenmechanische Brownsche Bewegung stochastischer Prozess in der Quantenmechanik** dollywood.itp.tuwien.ac.at/~statmech/2011/Folie/VO11_03.pdf
- [22] **Markow-Näherung** - <https://de.wikipedia.org/wiki/Markow-Näherung>
- [23] Mohan Sarovar, A.Ishizaki, G. R. Fleming, K. B. Whaley, “Quantum entanglement in photosynthetic light harvesting complexes”, *Nature Physics* 6, 462-467 (2010)
- [24] Reda M. El-Shishtawy, R. C. Haddon-Sleh, et al., “Quantum transfer energy in the framework of time-dependent dipole-dipole interaction” *Results in Physics*, Vol.8, 89-92 (2018)
- [25] J. Bauer, “Das kooperative Gen – Abschied vom Darwinismus“, J. Hoffmann und Campe 2008 und “Das kooperative Gen – Evolution als kreativer Prozess“ W. Heyne Verlag München 2010
- [26] B. McClintock, “The significance of responses of the genome to challenge, Nobel Lecture 1983 www.nobelprize.org.
- [27] B. Heuel-Fabianek, **Natürliche Radioisotope: die “Atomuhr” für die Bestimmung des absoluten Alters von Gesteinen und archäologischen Funden.** *StrahlenschutzPraxis*, 1/2017, S. 31–42.
- [28] **Alter des Mondgesteins**, www.planetenkunde.de/p012/p01212/p0121204001.
- [29] **Meteoriten** <https://www.fossilien.de/seiten/meteoriten/meteoriten.htm>
- [30] **Organische Chemie** https://de.wikipedia.org/wiki/Organische_Chemie
- [31] J.D. Watson, F.H.C.Crick, “Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid”, *Nature* Vol. 171, 737-738 (1953)
- [32] J.H. Matthaei, M.W. Nirenberg, “Characteristics and stabilization of DNAase-sensitive protein synthesis in E. coli extracts.” <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC223177/>
- [33] J.A.Shapiro, “Genom Informatics: The role of DNA in cellular computations, *Biological Theory* 1 288 (2006).