

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Manfred Euler

Physik in der Wahrnehmung und Wahrnehmungen der Physik

What we call reality consists of an elaborate papier-mâché construction of imagination and theory filled in between a few iron posts of observation. J.A. Wheeler

1. Wahrnehmung, Wissenschaft und Weltbild

Jeglicher wissenschaftlicher Erkenntnis gehen Wahrnehmungsprozesse voraus. Man kann mit Einstein [1] Wissenschaft als den Versuch ansehen, der chaotischen Mannigfaltigkeit der Sinneserlebnisse ein logisch einheitliches gedankliches System zuzuordnen. Die Phänomene der Wahrnehmung, unsere Sinneserlebnisse, finden wir vor; sie sind das unmittelbar Gegebene. Der Rest, die Interpretation der Phänomene und ihrer Wechselbeziehungen, ist Menschenwerk. Die Physik stellt in diesem Sinne ein Programm dar, unsere primären Wahrnehmungen der Natur unter Überwindung der inhärenten Begrenzungen der Sinnesorgane hinaus auf solche Bereiche auszudehnen, für die unser Wahrnehmungssystem nicht ausgelegt ist. Damit stellt sich unmittelbar die Aufgabe der Interpretation der so erweiterten "Wahrnehmungen" und der Realität des ausgedehnten Erfahrungsbereichs.

Die Frage nach der Realität hinter den Phänomenen, nach einem an der Physik orientierten Weltbild, stößt auf ein großes Interesse breiterer Bevölkerungsschichten, wie die Vielzahl populärer Publikationen des letzten Jahrzehnts, zum Teil Sachbuchbestseller, etwa zu den Themenbereichen Ordnung und Chaos, Kosmologie oder Interpretationen der Quantenmechanik gezeigt haben. Eine Umsetzung dieser Anstöße in den Physikunterricht ist bisher nur sehr spärlich erfolgt. Dabei sind Schüler naturgemäß äußerst begierig, einen naturwissenschaftlich begründeten Orientierungsrahmen in Fragen des Weltbildes zu erhalten, der ihnen undogmatisch gestattet, die eigene Position als Individuum auszuloten und zu finden. Es kann nicht darum gehen, endgültige Antworten zu formulieren, sondern eher ein Bewußtsein dafür zu schaffen, was die eingeschränkte Sichtweise der Naturwissenschaft an Aussagen über das Wesen der Realität leisten kann und was nicht; inwieweit also die in der wissenschaftlichen Methode und in der Stellung des erkennenden Subjekts liegenden Besonderheiten das Bild der Realität, die sie zu beschreiben suchen, beeinflussen.

2. Realität in der Wahrnehmung

Es ist natürlich, daß Menschen im allgemeinen als naive Realisten starten und die Realität als das betrachten, was wir "da draußen sehen". Unsere inneren Bilder stehen in einem Spannungsverhältnis zur Realität. Einerseits müssen sie wegen der Begrenztheit unseres Gehirns wenige relevante Freiheitsgrade herauspräparieren, wobei zwangsläufig andere Aspekte unterdrückt werden (Projektions- und Modellcharakter). Andererseits, und das ist das überlebensrelevante Ergebnis biologischer Evolution, spiegelt die Dynamik der internen Modelle die externe Dynamik so weit wie nötig, so daß Vorhersagen möglich werden

(Antizipationscharakter). Dies gilt ebenso für höhere mentale Prozesse, die uns praktisch nur durch Introspektion zugänglich sind, wie für periphere Prozesse auf der Ebene der Sinnesorgane, die physikalischen und physiologischen Messungen zugänglich sind.

Der vorliegende Beitrag stellt am Beispiel des Gehörs dar, welche Bilder der Realität die "Physik im eigenen Kopf" hervorbringt. Wie wird die äußere akustische Realität intern repräsentiert? Wir betreiben damit eine Archäologie physikalischer Begriffsbildung und Bilderwelt bis zu den tiefsten Schichten von Wahrnehmungs- und Erkenntnisprozessen. Gewisse archetypische physikalische Konzepte, z.B. Harmonie, Symmetrie, Komplementarität, lassen sich objektivieren und sind in der Informationsdynamik des Wahrnehmungssystems implementiert. Dies ist für sich genommen bereits eine interessante Erkenntnis und zeigt die enge Verbindung zwischen der Physik "drinnen" und "draußen" auf. Darüber hinaus konfrontiert uns das Wahrnehmungssystem mit dem zentralen Problem der Realitätsdiskussion schlechthin. Inwieweit läßt sich durch die Scheidung zwischen drinnen und draußen eine objektive Realität beschreiben, wenn die Lage des Schnittes bis zu einem gewissen Grad willkürlich ist? Kann ein System, für das es letztlich kein Außen gibt, sich vollständig verstehen? Wir sind ein Produkt der kosmischen Evolution, deren Programm wir in der Physik zu begreifen suchen. Dem selbstbezüglichen Charakter dieser Fragen entsprechend existieren Grenzen zumindest der Anschaulichkeit, womöglich auch des Wissens. Das Thema Selbstbezug spielt in der Physik eine zentrale Rolle, wenngleich es viele Physiker verdrängen. Gerade die großen geistigen Errungenschaften der modernen Physik, die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie, entwickeln ihre seltsamen unanschaulichen Züge, die dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen scheinen, aus der Tatsache, daß es keinen absoluten, äußeren Beobachter gibt. Es ist eine große didaktische und erkenntnispraktische Herausforderung, diese Besonderheiten so weit als möglich auf die Ebene der Alltagsrealität hinunterzutransformieren. Hierzu bietet sich unser Wahrnehmungssystem an. Einige Aspekte physikalischer Realitätsdiskussion sind per Analogie an der Biophysik menschlicher Wahrnehmungsprozesse unmittelbar im eigenen Kopf zu erleben und didaktisch aufzubereiten. Es sind vornehmlich Quantenanalogien; der Bruch mit unserer naiven klassischen Realitätskonzeption stellt sich hier besonders stark. Die per Wahrnehmung erzeugte innere Wirklichkeit zeigt ein Spektrum außerordentlich stimulierender Parallelen zum Wesen der Realität, wie es sich in der Quantentheorie darstellt, und zwar sowohl auf ontischer, epistemischer und methodischer Ebene. Eine Zusammenstellung von Wahrnehmungseffekten mit Analogien zur Speziellen und zur Allgemeinen Relativitätstheorie ist in Vorbereitung.

Die Besonderheit der Sinneswahrnehmungen läßt zumindest in Ansätzen erfassen, was Ganzheit bedeutet. Dies liegt daran, daß hier die Lage des Schnittes Subjekt-Objekt verschwimmt und wir imstande sind, die Dynamik der Wahrnehmungsprozesse von beiden Seiten sowohl als innere wie auch als äußere Beobachter zu beurteilen. Wir sind zugleich Subjekt und Objekt, Experimentator und Versuchsperson, Beobachter und Teilnehmer.

3. Wahrnehmung als aktiver Prozeß - mental wie physikalisch

Wahrnehmung ist keine bloße passive Projektion der äußeren Realität auf eine innere Leinwand. Die Psychologie versteht Wahrnehmung als aktiven mentalen Prozeß: Der Wahrnehmende muß bereits wissen, was als "wahr zu nehmen" ist. Damit entscheidet er aktiv, welche

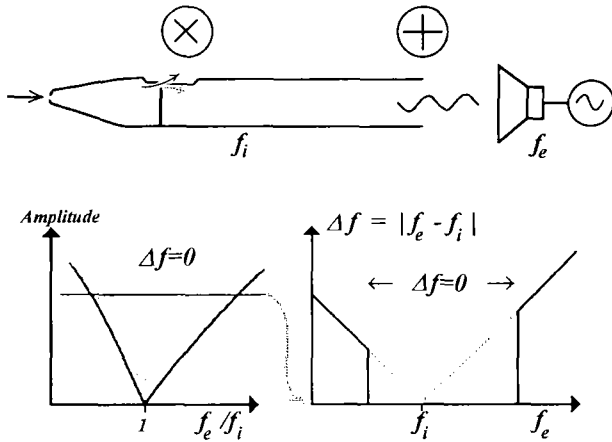


Abb.1: Die angetriebene Orgelpfeife als Modell für aktive Wahrnehmungsprozesse und Strukturbildung durch das Zusammenspiel von linearen und nichtlinearen Prinzipien (⊕ und ⊗). In einem zungenartigen Frequenzband, dessen Breite von der Erregeramplitude abhängt, rastet die Orgelpfeife auf den Antrieb ein. Es verschwindet die Schwebungsfrequenz Δf . Die Pfeifenschwingung kann über einen Frequenzbereich mitgezogen werden.

Signale als Information akzeptiert werden. Dieses aktive Konzept ist nicht nur auf höhere Wahrnehmungs- und Bewußtseinsprozesse beschränkt. Im Gehör wird es geradezu physikalisch wörtlich auf mechanischer Ebene umgesetzt.

Das Ohr ist kein passiver Schallempfänger. Die Basilarmembran des Innenohres wird nicht nur wie eine Mikrofonmembran vom Schall passiv angetrieben, sie ist selbst ein aktives Schwingungssystem. Wir hören dadurch wesentlich empfindlicher als es die passive Wanderwellentheorie erlaubt [2]. Als eine rein passiv schwingende elastische Platte wäre die Basilarmembran durch Flüssigkeitsreibung viel zu stark gedämpft, um die beobachtete akustische Filtergüte des Gehörs zuzulassen. Rückkopplungsprozesse, an denen die äußeren Haarzellen nicht nur als Sensoren, sondern auch als Aktoren beteiligt sind, pumpen Energie in die Schwingung der Basilarmembran, die dadurch weitestgehend entdämpft wird. Damit ändert sich das Bild des akustischen Wahrnehmungsprozesses grundlegend. Das einfache passive Mikrofonparadigma des Hörvorgangs ist so nicht haltbar und durch ein Bild zu ersetzen, das auf aktive Oszillatoren gründet. Abb. 1 zeigt als Modellexperiment eine durch ein Gebläse angeregte Orgelpfeife, die selbsterregte Schwingungen erzeugt. Sie wird von dem Sinuston eines Lautsprechers angetrieben. Die Pfeife entspricht dem zu autonomen Schwingungen fähigen aktiven Wahrnehmungsorgan; der Lautsprecher generiert das wahrzunehmende Schallsignal.

Die Van der Pol-Differentialgleichung (VdP-DGL) stellt ein mathematisches Minimalmodell eines selbsterregten Oszillators dar. Sie geht aus der DGL des gedämpften harmonischen Oszillators hervor, indem die geschwindigkeitsproportionale lineare Dämpfung durch eine

amplitudenabhängige, nichtlineare Entdämpfung ersetzt wird. Ihre asymptotischen Lösungen beschreiben periodische Schwingungen (Grenzzyklen).

$$\ddot{x} + (x^2 - 1)\dot{x} + x = \sin(2\pi f_0 t) \quad \text{VdP-DGL}$$

Die Wechselwirkungseffekte der internen Schwingung mit dem äußeren Antrieb lassen sich im Modellexperiment der angetriebenen Orgelpfeife leicht für die Zuhörer akustisch demonstrieren. Über schnelle Fourier-Analyse ist das Ergebnis auch objektivierbar (sowohl im Experiment als auch in den numerischen Lösungen der VdP-DGL [3]). Gegenüber dem passiven Mitschwingen des harmonischen Oszillators zeigt das angetriebene aktive System aufgrund seiner Nichtlinearität eine Reihe interessanter Effekte wie periodische, quasiperiodische und chaotische Schwingungen. Neben der Erzeugung von Kombinationstönen ist das auffälligste neue Phänomen das Einrasten der Orgelpfeife auf die externe Schwingung. Bei gewissen ganzzahligen Verhältnissen zwischen interner und externer Frequenz synchronisiert der periodische Antrieb die Schwingung der Pfeife. Es kommt zur Phasenkopplung. Beim Überschreiten einer kritischen Stärke kann das externe Signal den internen Schwingungszustand über einen gewissen Frequenzbereich mitziehen. Die Breite des Phasenkopplungsbereichs hängt von der Amplitude des Antriebs ab (sog. Arnold-Zungen).

In der Dynamik des nichtlinearen aktiven Systems manifestiert sich das veränderte Wahrnehmungsparadigma: nicht passives Mitschwingen oder Abbilden, sondern aktives Einschwingen und Nachbilden. Im Prozeß der Wahrnehmung ändert sich der interne Zustand des wahrnehmenden Systems sprunghaft und wird mit dem externen wahrzunehmenden System sozusagen eins. Das Konzept einer aktiven Synchronisierung von Oszillatoren erweist sich als äußerst tragfähig und spielt als Phasenkopplung auch bei der neuronalen Übertragung akustischer Signale und bei der akustischen Mustererkennung eine Rolle.

4. Lineare und nichtlineare Prinzipien in der Informationsdynamik - Bedeutung aus einem kreativen Zirkel

Unter dem Aspekt der Entstehung von Bedeutung liefert das Modellexperiment der angetriebenen Orgelpfeife einige Denkanstöße, die sich über den mechanischen Kontext hinaus auch als Struktur- und Ordnungsprinzipien für die Emergenz von Bedeutung auf höherer Ebene bewähren. Die Schwellwertlogik ist das einfachste Bedeutungskonzept in der Signalverarbeitung. In elektronischen Systemen muß man eine spezielle Schaltung dafür konzipieren, daß nur überschwellige Signale angenommen werden und der Rest als "Rauschen" unberücksichtigt bleibt. Im nichtlinearen System der Orgelpfeife mit Antrieb entsteht dieses Verhalten automatisch. Eine Schwellenlogik ist daher eine emergente Eigenschaft des Systems. Nur wenn das Antriebssignal eine gewisse kritische Schwelle übersteigt, ist es in der Lage, die Schwingung der Pfeife an sich zu koppeln, zu synchronisieren, und damit in dem aktiven "wahrnehmenden" System eine Zustandsänderung herbeizuführen. Unterschwellige Signale sind dazu nicht in der Lage; sie bleiben unberücksichtigt.

Der eingerastete Zustand ist das Objekt der Wahrnehmung. In der Tat kommt ihm eine gewisse objektartige Bedeutung zu, die sich mit dem Objektbegriff der Alltagsrealität deckt: Wo ein Objekt ist, kann kein zweites sein! In gewissen Bereichen gilt das auch für akustische Objekte, für wahrgenommene Töne. Ist das Gehör auf ein Signal eingerastet, dann kann ein zweites, benachbartes, schwächeres Signal nicht wahrgenommen werden. Das

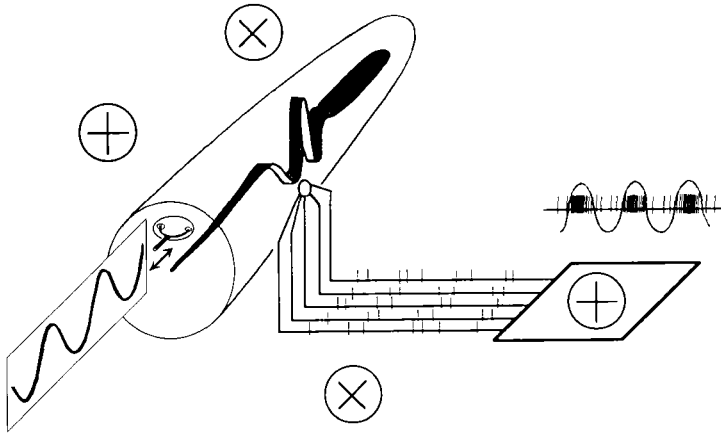


Abb.2: Lineare und nichtlineare Strukturprinzipien bei der aktiven Schallwahrnehmung im Innenohr und in den folgenden neuronalen Stufen.

Superpositionsprinzip ist außer Kraft gesetzt. Die Dynamik des Systems erzeugt automatisch Bedeutung, und zwar in der Weise, daß sie schwächere Signale unterdrückt. Sie reduziert so selbsttätig die Komplexität des wahrgenommenen Musters und damit den Datenfluß. Weitere durch die nichtlineare Dynamik generierte Objekte, die als Träger von Bedeutung fungieren können, sind die Kombinationsprodukte $f_{\text{komb}} = mf_1 \pm nf_2$ ($m, n \in \mathbb{N}$), die das Gehör durch seine Nichtlinearität aus den einfallenden Frequenzen f_1 und f_2 selbst zusammenmischt. Was in einem technischen Übertragungssystem zu einem fürchterlichen Frequenzsalat führen würde, wird im Gehör genutzt, um Klänge gewissermaßen auf sich selbst zurückgekoppelt zu bewerten. Die Komplexität des erzeugten Musters ist bei konsonanten Frequenzverhältnissen $f_1/f_2 = m/n$ um so geringer, je kleiner die natürlichen Zahlen m und n sind. Hier eröffnet sich eine Verbindung zwischen nichtlinearer Dynamik und der Musik.

Im Modellsystem der Orgelpfeife wirken lineare und nichtlineare Prozesse so zusammen, daß es zur zeitlichen "Gestaltbildung" kommt. Es entsteht ein neues dynamisches Objekt, ein periodischer Ton. Dabei wirkt einerseits das lineare Superpositionsprinzip (abgekürzt mit (+)), die Überlagerung von hin- und rücklaufenden Wellen im Pfeifenkörper, die zu Eigenschwingungen (stehenden Wellen) führt. Das nichtlineare Prinzip (abgekürzt mit (*)) ist die Verstärkung der Eigenschwingungen durch Rückkopplung über die Modulation des instabilen Luftstroms an der Pfeifenlippe. Analog kommt im Innenohr eine Gestaltbildung zustande durch das (+)-Prinzip der Überlagerung von Wanderwellen auf der Basilar membran und das (*)-Prinzip der Verstärkung von Schwingungen durch Rückkopplung in den aktiven Elementen (äußere Haarzellen). Das akustische Signal wird dadurch von einer wellenartigen, delokalisierten Repräsentation (breites passives Wanderwellenmuster) in ein aktiv verstärktes, schmales Resonanzmaximum fokussiert (bei einem reinen Ton). Die durch nichtlineare Prozesse verstärkte Frequenz-Orts-

Abbildung ist sozusagen der objekt- oder teilchenartige Repräsentationsmodus von akustischer Information. Die Tonhöhe ist auf dieser Ebene eine reine Ortsempfindung (Abb. 2).

Bedeutung entsteht quasi automatisch durch das Ineinandergreifen linearer und nichtlinearer Prozesse. Freilich benötigt man zur Diskussion von Bedeutung eine höhere sinnstiftende semantische Ebene. In der Hierarchie des Wahrnehmungssystems ist es die folgende Schicht, welche die in der vorgehenden Ebene generierten Strukturen nutzt und ihnen dadurch Bedeutung verleiht. Zwangsläufig führt dies zu einem infiniten Regreß einander sich beobachtender Schichten, der sich durch Rückkopplung zu einem Kreis schließen läßt. Wir erhalten so das Bild eines kreativen Zirkels aus linearen und nichtlinearen Prozessen, der Bedeutung generiert.

Bei der Codierung des Wanderwellenmusters in Nervensignale wird der teilchenartige Bedeutungskanal komplementär ergänzt, wobei (+)- und (*)-Prinzipien in umgekehrter Weise wie zuvor zusammenwirken. Die längs der Basilmembran angeordneten inneren Haarzellen tasten das Anregungsmuster parallel ab. Eine mechanische Verbiegung der Sinneshäärchen wird in Nervenimpulse umgesetzt. Dies ist ein extrem nichtlinearer Prozeß; die analoge mechanische Eingangsgröße wird nach dem Alles-Oder-Nichts-Prinzip in diskrete elektrochemische Ereignisse (Aktionspotentiale) umgesetzt. Die schulmäßigen Prinzipien der Codierung von Reizstärke in neuronale Impulsrate sowie die Aktivierung zusätzlicher Neuronengruppen bei zunehmender Reizstärke reichen alleine nicht aus, um die Besonderheiten der Umsetzung akustischer Signale in Nervenimpulse zu verstehen. Da die Impulsrate (bis zu 500 Imp/s) im Bereich der zu codierenden niederfrequenten akustischen Signale liegt, sind Synchronisierungseffekte bedeutsam.

Auch hier liefert das Modellexperiment der angetriebenen Orgelpfeife ein tieferes Verständnis. Im Vergleich zur Orgelpfeife ist die Nichtlinearität des neuronalen Oszillators noch stärker ausgeprägt. Zusätzlich ist seine Impulsrate nicht stabil, sondern statistischen Schwankungen unterworfen. Ein einzelnes Neuron ist eine schlechtgehende Uhr; Schrödinger hätte es vielleicht eine Uhr mit "thermischen Anfällen" genannt [4]; ein von der Brownschen Molekularbewegung statistisch "getretener" nichtlinearer Oszillator. Seine Impulse werden durch den Antrieb synchronisiert. Die Phasenlage des Impulses ist nunmehr wesentlich. Anders als bei der eingerasteten Orgelpfeife ist jedoch die Phasenkopplung, zumindest in Schwellennähe, stark verrauscht. Nervenfasern, die von Nachbarbereichen der Basilmembran ausgehen, werden von einem praktisch phasengleichen akustischen Eingangssignal erregt. Ihre Antworten enthalten also einen systematischen mit dem Signal phasengekoppelten Anteil und einen statistischen Anteil. Eine Überlagerung ihrer Antworten verbessert das Signal-Rauschverhältnis und führt zu einer Folge von neuronalen Salven, deren Einhüllende die zeitliche Struktur des Anregungssignals rekonstruiert. Obwohl ein einzelnes Neuron extrem nichtlinear nach dem Alles-Oder-Nichts-Prinzip arbeitet, führt eine Überlagerung der statistisch verschmierten Antworten eines Neuronenensembles in der nächsten neuronalen Schaltstelle (Synapse) zu einer Quasi-Linearisierung des Systems. Auch auf dieser Ebene wirken (+)- und (*)-Prinzipien konstruktiv zusammen. Das lineare Prinzip ist die Superposition der neuronalen Signale, das nichtlineare Prinzip ist die Erzeugung einzelner Impulse. Ihr Zusammenspiel sorgt dafür, daß aus Nichtlinearität und Unordnung Quasi-Linearität und Ordnung entsteht. Sie kooperieren so, daß die zeitliche Struktur des Basilmembranmusters im niederfrequenten Bereich durch das neuronale System analysiert werden kann. Dies ist in Ergänzung zum Ortsprinzip das Periozitätsprinzip des Hörens, ein zweiter zeitlicher Kanal der akustischen Mustererkennung, der insbesondere im niederfrequenten Audibereich unserer Tonhöhenempfindung zugrunde liegt.

Die Synchronisierung von angetriebenen Nervenimpulsen ist ein bemerkenswertes Beispiel für die konstruktive Wirkung von Rauschen und für das Entstehen von Ordnung durch Unordnung. Bei angetriebenen bistabilen Oszillatoren in Schwellennähe wirken thermisches Rauschen und Nichtlinearität in einer zunächst völlig kontraintuitiv scheinenden Weise so zusammen, daß eine Erhöhung der Rauschstärke in gewissen Parameterbereichen zu einer Verbesserung des Signal- Rausch- Verhältnisses führt. Dieser überraschende Effekt heißt stochastische Resonanz [5]. Mit ihm wird verständlich, warum das neuronale System Signale sicher überträgt, obwohl es in Schwellennähe als außerordentlich verrauschter Informationskanal anzusehen ist. Außerdem kann dieser Mechanismus bei der neuro-mechanischen Rückkopplung in den Haarzellen eine Rolle spielen, was die extreme mechanische Empfindlichkeit des Innenohres einsichtig machen würde. Bereits Amplituden der Basilarmembranschwingung von 10^{-11} m sind wahrnehmbar. Hier ist die Notwendigkeit der Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses evident.

5. Komplementarität durch Komplexität: Quantenanalogen in der Wahrnehmung

Die Empfindlichkeit unserer Sinnesorgane ist gerade so weit vorangetrieben, daß Quanteneffekte eben nicht mehr unmittelbar wahrnehmbar sind. Eine geringfügige Steigerung der Empfindlichkeit des Auges würde uns die Körnigkeit der Energie spüren lassen - wir könnten einzelne Photonen wahrnehmen! Eine minimale Erniedrigung der Hörschwelle machte die Körnigkeit der Materie hörbar, nämlich die Schwankungserscheinungen des Trommelfells, hervorgehoben durch das Auftreffen der Luftmoleküle. Die Hörschwelle liegt bei einer Schwellenintensität von 10^{-16} W/cm², hart an der thermischen Rauschleistung des Trommelfells im hörbaren Frequenzbereich. Zur Veranschaulichung: Ein Energiestrom, getragen von rund 500 Elektronen pro Sekunde, jedes mit 1 eV Energie, wäre theoretisch wahrnehmbar. Der Wahrnehmungsapparat führt uns als makroskopische Wesen bis an das Tor zum Mikrokosmos. Die Funktion der Sinnesorgane ist analog zu den Meßapparaten in der Quantenmechanik zu sehen. In beiden Fällen handelt es sich um metastabile offene Systeme, die sich im Ungleichgewicht befinden und im Sinne eines Phasenübergangs Signale irreversibel auf makroskopische, klassische Freiheitsgrade verstärken. In der Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik ist es gerade der irreversible Akt der Verstärkung, der den Übergang von der Quantenwelt zur klassischen Welt markiert und der die in der Quantenwelt gültige lineare Superposition (unitäre Entwicklung der Zustände) zusammenbrechen läßt, was formal als Übergang von einem linearen (+)-Strukturprinzip zu einem nichtlinearen (*)-Prinzip betrachtet werden kann.

Durch solche messungsartige Prozesse koppeln wir uns vom Mikrokosmos irreversibel ab und entwickeln uns zu klassischen Wesen. Unsere Realität ist klassisch determiniert; wir nehmen Fakten wahr und kommunizieren über faktische klassische Freiheitsgrade. Unsere irreversibel gespeicherten Erinnerungen erlangen zumindest eine gewisse temporäre Stabilität. Irreversibilität hat hier sowohl einen thermodynamischen Aspekt (Ungleichgewicht) als auch einen Informationsaspekt (Reduktion der Zahl der Freiheitsgrade, Projektionscharakter, logische Irreversibilität). Wir denken klassisch, obwohl gewisse Quantenanalogen weiterbestehen, die auf der Komplexität der internen Informationsdynamik beruhen. Analog zum Meßprozeß wiederholt sich das Zusammenspiel von (+)- und (*)-Strukturprinzipien in der Wahrnehmung auf verschiedenen Schichten vom Sinnesorgan (wo es objektiv meßbar ist) bis zu Bewußtseinsprozessen (wo wir analoge dynamische Effekte in der Wahrnehmung per Introspektion erleben können). Die Repräsentationsmodi von Information (im Sinne von Bedeutung) wechseln von Ebene zu Ebene, das Zusammenspiel linearer und nichtlinearer Strukturprinzipien bleibt

dagegen erhalten. Wir beschränken uns wieder auf die ersten beiden Ebenen der Signalverarbeitung im Innenohr und im akustischen Nerven.

Orts- und Periodizitätsprinzip sind komplementäre interne Repräsentationsweisen von akustischen Signalen, die eine enge Analogie zum Teilchen- und Feldkonzept der Physik zeigen. Auf Innenohrebene wird ein Sinuston nach dem Ortsprinzip in einen schmalen Zustand maximaler Anregung über zusätzliche aktive Prozesse fokussiert. Dies entspricht dem objekt- oder teilchenartigen, lokalisierten Modus. Auf der nächsten Stufe der Informationskette, im neuronalen System, werden Signale zwar wieder lokalisiert in Nervenimpulsen transportiert, doch die Information läßt sich nicht einem einzelnen Impuls zuordnen, sondern sie steckt verteilt im Verhalten des Neuronenensembles. Es liegt ein delokalisierte, wellenartiger, quasi-lineare Repräsentationsmodus vor, in dem Signale superponiert werden können. Periodizität und Phasenlage sind auf der Ebene des akustischen Objekts "Sinuston" nicht direkt wahrnehmbare Parameter. Erst in Interferenzexperimenten kommen diese potentielle Qualitäten der akustischen Realität zum Vorschein.

Hier wird eine Möglichkeit offenbar, nicht nur Quantenanalogien in der Begriffsbildung aufzuzeigen, sondern auch durch analoge Experimente zu vertiefen. Wir fassen dazu einen wahrgenommenen Ton als faktisches inneres Objekt auf. Ebenso wie bei der Registrierung eines Elektrons sein interner Freiheitsgrad ("der Zeiger seiner Uhr", seine Phase) keine Rolle spielt, hören wir die Phasenlage des Tones nicht (zumindest solange wir uns auf Sinustöne beschränken). Erst in Zwei- oder Mehrwegexperimenten (z.B. in Doppelspalt- oder Interferometeranordnungen) läßt sich über Interferenz die Quantennatur der Mikroteilchen direkt zeigen. Entsprechend ist der periodische Charakter von Tönen wahrnehmbar, wenn beide Kanäle des akustischen Systems einbezogen werden. Rechtes und linkes Ohr bilden die Basis eines akustischen Interferometers, das (unter anderem) aus der Phasendifferenz der Signale beider Ohren die Richtung zur Schallquelle bestimmt. Voraussetzung ist die Interferenzfähigkeit und damit die (quasi) Linearisierung der neuronalen Signale. Diese ist in einem einfachen Experiment als sogenannte binaurale Schwebung direkt wahrnehmbar. Zwei Sinussignale benachbarter Frequenzen werden getrennt über einen Stereokopfhörer eingespielt. Obwohl die Schallsignale physikalisch nicht interferieren, hört man Schwebungen im Kopf, die durch die Interferenz der Nervensignale beider Ohren zustande kommen, welche in verschiedenen Zentren des Hirnstamms zusammenlaufen.

Aus diesem Wechselspiel von teilchen- und wellenartiger Repräsentation lassen sich unmittelbar Analoga zum Doppelspaltexperiment mit Elektronen entwickeln. Strahlt man Elektronen geringer Energie (große Wellenlänge) von einer punktförmigen Elektronenquelle durch einen geeigneten Doppelspalt, dann beobachtet man auf einem entfernten Schirm Interferenzen. Eine Lokalisierung der Bahn (Entscheidung zweier Alternativen) ist jedoch mit dem Wellenaspekt nicht verträglich. Macht man dagegen das Experiment bei hoher Energie, dann ergeben sich zwei getrennte Spaltbilder. Man kann dann zwar sagen, welchen Weg die Elektronen genommen haben, die Interferenz der beiden Strahlen ist jedoch nicht mehr beobachtbar. Ganz analog das akustische Zweiweg-Experiment: Zwei Töne unterschiedlicher Frequenz werden separat in das rechte und das linke Ohr eingespielt. Ist die Frequenzdifferenz ausreichend groß (ca. 20 Hz bei 400 Hz), dann ist die Lokalisierung der einzelnen Töne möglich. Die Töne besitzen Objektcharakter. Man kann zwischen den faktischen Alternativen unterscheiden; z.B. hoher Ton rechts - tiefer links oder umgekehrt. Diese Trennung ist nicht mehr gegeben, wenn die Frequenzdifferenz klein ist. Man hört dann keine einzeln lokalisierbaren Töne mehr, son-

dem nur noch einen Ton mit periodisch modulierter Lautstärke (Schwebung und Lokalisierung im Kopf). Aufgrund der komplementären Repräsentation der akustischen Signale in unserem Wahrnehmungssystem nehmen wir entweder den Teilchenaspekt oder den Wellenaspekt wahr. Das Experiment entscheidet, welcher Aspekt dabei zutage tritt. In Wirklichkeit liegen immer beide Aspekte dem beobachteten Phänomen zugrunde. Die Tonhöhenempfindung beruht auf beiden Kanälen, auf Orts- und Periodizitätsprinzip, wenngleich die jeweils eingehenden Gewichtungen von dem Frequenzbereich abhängen.

Die Quantenanalogue unseres Wahrnehmungssystems läßt sich folgendermaßen mit der Dualität von Feld und Teilchen, von Kontinuum und Diskretheit, umschreiben. Unsere interne Informationsdynamik geht mit der Wellen- und der Teilchenrepräsentation so um, wie ein Physiker, der auf einem klassischen Computer die Ergebnisse der Quantenmechanik simuliert. Möchte man etwa am Interferenzbild des Doppelspalts zeigen, wie aus dem Auftreffen einzelner Elektronen auf dem Schirm langsam ein Interferenzmuster entsteht, dann berechnet man das kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsfeld und setzt statistisch gemäß der Wahrscheinlichkeitsvorgabe einzelne diskrete Ereignisse, die dem Auftreffen einzelner Elektronen entsprechen. Entsprechend werden bei der Codierung des kontinuierlichen Reizes statistisch einzelne Nervenimpulse gesetzt; aus ihrer Überlagerung entsteht dann wieder ein kontinuierliches Muster auf der nächsten Ebene.

Ein wesentlicher Unterschied sollte bei allen Analogien zwischen Wahrnehmungs- und Quantenprozessen im Auge behalten werden. Die quantenmechanische Ganzheit ist etwas anderes als die Ganzheit, die sich aus der Komplexität eines klassischen Systems ergibt. Da man auf einem klassischen Rechner die Ergebnisse der Quantenmechanik bei verschränkten Systemen nur simulieren kann, wenn man die Nichtlokalität durch lokale Verbindungen simuliert [6], stößt diese Analogie zwangsläufig an eine Grenze, weil es sich bei den Aktionen des Nervensystems um klassisch lokalisierbare Phänomene handelt. Anders als in der Quantenmechanik, in der auf der gleichen Ebene je nach experimenteller Randbedingung die Mikroobjekte als Teilchen oder als Wellen in Erscheinung treten können, läßt sich im Nervensystem die jeder einzelnen Ebene zugeordnete innere Wirklichkeit im Sinne einer Repräsentation von Signalen genau festmachen. Dies ist jedoch nur möglich, weil das System einer Beobachtung von außen zugänglich ist. Alleine vom Standpunkt des inneren Beobachters ist diese Entscheidung nicht zu treffen. Eine zentrale Lektion der diskutierten Experimente liegt darin, unmittelbar zu erleben, wie sich die erfahrene Realität eines Teilnehmers von der eines isolierten Beobachters unterscheidet.

6. Schrödingers Katze im Kopf - Komplementarität und Kreativität

Sogar die berühmte Schrödinger-Katze läßt sich per Analogie in unser Wahrnehmungssystem ansiedeln und entfaltet in den internen neuronalen Kreisen unseres Gehirns ihr seltsames nichtklassisches Schattendasein in einem Interferenzzustand von lebendig und tot, von "1" und "0". In der Sprache der Quantenlogik läßt sich das Katzenparadoxon auf die Inkompatibilität folgender Aussagen zurückführen [7]:

Aussage 1: $K \wedge (L \vee \neg L)$

Die Katze ist im Kasten (K), es hat noch keine "Messung" stattgefunden, die Katze ist lebendig (L) oder tot ($\neg L$), wobei der Zustand lebendig oder tot ($L \vee \neg L$) im Sinne einer quantenmechanischen Superposition zu verstehen ist.

Aussage 2: $(K \wedge L) \vee (K \wedge \neg L)$

Durch die Messung bricht die lineare Superposition zusammen. Der Interferenzzustand, der eine reversible Entwicklung der Möglichkeiten zuläßt, geht irreversibel in den Zustand klassischer Fakten über. Die Katze ist entweder tot oder lebendig. Das potentielle "sowohl - als auch" wird zum faktischen "entweder - oder".

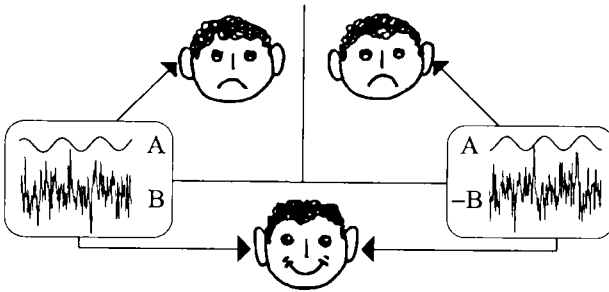
In der klassischen zweiwertigen Logik sind beide Aussagen durch das Distributivgesetz äquivalent ineinander umwandelbar, ohne daß dabei Information verlorengeht. Ohne auf alle Subtilitäten des Katzenparadoxons und der Logik eingehen zu können, genügt hier der Hinweis, daß in der Quantenlogik das Distributivgesetz seine Gültigkeit verliert. Da wir Wahrnehmungsprozesse ähnlich dem Schnitt zwischen klassischer und Quantenwelt in einer Zwei-Ebenen-Beschreibung mit komplementären Strukturprinzipien diskutieren, sollten verwandte Paradoxa in der Wahrnehmung aufzufinden sein. Wir beschränken uns auf das Phänomen der Maskierung und Demaskierung von Signalen durch Rauschen, das je nach Reizung von nur einem Ohr oder von beiden Ohren auftritt (d.h. monaural bzw. binaural). Das Zusammenspiel von (+)- und (*)-Prozessen auf verschiedenen Ebenen erzeugt eine Nicht-Boolesche Logik, für die ähnlich zur Quantenlogik das Distributivgesetz nicht gilt. Es sei A ein Sinuston und B ein schmalbandiges Rauschsignal im gleichen Frequenzband. Präsentiert man beide Signale monaural, dann kann man den Pegel von B gerade so einstellen, daß A nicht mehr hörbar ist (Maskierung, Rauschen verdrängt Signal, nichtlineare Superposition, (*)). Spielt man das Rauschen auf das andere Ohr, läßt sich das Signal A wiedergewinnen, und zwar über binaurale Korrelation der neuronalen Periodizitätsmuster (lineare Verrechnung der Signale aus beiden Ohren, (+)). Das Wiedergewinnen des Signals aus dem Untergrund des Rauschens funktioniert ebenfalls, wenn das Rauschen am Gegenohr mit einer geringen Zeitverzögerung oder invertiert ($\neg B$) präsentiert wird. Diese binaurale Demaskierung eines monaural maskierten Signals geht mit zusätzlicher räumlicher Information einher, die unser Wahrnehmungssystem aus der binauralen Verrechnung gewinnt. Das Signal wird hörbar, weil es vom Rauschen räumlich getrennt erscheint.

Analog zu obigem Quantenparadoxon läßt sich die binaurale Wiedergewinnung von Signalen aus dem Rauschen so formulieren, daß die Ungültigkeit des Distributivgesetzes der klassischen Logik evident wird (Abb.3). Um in der Sprache der Booleschen Algebra zu bleiben, identifizieren wir das logische "und" mit (*) und das logische "oder" mit (+). Wir bezeichnen mit \wedge die monaurale Überlagerung und damit die Maskierung des Signals (*). Die binaurale Superposition (+) wird durch \vee bezeichnet. Fragt man danach, ob in einer separaten monauralen Präsentation das Signal im Rauschen hörbar ist oder ob es im invertierten Rauschen auftritt, dann sind beide Fragen je für sich mit "nein" (logisch "0") zu beantworten. Es gilt:

$$(A \wedge B) = 0 \quad \text{sowie} \quad (A \wedge \neg B) = 0.$$

Ist dagegen das Signal vorhanden und Rauschen bzw. invertiertes Rauschen werden binaural präsentiert, dann ist das Signal hörbar (logisch "1") und es gilt:

1-Weg-Experiment: A? - nein!



2-Weg-Experiment: A? - ja!

Abb.3: Das Distributivgesetz der klassischen Logik ist beim binauralen Hören verletzt. $A \wedge (B \vee -B)$ führt zu einem anderen Ergebnis als $(A \wedge B)$ oder $(A \wedge -B)$.

$$A \wedge (B \vee -B) = 1.$$

Damit ist das Distributivgesetz formal verletzt:

$$1 = A \wedge (B \vee -B) \neq (A \wedge B) \vee (A \wedge -B) = 0 \vee 0 = 0 .$$

Warum sind Wahrnehmungen nicht in eine klassische Logik zu pressen, ähnlich wie im Mikrokosmos klassische Konzepte versagen? Zunächst ist einzuräumen, daß eine konsistente Interpretation obiger Äquivalenzumformungen auf einer einzigen semantischen Ebene problematisch ist, da verschiedene Stufen der Informationsverarbeitung vermischt werden. Ähnliche Probleme ergeben sich aber auch in der quantenlogischen Formulierung, da verschiedene ontische Ebenen verknüpft werden [9]. Die beiden Klammerausdrücke liefern Faktisches nur in dem jeweiligen einkanaligen (monauralen) Experiment. In dem Zweikanal-Experiment, wird neue Information durch die Interferenz der beiden Kanäle gewonnen, die auf der nächsten Ebene mit Bedeutung versehen wird (Lokalisierung der Signale). Das vorliegende binaurale "Paradoxon" reduziert sich darauf, daß eine separate Verarbeitung von $(A \wedge B)$ und $(A \wedge -B)$ zu einem anderen Ergebnis führt als die kombinierte binaurale. Wenn wir wissen, welchen Weg das Signal genommen hat (entweder rechts oder links), verschwindet der Wellenaspekt (sowohl rechts, als auch links). Die logische Paradoxie ist eine andere Umschreibung der bekannten Tatsache, daß das Ganze mehr als die Summe der isolierten Teile ist. Die Ungültigkeit des Distributivgesetzes und die Benutzung verschiedener nichtklassischer Logiken ist letztlich Ausdruck der Tatsache, daß unser Wahrnehmungssystem komplex genug ist, um über verschiedene Ebenen zu springen. Es kann autonom wählen, was es als Objekt und was als Untergrund ansieht. Dies ist unter anderem eine wesentliche Grundlage unserer Kreativität. Da das Distributivgesetz der klassischen Logik lediglich eine äquivalente Umgruppierung von Fakten

darstellt, kann es nicht auf kreative Sprünge angewandt werden, da hier Information erzeugt oder vernichtet wird. Auch Weglassen ist kreativ! Analog ist wegen des Projektionscharakters der Meßprozeß der Quantenmechanik informationsmäßig nicht neutral.

7. Interne Kreativität und die Verstehbarkeit der Welt

Ist das Universum verständlich und, wenn ja, warum? Jeder Erkenntnis treibende Mensch ist von der Hoffnung geleitet, das Universum sei intelligibel, andernfalls könnte er nicht forschen. Daß wir Kosmos und nicht Chaos vorfinden, liegt an den erfahrbaren Strukturen auf unterschiedlichen Schichten, seien es Mikroteilchen, Mikroben, Menschen oder Milchstraßen. Am Beispiel des Gehörs haben wir gesehen, daß diejenigen Prinzipien, die der Entfaltung von Komplexität draußen unterliegen, ebenso zur Rekonstruktion von Komplexität in unseren Köpfen genutzt werden. Insofern spiegeln die Strukturen des Geistes die Struktur der Materie. Dies wird ermöglicht durch die enorme Komplexität unseres Gehirns, von der die beiden diskutierten peripheren Stufen akustischer Informationsverarbeitung nur einen sehr begrenzten Eindruck vermitteln. Was veranlaßt zur Hoffnung, daß wir hinter den Spiegel blicken können?

Nach Pauli [10] ist die Welt deswegen verstehbar, weil der menschliche Geist in uns als auch das wahrgenommene Objekt außer uns der gleichen kosmischen Ordnung unterliegen. Den Vorgang des Verstehens sowie die Beglückung, die der Mensch bei einer neuen Erkenntnis empfindet, begreift er in Anlehnung an Plato als ein zur Deckung Kommen von präexistenten inneren Bildern mit äußeren Objekten und ihrem Verhalten. Vielleicht ist dieses unmittelbare intuitive Gefühl von Einsicht, Schönheit und Befriedigung das einzige, was uns an der kosmischen Ganzheit teilhaben läßt. Werden wir konkret, so tut sich sofort eine Schere zwischen Innen und Außen auf, zwischen Symbol und Wirklichkeit, zwischen einer zweckmäßigen Beschreibung der Realität und ihrem eigentlichen Wesen. Was wir hoffen können ist lediglich, daß die beschriebenen selbstreferentiellen Zirkel nicht nur kreativ sind, sondern auch selbstkonsistent. Wie unter diesen Aspekten wissenschaftlicher Fortschritt vorangeht, darauf gibt eine in [2] beschriebene akustische Wahrnehmungssparabel eine selbstreferentielle Antwort.

Literatur

- [1] A. Einstein, Aus meinen späten Jahren, Stuttgart, 1984
- [2] M. Euler in: Grundprinzipien der Selbstorganisation (K.W. Kratky, F. Wallner, Hrsg.), Darmstadt, 1990, S.31-58
- [3] Ch. Sievers, J. Stelzer, Simulation fremderregter autonomer Oszillatoren, Diplomarbeit, FH Hannover, 1991
- [4] E. Schrödinger, Was ist Leben, München, 1987
- [5] P.Jung, P.Hänggi, Physikalische Blätter 47 (1991) 1005-1007
- [6] R.P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21 (1982) 467-488
- [7] J. Audretsch (Hrsg.), Wieviele Leben hat Schrödingers Katze, Mannheim, 1989
- [8] M. Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics, New York, 1974
- [9] M. Euler in: Information Dynamics (H. Atmanspacher, H. Scheingraber Hrsg.), NATO ASI Ser. B 256, New York, 1990, S. 167-183
- [10] W. Pauli, Physik und Erkenntnistheorie, Braunschweig, 1984