

Physikerrundbrief 2/2000

12. September 2000

Editorial

Liebe Rundbriefempfänger, hier also die zweite Ausgabe dieses Machwerkes, aus Zeitgründen (hoffentlich nur diesmal) weniger professionell geheftet. Es gibt diesmal eine Reihe von Beiträgen von Thomas Schmidt, die mich gerade nicht mehr zur letzten Ausgabe erreicht haben. Es gibt weiterhin die versprochenen Artikel zum Wirkungsbegriff von F. W. Dustmann und mir. Obwohl vollkommen unabhängig voneinander entstanden zeigen sie doch erstaunlich viele Berührungspunkte und ergänzen sich durchaus. Ich hoffe, daß sich die angerissenen Gedanken weiter vertiefen lassen.

Ich möchte an dieser Stelle nochmal offiziell anregen, daß auch kurze, ja aphoristische Beiträge gegeben werden. Bei einer anderen Rundbriefinitiative, an der ich teilnehme, ist das Verfahren so, daß man ein vorformatiertes Merkblatt für die Gedanken, die einem beim Lesen so kommen, beiliegen hat und auf diesem Wege allerlei Ergänzendes und Stimmungsbilder einzufangen hofft. Ist das bei uns auch nötig? Auf der technischen Seite haben F. W. Dustmann und ich uns auf den Textsatz mit \LaTeX eingespielt. Ich tippe schriftlich eingereichte Beiträge gern ab, bin aber auch "virtuellen" Formaten gegenüber aufgeschlossen. Thomas Schmidt ist ein eingefleischter (vielleicht aber nicht unbelehrbarer) *Wordianer*, hatte aber die schöne Idee, seinen Text als ASCII-Format (bzw. was Word dafür hält) zu exportieren und eine separate Übersetzungstabelle für die mathematischen Sonderzeichen und Formeln, die sehr verstümmelt wiedergegeben werden, beizufügen — so geht es jedenfalls also auch. In der Hoffnung auf weiter zahlreiche, schriftliche oder verstümmelte oder auch unverstümmelte Beiträge grüße ich Sie alle herzlich

Florian Theilmann

Inhaltsverzeichnis

Editorial	1
T. Schmidt: Polarität von Bosonen und Fermionen	3
T. Schmidt: Bemerkungen zum Zusammenhang vom Lichtäther mit der Quantentheorie des Lichtes	5
F. W. Dustmann: Weitere Gedanken zum Wirkungsbegriff	9
F. Theilmann: Zur Bedeutung der Wirkung in der Mechanik	12
Thomas Schmidt: Ergänzung zum Beitrag von Jörg Strempler	18
Adressenliste	21

Es liegt – separat geheftet – der zweite Teil von Alec Schaerers Text bei.

Herr Dustmann gibt noch folgenden Literaturhinweis:

Hier ein Literaturhinweis zu den Originalexperimenten zur Hohlraumstrahlung von Lummer und Pringsheim:

George L. Trigg
Experimente der modernen Physik
Akademie-Verlag, Berlin 1984 / Vieweg-Verlag, Braunschweig

Polarität von Bosonen und Fermionen

VON T. SCHMIDT

Im Kosmos führt Rotation zu Gestaltbildung — unser Planetensystem sowie die Vielfalt der Spiralnebel sind Beispiele dafür. Alle Formbildung mit Verdichtung müßte durch zunehmende Fliehkräfte aber wieder in Auflösung enden, gäbe es nicht Prozesse, durch die Drehbewegung von den Körpern, in denen sie ihren Ursprung hat, getrennt werden könnte. Auch für unser Planetensystem gilt das: in der Sonne sind mehr als 99% der gesamten Masse, in den Planetenbewegungen außerhalb der Sonne dagegen etwa 99% des gesamten Drehimpulses des Planetensystems vereinigt. Kräfte, die diese Trennung bewirken, finden sich vor allem in *Magnetfeldern*, die auch in unserem Planetensystem heute noch, unmerklich aber stetig, Drehimpuls aus der Sonne in den Umkreis tragen. Dieser kosmisch großen Geste der Gestaltbildung aus Drehung durch Vermittlung von Magnetfeldern entspricht für das stofflich *Kleinste*, dass sich der *Spin* als Rotationsmerkmal der Elementarteilchen fast nur in der Wechselwirkung mit Magnetfeldern der Beobachtung erschließt.

Das um 1900 von Planck entdeckte quantenhaft-ganzzahlige Verhalten der Strahlung führte vor allem durch Heisenberg und Schrödinger gut 20 Jahre später zur Theorie der Quantenmechanik - nicht durch Ableitung aus Beobachtungen, sondern durch die Suche nach mathematischen Prozessen, die möglichst gleichartiges Verhalten zeigen wie die zunächst rätselhaften Experimente. Das führte zu den *Operator*-Gleichungen der Form $\mathcal{O}\psi(q_1, q_2, q_3 \dots q_N) = \lambda\psi(q_1, q_2, q_3 \dots q_N)$, in denen die Operatoren \mathcal{O} irgendwelche Rechenvorschriften sind, die auf die komplexen Eigen- oder Zustandsfunktionen ψ der Koordinaten q_i der N Teilchen eines Systems angewandt werden. Den Quanten entsprechen diskrete Eigenwerte λ , das sind Zahlen, für die die ψ -Funktionen als Lösungen existieren. (Am bekanntesten ist die SCHRÖDINGERGleichung). Aus den ψ -Funktionen ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, den entsprechenden Zustand tatsächlich zu messen.

Wichtig für Identitätsbetrachtungen von Teilchen ist der *Vertauschungsoperator* Π_{ik} , der in der Zustandsfunktion die Teilchen i und k vertauscht. Da sich ein physikalisches System nicht wirklich durch den Tausch der Nummerierung der Teilchen ändert, müssen physikalisch sinnvolle Zustandsfunktionen derartige Vertauschungsgleichungen erfüllen. Weil zwei gleiche Vertauschungen hintereinander keine Änderung bedeuten, ist $\lambda^2 = 1$, es gibt hier also nur zwei Eigenwerte, $\lambda = +1$ für symmetrische und $\lambda = -1$ für antisymmetrische ψ -Funktionen, denen zwei verschiedene Teilchenarten entsprechen, **Bosonen** ($\lambda = +1$) und **Fermionen** ($\lambda = -1$). Wählt man für zwei gleiche Teilchen dieselben Koordinaten $q_i = q_k$, folgt für Fermionen $\psi = -\psi$, es ist dann nur $\psi = 0$ und die dar-

aus entstehende Wahrscheinlichkeit $w = 0$ möglich. Das ist das **Pauliprinzip**, das zuerst aus dem Aufbau der Atomhüllen erschlossen wurde: in keinem physikalischen System gibt es zwei *Fermionen* gleichen Zustands. Für *Bosonen* gilt diese Einschränkung nicht, und geht man mit Hilfe der *zweiten Quantelung* zu Operatorgleichungen von Teilchenzahlen und den *Übergangswahrscheinlichkeiten* zwischen verschiedenen Zuständen über, so zeigt sich sogar, dass sich die *Bosonen* im gleichen Endzustand anreichern, sofern dieser nicht schon stärker als der Ausgangszustand besetzt ist, für *Fermionen* aber ist kein Übergang in einen schon besetzten Zustand möglich. Lange fehlte die theoretische Begründung für den experimentellen Befund, dass Bosonen Teilchen mit ganzzahligem Spin $s=0; 1; 2\dots$, Fermionen solche mit halbzahligem Spin $s=1/2; 3/2\dots$ sind. Fermionen, die in jeder Raumrichtung quantenmechanisch die Qualität einer Eigenrotation haben, finden sich überall in der Welt, wo sich gegenständlich-wägbare Substanz in der *Verwirklichung* (= *enérgeia* des Aristoteles) findet. Betrachten wir nur stabile Elementarteilchen, die mindestens 0,00001 sec existieren, so sind das die *Massebildner* Proton und Neutron, die die Sinnesqualitäten und chemischen Eigenschaften der Stoffe bestimmenden Elektronen und die rätselhaften Neutrinos, ohne die der β -Zerfall unmöglich wäre und die, einmal entstanden, nahezu jeden weitere Kommunikation mit den materiellen Weltgebilden verlieren; als *Fermion* wäre es folgerichtig, Neutrinos hätten eine eigene Masse; das ist zwar noch unbewiesen, liegt aber astrophysikalisch nahe. Als stabiles Boson gibt es nur das masselose Photon (Spin $s=1$), welches das Licht repräsentiert und damit den Inbegriff der die Raumbeziehungen in der Welt aufbauenden *Kommunikation* darstellt.

Erst ab 1957, mit dem Fortschritt der *Quantenfeldtheorie*, die Quantenmechanik mit der Relativitätstheorie zu vereinigen, konnten auch auf mathematischen - Gedankenwegen die Spin-Eigenschaften der Bosonen und Fermionen aus der Symmetrie und Antisymmetrie der ψ -Funktionen abgeleitet werden. Für die Photonen ergibt sich das aus der Tatsache, dass in der Quantenfeldtheorie nicht, wie zuvor das Licht aus schwingenden elektromagnetischen Feldern bestehend gedacht wird, sondern dass umgekehrt sämtliche elektrischen und magnetischen Felder aus der Überlagerung von Photonen entstehen, aus deren Grundcharakter, *Oszillatoren* zu sein, sich die Eigenschaft der bosonischen Zustandsfunktion physikalisch zwangsläufig ergibt; außerdem folgt zugleich, dass es keinerlei Sinn hat, Photonen in irgendeinem Sinne räumlich bestimmte Lokalität zuzuschreiben, sie existieren in Raum und Zeit nur als *Möglichkeit* (= *dýnamis* des Aristoteles) ohne jede räumliche *Verwirklichung*. Mathematische Ableitungen ergeben dann für alle anderen Bosonen ebenfalls symmetrische Zustandsfunktionen. Das ist bei Fermionen anders und das Wesentliche zeigt sich bereits für die stabilen Fermionen mit der *Spinquantenzahl* $s = 1/2$, welche bewirkt, dass sie nie ohne Rotationscharakteristika auftreten können. Das entspricht einer zusätzlichen Komponentenaufspaltung der ψ -Funktion, die mathematisch durch **Spinoren** (Matrizen

mit vier Elementen) beschrieben wird. Da der Spin s in jeder Raumrichtung grundsätzlich $+1/2$ oder $-1/2$ ist, haben die Spinor-Komponenten unterschiedliches Vorzeichen, was dann für die Zustandsfunktionen den Vorzeichenwechsel bewirkt, der die Symmetrie in eine Antisymmetrie überführt, wodurch die Fermionen zu den unverwechselbaren Elementen *verwirklichter* Körper im Raum werden. Der Urzustand der Welt der modernen Kosmologie als rein *bosonischer* Strahlungskosmos der *Zukunfts-Möglichkeiten*, ohne jede räumliche Festlegung und Unterscheidbarkeit, der sich noch nicht in das *fermionische* Nebeneinander der Raumesdinge hinein *verwirklicht* hatte, findet seine geistige Erfüllung in Rudolf Steiners Darstellungen vom Anfang des *alten Saturns* als reinem Wärmekosmos.

Bemerkungen zum Zusammenhang vom Licht-äther mit der Quantentheorie des Lichtes

VON THOMAS SCHMIDT

Als Rudolf Steiner 1925 in seiner allerletzten schriftlichen Äußerung an die Mitglieder der Anthroposophischen Gesellschaft, dem Brief “der Natur zur Unter-natur” nochmals drängend auf die Problematik der “Lebenswege” in Naturwis-senschaft und Technik des beginnenden 20. Jahrhunderts hingewiesen hatte, gab es von der heute modernen Physik nur viele Fragen und bruchstückhafte Lösungsversuche. Die “Quantenmechanik”, wurde von Erwin Schrödinger erst 1926 begründet, ihre Deutung aber blieb noch lange umstritten. Da Rudolf Stei-ner sich noch weitgehend den dem Determinismus des 19. Jahrhunderts entstam-menden physikalischen Forschungen seiner Zeit gegenüber sah, sind also nicht alle seine Bewertungen unbesehen in die heutige Zeit zu übertragen, obwohl - wie F. W. Dustmann in Bemerkungen im ersten dieser Rundbriefe ausgeführt hat - Ru-dolf Steiner schon 1921 zu erstaunlich zukünftigen Hinweisen zu physikalischen Fragen in der Lage war, bei denen er vor allem auf den Unterschied zwischen “positiv und negativ” aufmerksam machte. Hier nun seien noch einige Gedanken zum Licht angefügt, die notwendigerweise auch die Wärme einschließen müssen und die eine Ergänzung zu den Referaten von Jörg Stempfer über die Nichtlo-kalität von Photonen und von mir selbst über Fermionen und Bosonen auf der Physikertagung im Januar 2000 sein sollen:

Wenn wir die Formen und Gestalten, sowie ihre Zusammenhänge und Verwand-lungen in der Natur in ihren eigenen, nicht stofflichen Qualitäten begriffen haben, die zwar nicht aus den Gesetzen der physischen Welt ableitbar sind, jedoch mit diesen im Wechselverhältnis stehen, so ist deutlich, dass es zu dem Stoffaspekt der vier “alten” Elemente (Erde, Wasser, Luft und Feuer) oder auch Aggregat-

zustände (fest, flüssig, gasförmig, wärmehaft) Gestalten und Zusammenhänge bildende Entsprechungen in der ätherischen Welt geben muss. Das Element Wärme (Feuer) allerdings zeigt Besonderheiten: Zum ersten entspricht ihm kein üblicher Aggregatzustand, Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist aber bekannt, dass die Wärme durchaus einen eigenen Materiezustand darstellt und damit einen Doppelcharakter besitzt, denn diese Möglichkeit (als "strahlende Wärme") selbst ein besonderer "bosonischer" Materiezustand zu sein (s. F. W. Dustmann im ersten dieser Rundbriefe), berührt nicht die zuvor allein akzeptierte Tatsache, dass die Wärme auch als Eigenschaft anderer Körpern auftritt, die dann allerdings seit dem 19. Jahrhundert nur noch als mikroskopischer Bewegungszustand angesehen wurde. Ferner bereitet es besondere Schwierigkeiten, die Übergänge "Schmelzen" und "Verdampfen" bis in den Wärmezustand fortzusetzen. Das ist nur durch "Zerstrahlen" von Materie möglich, wie es bei radioaktiven Prozessen geschieht, und handelt dabei dem Wesen nach von kosmischen Vorgängen.

Eine weitere Eigenheit der Wärme ist ferner, dass diese der einzige Materiezustand ist, der durch nichts gehindert werden kann, sich in den gesamten kosmischen Raum auszubreiten. Dazu gehört eine weitere Besonderheit: Dehnt sich ein mit "normaler" Materie erfüllter Raum aus, so muß die durchschnittliche Materiedichte umgekehrt wie die dritte Potenz des Durchmessers abnehmen. bei einem mit strahlender Wärme gefüllten Volumen wird im Falle einer Raumausdehnung die Dichte umgekehrt zur vierten Potenz des Durchmessers kleiner. Das bedeutet, dass in einem sich ausdehnenden Volumen die Wärmesubstanz tatsächlich weniger wird und in den Raum hinein verschwindet. Die durch nichts begrenzbare Wärmeausdehnung erscheint als negative, in den Umkreis hinaus wirkende Schwerkraft, wie das Rudolf Steiner im zweiten Teil seines "Wärmekurses" schildert, aus dem auch die folgende Charakterisierung entwickelt wurde:

Aus den geschilderten Besonderheiten des Wärme-Elementes geht hervor, dass der Wärmeäther zumindest in einem Teil seiner Eigenschaften von dem Wärmeelement ununterscheidbar ist, und es deshalb eher die Art der Auffassung als die Sache selbst ist, ob man die Element- oder Ätherseite der Wärme vor sich hat. So repräsentiert der Wärmeäther die Realität einer alle irdischen und kosmischen Räume verbindenden Gemeinsamkeit, die von dem konkreten, differenzierten Weltinhalten allenfalls modifiziert, niemals aber aufgehoben werden kann. Die Gase dehnen sich zwar ebenso wie die Wärme in den Raum aus, aber nur, wenn dem keine materiellen Hindernisse entgegenstehen, denn eine gefüllte Propan-Gasflasche, korrekt versiegelt, hat - anders als jede bestens verschlossene Thermoskanne - auch nach vielen Jahren von ihrem Inhalt nichts verloren. Dieselbe Signatur finden wir, nun unabhängig von substanzieller Stofflichkeit bei dem den Gasen zugeordneten Lichtäther: Der Erscheinungszusammenhang des Raumes wird durch die dem Licht zugrundeliegenden Gestaltungskräfte offenbar, aber - anders als bei der Wärme - deutlich differenziert durch die Ordnung der

Gegenstände in der Welt. So treten lichtloser Schatten, volle Helligkeit und alle Zwischennuancen von Halbschatten auf, durch die überhaupt erst Raumstruktur der Welt Erscheinung wird. In diesem Sinne ist es sogar erlaubt, das Wesen des Lichtes selbst schon als übersinnlichen Lichtäther anzusehen, zumal ja das den Raum zur Erscheinung bringende Licht grundsätzlich unsichtbar und streng von der stets auf begrenzte Einzelheiten beschränkten Beleuchtung zu unterscheiden ist.

Die bereits bei der Wärme erwähnte "negative Schwerkraft" tritt beim Licht noch deutlicher hervor, und wenn der Astronom die Bewegung kleiner Partikel in unserem Sonnensystem - etwa in Kometenschweifen - richtig berechnen will, hat er tatsächlich die wirkende Gravitationskonstante um einen bestimmten von der Lichtstärke und den Partikeleigenschaften abhängigen Anteil zu verkleinern, und in seinem "dritten naturwissenschaftlichen Kurs" benutzt Rudolf Steiner in der Tat gerade die Kometen als Beispiele einer Begegnung von positiv ponderabel-materiellen und negativ imponderabel-ätherischen Kräften. Zur gemeinsamen Besonderheit von Licht- und Wärme-Äther unter allen vier Ätherarten gehört auch, dass nur sie uns Sinneswahrnehmungen eigener Qualität vermitteln. Für die Wärme ergibt sich das unmittelbar aus der Teil-Identität von Element und Ätherart, beim Licht ist es eine besondere Eigenschaft, wie sich aus seiner am blauen Himmel noch vorhandenen Erscheinungsidentität mit dem Luftelement (besonders eindringlich geschildert im 14., dem Pfingst-Vortrag 1924 des zweiten Bandes der Karmavorträge Rudolf Steiners) dann der an sich unsichtbare, räumlichen Zusammenhang aller Welt Dinge herauslöst und unabhängig von Materie-Verbindungen zwischen den Gegenständen Erscheinungsrealität wird. So sind uns auch allein durch Wärme und Licht Sinneswahrnehmungen aus dem Kosmos möglich. Im letzten Vortrag des "Wärmekurses" führt Rudolf Steiner aus, wie dieses kosmisch "Besondere" auch stets auf der Erde vorhanden ist, "...wenn Licht in Begleitung von Wärme erscheint: Der Raum zerreißt, der Raum enthüllt uns das, was in seinem Innern ist, während er uns in seinen gewöhnlichen drei Dimensionen, die wir vor uns haben, nur seine Außenseite zeigt. Der Raum führt uns in sein Inneres..."

Im Jahre 1925 herrschte auch gerade in der Physik des Lichtes ein unauflösbarer Widerspruch: Überall, wo das Licht materielle Wirkungen entfaltete, waren diese nicht anders als durch ein "Bombardement" einzelner Teilchen, der Photonen zu verstehen, die zwar selbst nicht beobachtbar sind, aber als "Energie-Quanten" in der Materie messbare Wirkungen hervorriefen. Die Lichtausbreitung durch den Raum aber, die Entstehung optischer Bilder, die Lichtbrechung und Beugung, sind für dasselbe Licht als Interferenzen von Wellen zu erklären, die allerdings ebenfalls unbeobachtbar bleiben. Photonen -Wirkungen sind an bestimmten Orten im Raum zu zählen, Wellen-Wirkungen lassen sich analysieren, indem Messungen an verschiedenen Orten angestellt und verglichen werden - natürlich sind

auch im letzteren Fall stets nur Energiequanten und damit die Wirkung einzelner Partikel messbar. Nun kann aber das Licht so weit abgeschwächt werden, dass jeweils nie mehr als ein einzelnes Photon in der Apparatur und ihrer Umgebung unterwegs ist, das dann natürlich auch jeweils nur an einem einzigen Messpunkt registriert wird. Dennoch ergibt sich aber auch dann nach einer, der geringen Helligkeit entsprechend langen Messzeit ein ebenso klares Interferenzmuster, als ob nicht nacheinander einzelne Photonen einzelne Orte, sondern eine ausgedehnte, zusammenhängende Welle die verschiedenen Messapparaturen gleichzeitig getroffen habe. In Übereinstimmung mit dem Bosonen-Charakter des Lichtes ist die einzig mögliche Erklärung dafür, dass Photonen keinerlei physikalische Lokalität in Raum und Zeit zugeschrieben werden kann, sondern jedes einzeln allein den gesamten, zusammenhängenden Raum mit Möglichkeiten durchdringt, an einzelnen Orten reale physikalische Wirkungen hervorzurufen. Eine solche Erklärung ist aber dem ideellen Sinn nach dasselbe wie die oben vorgestellten Charakterisierungen des Lichtäthers, der unsichtbar Raum schaffend die Welt gestaltet und uns enthüllt, was der Raum "in seinem Innern ist". Wieder zeigt sich hier, wie gerade neuste Entwicklungen der Physik zu Bestätigungen für die Aussagen Rudolf Steiners führen, wenn die Forschung nicht nur durch ihre Ergebnisse, sondern durch die "Gestensprache" ihrer Methoden angeschaut wird. Dabei lassen sich dann aber auch besonders die Gefahren beleuchten, die sich aus einer einseitigen Hingabe an die aus der modernen Wissenschaft entstandenen Technik ergeben. Darüber äußert sich Rudolf Steiner eindringlich noch in seinem letzten zu Beginn erwähnten Aufsatz "Von der Natur zur Unternatur".

Hier ergibt sich eine nächste Aufgabe: nämlich die Untersuchung, ob und wie es von dieser "Unternatur" zu den drei "unterphysischen" Gebieten aus der Fragenbeantwortung nach dem Vortrag "Die Ätherisation des Blutes" vom 1. Okt. 1911 (GA 130) und dann vor allem zu dem "U-Gebiet" des Wärmekurses eine Verbindung geben mag. In diesem Zusammenhang ist dann den Spuren der vergangenen und den Keimen der zukünftigen Evolution von Erde und Menschheit in der gegenwärtigen Erdenwelt weiter nachzugehen. Dass die vier Elemente und die entsprechenden Ätherarten die fortwährende Wirksamkeit der vergangenen drei planetarischen Entwicklungszustände Saturn, Sonne, Mond und die gegenwärtige Erde repräsentieren, dürfte aus den vielfachen Ausführungen Rudolf Steiners vergleichsweise deutlich sein, dass das im "Wärmekurs" geschilderte "U-Gebiet" des "Wirkens von Gestalten auf Gestalten" unterhalb des festen Zustandes, das u.a. in der Polarisation des Lichtes zum Ausdruck kommt, einem Zukunftskeim der planetarischen Evolution entspricht und wie dieser dann mit der "Unternatur" und modernen technischen Entwicklungen zusammenhängen könnte, müsste weiter ausgearbeitet werden, auch wenn es dazu schon eine außerordentlich bemerkenswerte Publikation von D. Auerbach und E. A. Müller ("Das fünfte - das neue - Element", Elemente der Naturwissenschaft, 69/2, 1998) gibt.

Weitere Gedanken zum Wirkungsbegriff

VON F. W. DUSTMANN

Eine moderne Definition des Wirkungsbegriffs kann man auf folgende Weise formulieren:

$$S_W = \int_W \mathbf{p} \cdot d\mathbf{r} - E dt \quad (1)$$

Darin steht W für Weltlinie. Es handelt sich formal betrachtet also um ein Wegintegral im Ereignisraum, das den Charakter einer Pseudo-Metrik hat. Eine echte Metrik ist es nicht, weil S auch negativ werden kann. Einen solchen Weg im Ereignisraum bezeichne ich im Folgenden als Prozess. Üblicherweise ordnet man einem Prozess W als Maß eine Dauer

$$\tau = \int_W d\tau = \int_W \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt \quad (2)$$

zu. Dies ergibt sich aus einer rein phoronomischen Betrachtungsweise. Die Wirkung kann also auch als raumzeitliches Maß gesehen werden, wobei hier aber ein dynamischer Aspekt ins Spiel kommt, d.h. die Wirkung hängt nicht nur von der durchlaufenen Weltlinie ab, sondern auch noch vom Körper, der diese Weltlinie durchläuft, und von dessen Wechselwirkungen mit der Umgebung.

Allgemein gilt:

$$S_W = \int_W p_\mu dx^\mu = \int_W \mathbf{p} \cdot d\mathbf{x} \quad \text{und} \quad \tau_W = \int_W \sqrt{g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu}$$

mit der Einstein'schen Summenkonvention über doppelt vorkommende Indizes.

Was dies bedeutet, kann an einem geometrischen Beispiel verdeutlicht werden:

$$s = \int_W \sqrt{v_x^2 + v_y^2} dt$$

ist die normale räumliche Weglänge eines durchlaufenen Weges, während

$$L_W = \int_W \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x}$$

die beim Durchlaufen des Weges verrichtete Arbeit ist, also eine physikalische Größe, die den Aufwand beschreibt, der notwendig ist, wenn der Weg durchlaufen werden soll. Diese Arbeit ist im Allgemeinen nicht proportional zur Weglänge, da sich \mathbf{F} längs des Weges ändert. Ähnliches gilt auch für die Wirkung einer Weltlinie. Man darf diese Aufwandsberechnung aber nun nicht mit der Arbeitsberechnung verwechseln, denn es handelt sich um ganz andere Größen. Zu beachten ist ferner, dass es sich um die Gesamtenergie und den Gesamtimpuls handelt

nicht um kinetische Energie und kinetischen Impuls, d.h. die potentiellen Anteile sind ebenfalls enthalten. Die Bedeutung dieser Größen $\mathbf{p} \cdot d\mathbf{x}$ und $E dt$ ist im Wesentlichen dieselbe, die ich bereits in meinem Aufsatz über den Leibniz'schen Wirkungsbegriff beschrieben habe.¹

Stellt man den Bezug zur klassischen Mechanik her und bleibt dabei im Rahmen der Systeme, bei denen die Kräfte aus einem Potential ableitbar sind, so erhält man aus (1):

$$S_W = \int_W (mv^2 - E) dt = \int_W (T - V) dt \quad (3)$$

Dies ist die bekannte Hamilton'sche Wirkungsfunktion, die sich aus einer Integration der Lagrangefunktion $L = T - V$ über die Zeit alleine ergibt. Der Vorteil der Gleichung (1) besteht darin, dass räumliche und zeitliche Koordinaten gleichberechtigt vorkommen. Interessant ist ferner, dass (1) die typisch relativistische metrische Struktur aufweist, aber dennoch auf die klassische Lagrangefunktion $L = T - V$ führt.

Man kann die Größe S_W ebenfalls mit der optischen Weglänge vergleichen, also der Größe $\Lambda = \int_W n ds$. In diesem Fall wird für optische Abstände ebenfalls eine modifizierte Metrik im Raum verwendet. Beim Phänomen der optischen Hebung wird dieser Abstandsbegriff unmittelbar sinnlich erfahrbar. Bei der Brechung erleben wir, dass die Lichtwege geodätisch bezüglich dieser Metrik sind. Allerdings muss man wohl mit einem modifizierten Geodätenbegriff arbeiten, da es sich nicht um ein reines Minimalprinzip handelt, sondern um ein Stationaritätsprinzip. Trotzdem ist der Gedanke interessant die Wirkung als *mechanische Weglänge* in Analogie zur *optischen Weglänge* einzuführen. Von dieser Begriffsbildung ist dann der Schritt zur Wellenmechanik nicht mehr weit, da man ja auch in der Optik die Wellenlänge als eine durchgängige Längeneinheit betrachten kann, mit der die optische Weglänge gemessen wird. Die Größe

$$\Phi = \frac{\int n dx}{\lambda_0}$$

ist dann eine Phase. Die entsprechende Größe in der Mechanik ist $\Phi = \frac{S_W}{\hbar}$.

Damit wird auch deutlich, welche Bedeutung das Wirkungsquantum \hbar hat. Es ist genau die *mechanische Weglänge* (im Wirkungsmaß), die einer Phasenänderung von 2π entspricht, also einer vollen Periode. Ungelöst bleibt allerdings die Frage, warum für Bewegungsvorgänge eine periodische Abhängigkeit eine solch große

¹„Die Entstehung des Wirkungsbegriffs“ in „Physikerrundbrief 1/2000“

Bedeutung hat. Die Aussage, dass es sich eben um ein Wellenphänomen handele, ist ziemlich unbegründet, da die Schlussrichtung falsch ist. Ein Wellenphänomen würde zwar die periodische Abhängigkeit erklären, aber umgekehrt muss nicht jede periodische Abhängigkeit zu einem Wellenphänomen führen, es sei denn man verändert den Wellenbegriff derartig, dass beides synonym wird. Mir scheint jedenfalls, dass hier noch einiges zu klären ist.

Die Hoffnung besteht, dass der Leibniz'sche Begriff der materiekonstituierenden Kraft hier weiterhelfen könnte. Es stellt sich allerdings die Frage, ob eine Anknüpfung an den Leibniz'schen Wirkungsbegriff wirklich zu einer zeitgemäßen Begriffsbildung führt, oder ob darin zu viel metaphysischer Ballast verborgen ist. Jürgen Vogt schreibt zum Schluss seines Beitrags zum Physiker-Rundbrief 1/2000: „Denn es erfordert viel Kraft und Anstrengung, eine Idee wie das Licht so tragfähig zu machen, daß sie sich nicht mehr auf einen materiellen Vorgang stützen muß.“ Woran liegt es eigentlich, dass wir so stark dazu neigen, alle Phänomene auf zu Grunde liegende materielle Vorgänge zu beziehen? Offenbar erscheint uns diese Materie als etwas Sicheres, Unwandelbares und Unzerstörbares, als etwas nicht weiter Erklärbares oder Erklärungsbedürftiges. Dies wird uns suggeriert durch die große Stabilität der Materiephänomene. Materie als Phänomen beruht auf Sinneseindrücken, die wie kaum andere eine inhärente Konstanz aufweisen, die offenbar unseren Geist so einschläfern, dass wir sie als etwas Selbstverständliches annehmen. Andererseits steht nichts der Vorstellung entgegen, dass diese Materie in jedem Augenblick an dem jeweiligen Ort, wo wir sie beobachten, als Phänomen neu geschaffen wird. Diese Erschaffung unterliegt aber nicht der Willkür des Beobachters, sondern folgt strengen, einschränkenden Gesetzen, die uns die Vorstellung von der Erhaltung der Materie nahelegen. Macht man sich klar, dass Materie als Phänomen stets neu geschaffen werden muss, so macht es eigentlich gar keinen so großen Unterschied mehr, ob dieser Erschaffungs- (und Vernichtungs-) Prozess durch einen kontinuierlichen, räumlich-zeitlichen Vorgang beschrieben wird oder durch einen sprunghaften, nicht kontinuierlichen Vorgang. Den kontinuierlichen, raumzeitlichen Vorgang favorisieren wir lediglich, weil wir so daran gewöhnt sind Materie als eine aller Wahrnehmung zugrundeliegende, unvergängliche Substanz zu betrachten. Ein Verständnis für anders geartete Vorgänge kann nur entstehen, wenn dieses Denken durch konkrete Erfahrungen erschüttert wird, die zeigen, dass dies eben nicht so ist, dass Materie also ein Phänomen ist, das durchaus einen flüchtigen Charakter haben kann, und dass unter geeigneten Umständen die gewohnte Konstanz der Substanz nicht mehr alles überlagert. Die Unbestimmtheit der Lokalisierung der Materie in der Quantenmechanik können wir dann vielleicht als Ausdruck der Tatsache auffassen, dass die Erzeugung des Phänomens Materie noch nicht vollständig realisiert ist. In der Quantenphysik erleben wir gewissermaßen den Vorgang der Materialisierung, wobei dieser Begriff nicht die Erzeugung einer Substanz aus dem Nichts meint, sondern die Hervorbringung eines Phänomens, das

wir als Materie bezeichnen.

Wenn wir uns dies klar machen, ist die Vorstellung von einer Kraft die notwendig ist um Materie zu konstituieren überhaupt nicht mehr so fern liegend, wie sie im ersten Augenblick vielleicht noch scheinen mochte. Natürlich wird der Begriff Kraft hier in einem anderen Sinn gebraucht, als es bei Newton der Fall ist. Ob allerdings die Leibniz'sche *vis viva* mv^2 wirklich ein geeignetes quantitatives Maß dieser Kraft ist, ob diese Kraft überhaupt quantifizierbar ist, das muss ich im Moment noch offen lassen. Die Formel (1) erweckt ja eher den Eindruck, dass der Energie-Impuls-Vektor (\mathbf{p} , E) die entscheidende Größe ist. Die *vis viva* kommt erst dadurch in's Spiel, dass man das vierdimensionale Wegintegral in ein Integral allein über die Zeit umwandelt, was vielleicht gar nicht so angemessen ist.

Was die Bedeutung des Wirkungsquantums für das Licht betrifft, so können wir feststellen, dass in diesem Fall anders als in der Mechanik kein unmittelbarer Bezug zu einer räumlichen Bewegung gegeben ist, sondern die Wirkung im Zusammenhang mit der lichtschaaffenden Kraft des Lichtfeldes gesucht werden muss. Jetzt besteht die Wirkung nicht darin, dass ein materieller Körper mit Masse auf seinem Weg durch Zeit und Raum als Phänomen geschaffen wird, sondern darin, dass ein bestimmtes Beleuchtungsfeld als Phänomen erschaffen wird. Dieses Lichtfeld ist seiner Natur nach bereits ein nichtlokales Phänomen, weil es einen Beleuchtungszusammenhang zwischen verschiedenen Körpern herstellt. Natürlich gibt es in diesem Zusammenhang auch räumlich-zeitliche Veränderungen, etwa die Wanderung einer Hell-Dunkel-Grenze. In diesem Zusammenhang taucht auch die Lichtgeschwindigkeit als Phänomen auf, aber nicht als Geschwindigkeit eines Körpers wie in der Mechanik, sondern als Geschwindigkeit einer Zustandsänderung des Lichtfeldes. Welche Rolle dabei das Wirkungsquantum spielt, muss einer späteren Untersuchung vorbehalten bleiben.

Zur Bedeutung der Wirkung in der Mechanik

VON F. THEILMANN

Ich hatte mich ja dafür interessiert, welche Inhalte sich heute in der (klassischen) Physik mit dem Wirkungsbegriff verbinden — nun scheint es, das Rätsel würde durch das, was ich beizutragen habe, vielleicht deutlicher, aber nicht geringer. Zunächst habe ich den Eindruck, Wirkung tauche als eigenständiger Begriff gar nicht so richtig auf, sondern nur eingebettet in die Begrifflichkeit des HAMILTONSchen Prinzips der stationären Wirkung. Wie noch darzustellen sein wird, trägt dieses Prinzip den Charakter einer *globalen Aussage*, ja mehr noch, es trägt

teleologische Züge. Was die Wirkung selbst dabei ist, erscheint in diesem Kontext – ganz anders als bei den Ausführungen von Herrn Dustmann im letzten Rundbrief – fast als nebensächlich oder beliebig.

Wir hatten im letzten Rundbrief das recht intuitive Bild einer Wirkung, die das zeitliche Integral einer Energie (also als “Wirkung” eher eine Anstrengung als eine Leistung!) bzw. das Wegintegral eines Impulses ist, kennengelernt. Die entsprechende Einheit *Joule-Sekunden* erscheint mir dabei immer noch recht arbeitshaft, die Extensivität (in Arbeit und zeitlichem Verlauf) des Vorganges betonend. Die Wirkung, die für einen realen, mechanischen Vorgang in diesem Sinne in Betracht kommt, ist aber gar nicht notwendig die, für die man sich vor dem Hintergrund der theoretischen Mechanik interessieren würde.

Das Wirkungsfunktional

Als *Funktional* bezeichnet man eine Abbildung aus einem Funktionenraum (oder auch nur einer Funktionenmenge) auf die reellen Zahlen. Es liegt also eine Art Aus- oder Bewertungsvorschrift für die Elemente der Definitionsmenge, typischerweise Bahnkurven im Konfigurationsraum (Phasenraum) vor. Für die Behandlung einer konkreten kinematischen Situation interessiert man sich für (hinreichend glatte) Kurven, die zu Beginn und Ende eines bestimmten Zeitintervalles durch feste Raumpunkte gehen (feste Anfangs- und Endpunkte):

$$\mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1, \quad \mathbf{x}(t_2) = \mathbf{x}_2 \quad (4)$$

Diese Kurven wären für die gegebenen Randbedingungen des Typs “zu einer bestimmten Zeit an diesem Ort, zu einem anderen (,späteren) Zeitpunkt an jenem” die Gesamtheit der Möglichen Bahnen bzw. genauer: der Bahnkurven $\mathbf{x}(t)$. Ein Funktional bewertet nun jede mögliche Bahn. Unter den denkbaren Arten, eine solche Bewertung durchzuführen, bezeichnet das Wirkungsfunktional die Methode, die *für die physikalisch sich einstellende Situation einen Extremwert annimmt*². Mir scheint diese Art, den Sachverhalt auszudrücken, angemessener als das übliche Vorgehen, das ein Wirkungsfunktional angibt und dann erstaunt darüber tut, daß es eben die rechten Extrema hat. Für eine freie Bewegung ist das Integral

$$\mathcal{A} = \int_{t_1}^{t_2} dt \mathcal{T} \quad (5)$$

²Extremwert impliziert eine Vergleichsumgebung, die nur mit einer (geeigneten) Norm auf dem Funktionenraum Sinn macht. Solche Normen gibt es viele und die Aussage hängt *nicht* von der Wahl der Norm ab

über die kinetische Energie \mathcal{T} ein Wirkungsfunktional und hier fallen die Wirkungsbegriffe tatsächlich zusammen. Für die allgemeine Bewegung in einem Potential U ist das Wirkungsfunktional allerdings

$$\mathcal{A} = \int_{t_1}^{t_2} dt \mathcal{L} \quad \text{mit} \quad \mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{U}, \quad (6)$$

also gerade *nicht* ein Integral über die Gesamtenergie (sondern über die LAGRANGESche Funktion), auch wenn \mathcal{L} die Dimension einer Energie hat. Weitere Verallgemeinerungen werden im folgenden deutlich.

Das Prinzip der stationären Wirkung

Die Extremaleigenschaft der Wirkungsfunktionale ist eine globale Aussage, sowohl was die Auswahl unter den möglichen Bahnkurven angeht, als auch für die extremale Kurve: offenbar ist die Kurve einfach als ganzes optimal, auch wenn der Kanonier und die Kanonenkugel beim Abschluß noch nicht wissen, wie es ausgehen wird. Es ist leicht einzusehen, daß kein noch so kleines Stück Bahnkurve unter der Extremalbedingung noch besser gemacht werden kann (vgl. [1]) — die Bahn, die ebendies kleine Stück besser machen würde, wäre sonst aus der Umgebung der extremalen Kurve und \mathcal{A} dafür doch noch kleiner bzw. größer (verlangt ist nur Extremstelle, nicht Minimum).

Damit ist auch plausibel, daß die globale Forderung “extremale Wirkung” lokale Eigenschaften der Extremalkurve bestimmt. Tatsächlich ergibt das Variationskalkül für \mathcal{A} , daß für die Extremalkurve gerade die LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen gelten müssen [1, 2, 3], die für kartesische Koordinaten, die übliche kinetische Energie und ein allein ortsabhängiges Potential einfach mit den NEWTONSchen Bewegungsgleichungen zusammenfallen: mit $\mathcal{L} = \frac{m}{2}|\dot{\mathbf{x}}|^2 - \mathcal{U}(\mathbf{x})$ ergibt

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{x}}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{x}} = m\ddot{\mathbf{x}} + \nabla \mathcal{U} = 0, \quad (7)$$

mit anderen Worten $F = ma$. Holonome Zwangsbedingungen einer Bewegung bedeuten ja wohl letztlich immer die Einschränkung der Konfigurationsmöglichkeiten auf einer (einigermaßen glatten) Mannigfaltigkeit und lassen sich unter der Nebenbedingung “ $\mathbf{x}(t) \in \text{Mannigfaltigkeit}$ ” ganz analog mitbehandeln. Die Differentialgleichungen sind koordinatenunabhängig in dem Sinn, daß sie für alle Koordinaten gelten, in denen sich das Integral hinschreiben läßt. Lösungen der LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen machen offenbar umgekehrt die Variation des (Wirkungs-) Funktionals $\mathcal{A} = \int_{t_1}^{t_2} dt \mathcal{L}$ zu Null, so daß wir das sog. HAMILTONSche Prinzip so formulieren können:

Eine Bahnkurve $\mathbf{x}(t)$ ist genau dann Lösung der LAGRANGESchen Bewegungsgleichungen (7), wenn sie Extrempunkt des (sogenannten) Wirkungsfunktional $\mathcal{A} = \int_{t_1}^{t_2} dt \mathcal{L}$ ist.

Der Nutzen der Extremalaussage über das Wirkungsfunktional liegt *nicht* in einem Zugang zu echten Lösungen des kinematischen Problem³ — die integrale Formulierung liefert eben keine Handhabe, sich die optimalen Bahnkurven zu besorgen. Dies leisten die äquivalenten Bewegungsgleichungen, die mit den entsprechenden Randbedingungen gelöst werden müssen. Allerdings ist das Funktional höchst geeignet, Näherungslösungen zu konstruieren: man macht einen Lösungsansatz mit freien Parametern (z. B. durch einen linearen Ansatz, Splines, orthogonale Polynome oder andere, problemangepaßte Ansätze) und optimiert diese freien Parameter mit den Methoden der üblichen Analysis⁴.

Andeutung eines Zusammenhanges mit “Pfadintegralen”

FEYNMAN äußert in [1] einen Gedanken, der ein gewisses Licht auf das Problem und den Zusammenhang von klassischer und Quantenmechanik wirft. Zunächst erinnert er daran, wie er den Studenten das FERMATSche Prinzip schmackhaft gemacht hat: die Phase der Elementarwellen, die eine Lichtquelle aussendet, sind proportional (modulo 2π) zur optischen Weglänge; und Helligkeit an einem bestimmten Punkt bedarf der konstruktiven Interferenz von Elementarwellen. Daß bei abbildenden Verhältnissen extremalen optischen Weglängen vorliegen, ist insofern plausibel, da optische Wege aus der Umgebung der Extremalen nur in zweiter Ordnung variieren und somit allesamt Beiträge liefern, die einigermaßen in Phase sind — konstruktive Interferenz ist möglich. Überall sonst würden sich die Beiträge eben gerade weginterferieren. Und weiter ([1], p.19-9):

It is just the same thing for quantum mechanics. The complete quantum mechanics (for the nonrelativistic case and neglecting electron spin) works as follows: The probability that a particle starting at point 1 at the time t_1 will arrive at point 2 at the time t_2 is the square of a probability amplitude. The total amplitude can be written as the sum of the amplitudes for each possible path — for each way of arrival. For every $\mathbf{x}(t)$ that we could have — for every imaginary trajectory — we have to calculate an amplitude. Then we add them

³Wobei hier außerdem natürlich für alle Sorten von Problemen, die ein ähnliches Extremalprinzip kennen, ähnliches gilt: Abbildungssituationen (FERMATSches Prinzip), Potentialprobleme der Elektrostatik, Berechnung von Grundzuständen in der Quantenmechanik etc.

⁴FEYNMAN zeigt in [1] ein eindrucksvolles Beispiel aus der Elektrostatik.

all together. What do we take for the amplitude for each path? Our action integral tells us what the amplitude for a single path ought to be. The amplitude is proportional to some constant times $e^{iS/\hbar}$, where S is the action for that path. That is, if we represent the phase of the amplitude by a complex number, the phase angle is S/\hbar . The action S has dimensions of energy times time, and Plancks constant \hbar has the same dimensions. It is the constant that determines when quantum mechanics is important.

Here is how it works: Suppose that for all paths, S is very large compared to \hbar . One path contributes a certain amplitude. For a nearby path, the phase is quite different, because with an enormous S even a small change in S means a completely different phase — because \hbar is so tiny. So nearby paths normally cancel their effects out in taking the sum — except for one region, and that is when a path and a nearby path all give the same phase in the first approximation (more precisely, the same action within \hbar). Only those paths will be the important ones. So in the limiting case in which Plancks constant \hbar goes to zero, the correct quantum mechanical laws can be summarized by simply saying: ‘Forget about all these probability amplitudes. The particle does go on a special path, namely, that one for which S does not vary in the first approximation.’ That’s the relation between the principle of least action and quantum mechanics.

Insbesondere impliziert diese Sichtweise ein gewissermaßen direktes Verhältnis zu Fragen wie der Wegwahl am Doppelspalt. In FEYNMANS Sprechweise “beschnuppern” die (offenbar als konkret vorgestellten, kleinen und großen) Teilchen die diversen Wegmöglichkeiten und das Ergebnis ist das Amplitudenquadrat der Superposition dieses Prozesses. Die makroskopische Trajektorie erscheint als selbstverständlicher Sonderfall dieses Prozesses.

Nun bleibt bei mir ein Unbehagen, ob damit schon alles über die Problematik gesagt sei. Ich will ein paar Punkte nennen, die mir noch nicht genügend deutlich sind:

- Ich bin kein besonderer Freund von pauschalen Argumenten der Art “das interferiert sich dann eben weg”. Ich bemerke, daß ich solche Argumente noch einigermaßen plausibel als *a posteriori* Erklärung für einen echten Sachverhalt finde, aber nicht als *verdict*, das alle möglichen Klassen von Situationen betreffen soll.
- Mir ist nicht deutlich, warum ein makroskopischer Doppelspalt dann eindeutige Trajektorien zeigen soll — ich würde auf die Schnelle vermuten, daß

es für jeden Punkt auf dem “Schirm” durch jeden der beiden Spalte einen extremalen Pfad gibt. Wenn dem so ist, wie kommt die Entscheidung denn dann zustande?

- Offenbar ist hier der genaue Wert von \hbar nicht so richtig von Bedeutung, sondern nur die grobe Größenordnung von S/\hbar . Wie stimmt das mit $E = \hbar\omega$ o. ä. zusammen? Mit anderen Worten: ist \hbar als solches eigentlich bedeutsam oder nicht?

Ich wäre für jede Ergänzung und für jede Vertiefung/Beantwortung derartiger Fragen sehr dankbar.

Zusammenfassung

Wirkung erscheint in der klassischen Mechanik als eine berechnete Größe der Dimension Energie \times Zeit, die sich aber nur in Spezialfällen aus der sogenannten Gesamtenergie des betrachteten Systems berechnet. Die jeweils physikalische Bewegung ist ein Extremalwert des Wirkungsfunktional über die LAGRANGE-Funktion, die auch die richtigen Bewegungsgleichungen ergibt (i. e. die physikalische Bahnkurve löst diese Bewegungsgleichungen). Ich weise darauf hin, daß es “wirkungsfreie” Argumente für diese Art Bewegungsgleichungen gibt und das Prinzip der extremalen Wirkung von daher auch als eine *sophisticated* Umformulierung dieser Argumente bzw. der Bewegungsgleichungen gesehen werden kann. Ich habe außerdem FEYNMANS Gedanken referiert, daß das Prinzip der extremalen Wirkung manchen Zusammenhang mit quantenmechanischen Prinzipien hat, gleichsam auf solchen beruht. Unter diesem Gesichtspunkt scheint die Frage aufgeworfen, wohin man sich wenden muß, wenn man klassische Mechanik begründen oder einordnen will. Folgen klassische Gleichungen aus der Quantenmechanik? Und wenn, wie übertragen sich (und in welche Richtung) Konzepte wie Teilchen, Raum oder Zeit?

Literatur

- [1] The Feynman lectures of physics, Band II, Kapitel 19
- [2] Honerkamp und Römer: Klassische theoretische Physik – Eine Einführung, Springer Verlag 1989
- [3] M. R. Spiegel: Theory and Problems of theoretical Mechanics, Schaum’s Outline Series, McGraw-Hill Book Company 1967

Nachtrag zu den Arbeitstagen für Physiker, Dornach 2.-6. Jan. 2000

VON THOMAS SCHMIDT

Ergänzung zum Beitrag von Jörg Stempfer über Nichtlokalität — Problembeispiele aus der Photonik

Aus dem Aufsatz von Anton Zeilinger *Experiment and the foundation of quantum physics* (Rev. of Modern Physics, 71, S288-S297 (1999)) lassen sich noch einige zusätzliche Informationen zu dem vorgestellten Doppel-Spalt-Experiment von Dopfer (1998) entnehmen:

- Die beiden *verschränkten Photonen* haben identische Polarisationszustände.
- Der HEISENBERG-Detektor wurde von W. Heisenberg 1927 in einem Gedankenexperiment (Z.f. Physik 43, 172, (1927)) als γ -Strahlen-Mikroskop mit beliebig genauer Ortsauflösung vorgestellt, um mit Hilfe des Compton-Effekts die Unbestimmtheitsrelation *Ort - Impuls* zu erklären; deshalb hat auch der *Heisenberg-Detektor* des von Zeilinger diskutierten Doppelspalt-Experimentes eine enge Mess-Blende. Nur so ist auch die folgende Abbildungsunterschrift zu der von Zeilinger dargestellten Interferenzfigur zu verstehen, die aus der Koinzidenzschaltung zwischen dem fest stehenden Detektor hinter dem Doppelspalt mit dem bewegten Heisenberg-Detektor entsteht: *...The graph shows the counts registered by that detector as a function of its lateral position, if that detector is arranged in the focal plane of the lens. The counts are conditioned on registration of the second photon behind ist double slit. Note that the photons registered in detector D1 (Heisenberg-Detektor) exhibit a double-slit pattern though they never pass through a double-slit assembly...*

So ist das Ergebnis des Experiments nicht so mysteriös, wie wenn der *Heisenberg-Detektor* keine Ortsauflösung quer zur Strahlrichtung hätte. Die Abtastung im Linsenfokus (nicht im Bildpunkt!) ergeben ebenso wie hinter dem Doppelspalt eine Richtungs- und damit Impuls-Diskriminierung und damit ist es durchaus folgerichtig, dass sich durch die Koinzidenzschaltung die Interferenzfigur hinter dem Doppelspalt auf die Abtastung durch den *Heisenberg-Detektor* überträgt, wenn durch die Photonen-Verschränkung in dem Kristall die Photonen in beiden

Strahlrichtungen genau korrelierte Impulse besitzen. Übrigens sind nach dem Zeilinger-Aufsatz die beiden Photonen nicht identisch, sondern: *a nonlinear optical crystal spontaneously creates pairs of photons such that the sum of their linear momenta is constant.*- Bei genauerem Studium auch der zitierten Arbeiten von Heisenberg und von Weizsäcker zeigt sich, wie auch Zeilinger selbst andeutet, dass gegenwärtig neu eigentlich vor allem ist, dass die alten Gedankenexperimente jetzt wirklich realisierbar sind. Das Ideengut selbst war bereits damals, vor über 70 Jahren erstaunlich weit entwickelt, und besonders Heisenberg hat aus seiner Unschärferelation schon weitgehende Schlüsse gezogen, so auch in der oben zitierten Arbeit: *Wir haben also guten Grund, gegen die kritiklose Anwendung jener Worte "Ort" und "Geschwindigkeit" Verdacht zu schöpfen.*

Noch ein paar Zusatzbemerkungen:

- Die vorgestellten Überlegungen beruhen auf der nichtrelativistischen Quantenmechanik. Ich bin der Ansicht, im Zusammenhang der relativistischen Quantenelektrodynamik sei zu berücksichtigen, dass sich die Kohärenzräume der beteiligten Photonen nicht mit einer höheren als der Lichtgeschwindigkeit aufzubauen vermögen. Da sich ein solcher Kohärenzraum vom Doppelspalt bis zum Kristall und von diesem weiter bis zum *Heisenberg-Detektor* erstreckt, dürften auch mit derartigen Experimenten keinesfalls irgend welche Übertragungen von irgend etwas mit Überlichtgeschwindigkeit möglich sein.
- Ich möchte hier auch nochmals die vor allem in den Arbeitstagen Jan. 1999 angesprochene Verbindung zwischen beliebig weit entfernten Emittoren und Absorbern von Photonen erwähnen. Wie von mir im Anschluss an das Buch von H. Paul: Photonen, eine Einführung in die Quantenoptik (Stuttgart, 1995) in "Elemente der Naturwissenschaft" **65**, Heft 2, S.1-16 (1996) dargestellt wurde, besteht die Gesamt-Zustandsfunktion $\Psi(t)$ eines Systems aus einem angeregten, möglichen Photonenemitter und einem möglichen Photon im Raum vor einer beobachteten Absorption aus - verschränkten Einzelzuständen $\Psi(t) = e^{-\Gamma t/2}\Psi_2\Phi_0 + (1 - e^{-\Gamma t/2})\Psi_1\Phi_1(t)$ (Ψ_1, Ψ_2 : Zustandsfunktionen des Emitters im Grund- bzw. im angeregten Zustand; Φ_0, Φ_1 : Raumzustand vor bzw. nach Emission des Photons; Γ : Übergangswahrscheinlichkeit des Emitters vom angeregten in den Grundzustand]. $\tau = 1/\Gamma$ ist dann die Lebensdauer des angeregten Zustandes und $\Delta l = c/\Gamma$ die Kohärenzlänge des emittierten Photons; τ und Δl geben nicht genaue Grenzen in Zeit und Raum an, sondern nur Parameter in einer exponentiellen Abklingfunktion mit im Prinzip unendlicher Reichweite.- Bezüglich des Zusammenhanges des angeregten Emitters zu einem Absorber gibt es nun zwei Fälle:

1. Eine Photonabsorption wurde nicht gemessen. Dann existiert der oben hingeschriebene *verschränkte* Zustand, d.h. *Anregung des Emitters und kein Photon* existiert ebenso als Möglichkeit wie *Grundzustand des Emitters und ein Photon*.
2. Erst bei der Registrierung einer Photonenabsorption ist die Verwirklichung, die physikalische Realität eines bestimmten Zustandes gegeben, nämlich: *Emitter im Grundzustand*.

Ohne das räumlich entfernte Absorptionsereignis kann also das Emissionsereignis nicht verwirklichte Realität sein. Wichtig ist aber noch zu bemerken, dass wegen des exponentiellen Abklingfaktors auch diese *Realitätskopplung* vom Emitter zum Absorber mit zunehmender Raumdistanz entsprechend *abklingt*. Bei Photonen aus irdisch üblichen Emissionen mit Abklingzeiten von etwa 10^{-8} sec reicht die Emitter-Absorber-Kopplung nur in den Meter-Bereich, durchaus kosmische Dimensionen ergeben sich aber bei astrophysikalisch beobachteten *verbotenen* Übergängen mit Abklingzeiten von vielen Sekunden. Dieser Zusammenhang würde bedeuten, dass immer dann, wenn die Absorption des emittierten Photons eingetreten und damit messbar geworden ist, zugleich auch der Grundzustand des Emitters real feststellbar sein wird. Ohne Absorption dagegen nimmt nur die Wahrscheinlichkeit, den Emitter im Grundzustand vorzufinden entsprechend der Abklingkonstante Γ zu. Da der einzelne reale Übergangzeitpunkt auch ohne Absorption (mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit) beliebig ist, ist auch dieser Vorgang nur geeignet, einen statistischen Zusammenhang zwischen den Vorgängen am Emitter und Absorber festzustellen.

Verteiler

Karl Heinz Denzlinger	Lochmattenstr. 1 79102 Freiburg	
Friedrich-Wilhelm Dustmann	Ypernstr. 154 57072 Siegen	DustmannFW@aol.com
Friedrich Hartmann	Riensbergerstr. 93 28359 Bremen	Zugang3@aol.com
Michael Jacobi	Königsbergerstr. 27 79650 Schopfheim	
Johannes Kühl	Dorneckstr. 47 CH-4143 Dornach	johannes.kuehl@goetheanum.ch
Prof. Dr. Ludolf von Mackensen	Hugo-Preuß-Str. 3 34131 Kassel	
Dr. Georg Maier	Quidumweg 18 CH-4143 Dornach	g.maier@goetheanum.ch
Prof. Dr. Ernst- August Müller	Schlesierring 44 37085 Göttingen	
Heinz-Christian Ohlendorf	Christbuchenstr. 143 34130 Kassel	
Alec A. Schaerer	Gempenstr. 10 CH-4053 Basel	sascha@magnet.ch
Tobias Schaumann	Konrad-Adenauer-Str. 13 34317 Habichtswald-Ehlen	schaumann.tobias@01019freenet.de
Klaus Schimpf	Mühlenstr. 10 07745 Jena	Klaus.Schimpf@t-online.de
Dr. Thomas Schmidt	Zum Upholz 1 33739 Bielefeld	
Peter Schwab	Schildbusch 20 34369 Hombressen	
Wilfried Sommer	Walter-Leiske-Str. 46 60320 Frankfurt	dwsommer@aol.com
Jörg Strepfer	162 Lincoln Oaks Dr No. 1205 USA-Willowbroke IL 60514	strepfer@anl.gov
Dr. Florian Theilmann	Gutenbergstr. 1a 99423 Weimar	florian.theilmann@gmx.net
Jürgen Vogt	Brabanterstr. 30 34131 Kassel	Juergen_Vogt@gmx.de
Peter Wenger	Blütenhang 10 78333 Stockach	wenger@wenger-lehrmittel.de