

# Physikerrundbrief 1/2000

30. März 2000

## Editorial

Ich freue mich, die erste Ausgabe des vorgenommenen Rundbriefes versenden zu können, und hoffe, Ihrer aller Interesse an der Quantenmechanik und dem, was damit zusammenhängen mag, ist noch nicht ganz erlahmt! Zu guter Letzt ist es nun doch mehr Material als ich auf einmal zu verschicken für glücklich halte. Das ist vor allem das Verdienst von Alec Schaerer, der Auszüge aus seiner Dissertation zur Diskussion stellt (und dabei sehr geduldig auch auf allerlei Sonderwünsche meinerseits eingegangen ist). So zeichnet sich, obwohl das Echo auf meine offenbar nicht hinreichend provokanten Thesen vom Januar gering ausfiel, doch ein erstes Thema ab: Alec Schaerer und Jürgen Vogt denken ebenfalls beide über “alternative Begriffsfundamente” der Physik und der Quantenmechanik nach. A. Schaerers Text ist recht umfangreich und so habe ich beschlossen, ihn in zwei Portionen zu teilen — was schade ist, denn er wird immer interessanter, je weiter man ihn liest. Er schließt an die Diskussion um Goethes Raumbegriff insofern an, als grundlegende (auch physikalische) Konzepte anders beleuchtet werden. Auch die Quantenmechanik wird berührt.

Ein zweites Thema hat Peter Schwab aufgeworfen: er äußerte Interesse daran, den Durchbruch zur Quantenmechanik in der Arbeit von Max Planck näher anzuschauen, auch in der Hoffnung, das “spezifisch Quantenmechanische” – was es ja geben sollte – besser zu verstehen. Ich persönlich bin recht begeistert von dem Projekt, zu dem in dieser Ausgabe Peter Schwab einen einführenden Text und F. W. Dustmann eine Arbeit über die Geschichte des Wirkungsbegriffes beisteuern<sup>1</sup>. Ich hoffe, daß sich auch jemand unter ihnen für das Planck-Thema erwärmt.

---

<sup>1</sup>Herr Dustmann gibt auch folgenden Literaturhinweis zum Thema: George L. Trigg: Experimente der modernen Physik, Akademie-Verlag, Berlin 1984 / Vieweg-Verlag, Braunschweig

Und auch, in der nächsten Ausgabe etwas Erhellendes zum Wirkungsbegriff in der klassischen Mechanik beitragen zu können.

Herr Dustmann hat außerdem noch einen anregenden Text geschrieben, von dem in Dornach wohl schon die Rede gewesen war. Ich wäre wiederum sehr dankbar um Ihre Meinung zum Rundbrief *und natürlich für weitere Beiträge*<sup>2</sup> zu diesem Rundbriefprojekt. Im Anhang findet sich die Liste derer, die dies hier bekommen. Aufgenommen sind alle, die Interesse bekundet haben. Ich möchte auch noch einmal den Laborcharakter dieser Publikation betonen; nicht, daß ich für (gültige) *Antworten* nicht dankbar wäre, doch solange die ausbleiben (oder ich sie nicht verstehe) freue ich mich ebenso darüber zu sehen, was andere an *Fragen* umtreibt. Zuletzt die Frage, ob noch jemand Veranstaltungen und Termine sieht, die hier bekannt gemacht werden sollten — Herr Dustmann weist auf ein Aktionswoche vom 26.6.-30.6. zum Thema Licht und Materie an der Uni in Bonn hin (siehe Phys. Blätter 56, 2000/1, S. 19).

Florian Theilmann

## Inhaltsverzeichnis

Editorial . . . . .	1
F. W. Dustmann: Anmerkungen zu einer Fragenbeantwortung Rudolf Steiners . . . . .	3
Peter Schwab: Wenn Quantenmechanik — Wo anfangen? . . . . .	8
F. W. Dustmann: Die Entstehung des Wirkungsbegriffs . . . . .	11
Jürgen Vogt: Zu Florian Theilmanns Text: "Verschränkte Zustände und Goethes Raumbegriff" . . . . .	17
Adressenliste . . . . .	19

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

---

<sup>2</sup>Insbesondere fällt mir einfach kein glücklicherer Titel ein!

# Anmerkungen zu einer Fragenbeantwortung Rudolf Steiners

VON F. W. DUSTMANN

Am 15. Januar 1921 wurde Rudolf Steiner während einer Vortragsreihe in Stuttgart die folgende Frage gestellt<sup>3</sup>:

„Warum muss man beim Einstein-Problem plötzlich mit umgekehrten Vorzeichen arbeiten, da wo man vom Ponderablen zum Äther übergeht?“

In seiner Antwort verweist Steiner auf den einige Monate vorher ebenfalls in Stuttgart gehaltenen Wärmekurs und die dort gemachten Angaben über die Anwendung der Mathematik in der Physik. Anschließend geht er auf die Arbeiten von Clausius zur kinetischen Gastheorie ein und stellt fest, dass die dort abgeleiteten Formeln nur in einer sehr künstlichen Weise mit der Realität in Einklang gebracht werden können und dass bestimmte Tatsachen, die nicht näher benannt werden, mit diesen Formeln gar nicht übereinstimmen. Unvermittelt kommt dann der folgende Absatz:

„Bei der Theorie von Einstein ergibt sich das Merkwürdige, daß zunächst Experimente vorliegen. Diese Experimente werden aufgebaut, weil man gewisse Theorien voraussetzt. Die Experimente bestätigen diese Theorie nicht, und man baut dann eine andere Theorie auf, die nur auf gedachten Experimenten eigentlich beruht.“

Liest man diese Sätze allein, so kann kaum ein Zweifel daran bestehen, dass die Experimente zum Nachweis des sogenannten „Ätherwindes“ gemeint sind, die negativ verliefen und deshalb die Theoretiker animierten eine neue Theorie zu formulieren, die spezielle Relativitätstheorie. Merkwürdigerweise wird aber bereits im nächsten Absatz wieder über Wärmelehre gesprochen:

„Dagegen, wenn Sie den Versuch machen, einfach die Erscheinungen der Wärme so zu behandeln, daß Sie dafür in die Formeln einsetzen entsprechende positive und negative Vorzeichen, je nachdem Sie es zu tun haben mit leitender oder strahlender Wärme, dann werden Sie diese Formeln verifiziert finden durch die Wirklichkeit.“

---

<sup>3</sup>veröffentlicht in GA 324a: Die vierte Dimension — Mathematik und Wirklichkeit, S. 190ff

Der Hinweis auf den Vorzeichenwechsel findet sich mehrfach in Steiners Vortragswerk, wenn es um Phänomene der Wärmelehre geht. Es mutet deshalb merkwürdig an, dass mitten in einer längeren Ausführung über Wärmelehre plötzlich drei Sätze über die Relativitätstheorie stehen sollen. Man kann es vielleicht als einen methodischen Hinweis deuten, dass man nämlich darin ein Beispiel für eine typische Vorgehensweise sehen kann, die in der konventionellen Wissenschaft üblich ist, die aber bei einer phänomenologischen Herangehensweise vermieden werden sollte. Dem widerspricht aber die Formulierung des Fragestellers, der das *Einstein-Problem* ausdrücklich mit dem Vorzeichenwechsel in Verbindung bringt. Wir müssen uns deshalb erneut die Frage stellen: Was ist mit dem Einstein-Problem gemeint?

Der Kontext weist, wie bereits festgestellt wurde, eindeutig auf die Wärmelehre hin. Deshalb ist es ratsam zu schauen, ob es in diesem Bereich ein Problem gibt, das als Einstein-Problem bezeichnet werden könnte. Ein solches Problem gibt es m. E. tatsächlich. Bei der Entwicklung der kinetischen Gastheorie wurde der sogenannte *Gleichverteilungssatz* formuliert, der aussagt, dass im thermischen Gleichgewicht alle Freiheitsgrade eines Moleküls im Mittel die gleiche Energie  $E = \frac{1}{2}kT$  haben. Man kann versuchen diesen Satz auf Festkörper zu übertragen. Dort erwarten wir 6 Schwingungsfreiheitsgrade, drei für die Bewegungsenergie und drei für die potentielle Energie. Nach dem Gleichverteilungssatz ergibt sich damit eine molare Wärmekapazität von ca. 25 J/mol·K. Dieser Wert wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts bereits von Dulong und Petit empirisch entdeckt. Die Dulong-Petitsche Regel ist für schwere Elemente recht gut erfüllt, für leichte allerdings meistens nicht. Genauere Untersuchungen ergaben, dass bei tieferen Temperaturen die molare Wärmekapazität bei allen Festkörpern auf 0 absinkt, also deutlich vom Dulong-Petit-Gesetz abweicht. Dies ist z.B. ein Sachverhalt, der sich aus der kinetischen Theorie heraus nicht verstehen lässt. Einstein konnte dafür im Jahre 1907 eine Erklärung geben, indem er annahm, dass die Gitterschwingungen ebenso gequantelt sind, wie dies Planck bekanntlich für die Hohlraumstrahlung angenommen hatte. Diese Theorie führte tatsächlich zu einer Art „Einfrierung“ der Gitterschwingungen bei tieferen Temperaturen, die zu einem Absinken der Wärmekapazität bei tiefen Temperaturen führt. Genauere Experimente zeigten dann jedoch, dass der Abfall nach der Theorie von Einstein etwas zu steil ist. Debye konnte diese Theorie 1912 modifizieren und erzielte eine sehr befriedigende Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Die Dulong-Petitsche Regel ist gewissermaßen der Grenzfall, der sich für große Temperaturen aus der Theorie von Einstein oder Debye ergibt. Die von Einstein eingeführte Quantenbedingung musste damals noch als sehr künstlich erscheinen, da der größere Zusammenhang der Quantenphysik erst etwa 20 Jahre später entdeckt wurde. Da die Übereinstimmung von Theorie und Experiment nicht vollständig gegeben war, dürften zunächst erhebliche Zweifel bestanden haben, die erst durch die Verfeinerung von Debye ausgeräumt wurden. Es ist durchaus

vorstellbar, dass diese Theorie der spezifischen Wärme vom Fragesteller als das Einstein-Problem bezeichnet wurde.

Gitterschwingungen gehorchen nach unserem heutigen Verständnis der sogenannten Bose-Statistik, d.h. sie werden durch ein Bosonenfeld beschrieben. Die Quantisierung eines solchen Feldes wird durch eine charakteristische Vertauschungsrelation der Feldoperatoren eingeführt. Im Unterschied zur Vertauschungsrelation beim Materiefeld, das ein Fermionenfeld ist, tritt bei der Vertauschungsrelation der Bosonen ein Minuszeichen auf. Aus der Sache heraus ist es durchaus denkbar, dass Steiner hier auf den Unterschied zwischen Bosonen und Fermionen hingewiesen hat, was damals vermutlich niemand verstanden hat, da die entsprechenden Formeln erst etwa 10 Jahre nach dieser Fragenbeantwortung formuliert wurden. Ein solcher Bezug würde vor allem den Hinweis auf leitende und strahlende Wärme erklären. Die Wärmestrahlung wird nämlich von einem Bosonenfeld vermittelt, das das Minuszeichen in der Vertauschungsrelation enthält. Die Wärmeleitung hingegen ist komplexerer Natur. In guten Wärmeleitern, wie den Metallen, sind nach heutiger Auffassung die Elektronen im Wesentlichen für die Wärmeleitung zuständig. Deshalb gibt es auch eine Korrespondenz zwischen Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Leitfähigkeit (das sogenannte Wiedemann-Franz-Gesetz). Die Elektronen im Metall werden aber durch ein Fermionenfeld mit dem typischen Pluszeichen in der Vertauschungsrelation (Antikommutator) beschrieben, d.h. in der statistischen Beschreibung gibt es in der Tat zwischen Wärmestrahlung und Wärmeleitung den angesprochenen Vorzeichenunterschied.

Nun kann allerdings kaum geleugnet werden, dass der Weg von den Phänomenen zu den Vertauschungsrelationen der Quantenfeldtheorie ein außerordentlich langer ist. Deshalb mutet es vielleicht sehr verwegend an zu behaupten, dass Steiner tatsächlich solche Zusammenhänge im Blick gehabt haben könnte. Bemerkenswert ist aber die Tatsache, dass sonst kaum verständliche Äußerungen plötzlich in einem helleren Licht erscheinen, wenn man auf diese Weise an die Sache herangeht. Bekanntlich ist die hier besprochene Fragenbeantwortung nicht die einzige Stelle im Vortragswerk Rudolf Steiners, an der er auf die Vorzeichenproblematik im Zusammenhang mit Wärmephänomenen eingeht. Eine wesentlich bekanntere Stelle ist z. B. der 12. Vortrag des Wärmekurses, in dem er ausgehend von der Wärmeleitungsgleichung noch zwei weitere Differentialgleichungen einführt, die er durch Änderung des Vorzeichens bzw. durch Hinzufügen der imaginären Einheit gewinnt. Eine genaue Beachtung des Kontextes zeigt jedoch, dass es sich nicht um die gleiche Problematik handeln kann, da im 12. Vortrag des Wärmekurses (GA 321, 12.3.1920) das negative Vorzeichen mit chemischen Wirkungen und die imaginäre Einheit mit Lichtwirkungen in Verbindung gebracht wird. Ein Widerspruch zu dem hier Dargestellten ergibt sich zwangsläufig, wenn man davon ausgeht, dass in beiden Fällen der gleiche Phänomenkomplex angesprochen wird. Man wird deshalb wohl den Schluss ziehen müssen, dass Steiner im 12. Vortrag

des Wärmekurses etwas ganz anderes angesprochen hat. Worum es sich dabei handelt, muss an anderer Stelle ausgeführt werden. Offensichtlich die gleiche Problematik spricht er jedoch im 8. Vortrag des astronomischen Kurses (GA 323, 8.1.1921) an. Wir finden dort das Folgende:

„Wichtig ist noch, daß wir die ganze Spielerei, möchte ich sagen, der Clausiusschen Wärmetheorie mit dem gegenseitigen Sich-Stoßen der Moleküle und dem Stoßen an die Wand, diesem ganzen grausamen Spiel des Stoßens, des Aufeinanderprallens, an die Wand Prallens, wieder Zurückprallens, das eigentlich den Wärmezustand irgendeines Gases darstellen soll, daß wir das richtig sinnlich durchschaubar bekommen, wenn wir innerhalb der Wärme zwei Zustände ins Auge fassen, den einen, den wir verwandt mit den Zuständen der ponderablen Materie betrachten, und den anderen, den wir verwandt mit dem Äther betrachten. So daß wir bei der Wärme etwas anderes haben als bei der Luft oder beim Licht. Beim Licht müssen wir, wenn wir richtig rechnen wollen, alles mit negativen Vorzeichen einsetzen. Bei der Wärme haben wir nötig, Positives und Negatives wechseln zu lassen, und dadurch wird erst durchsichtig dasjenige, was wir gewöhnlich betrachten als leitende Wärme strahlende Wärme und so weiter.“

Auch hier geht es also um den Unterschied zwischen leitender und strahlender Wärme, wobei an dieser Stelle zusätzlich zum Ausdruck kommt, das das Licht offenbar genauso wie die strahlende Wärme behandelt werden muss, zumindest soweit es die angesprochene Vorzeicheneigenschaft betrifft. Die Wärmezustände werden also erst durchschaubar, wenn die genannten zwei Zustände, die sich in den unterschiedlichen Vorzeichen ausdrücken, gemeinsam berücksichtigt werden. Ein Blick auf moderne Wärmetheorien zeigt, dass wir bei der Behandlung der thermischen Eigenschaften von Festkörpern tatsächlich eine solche Polarität vorfinden. Bei der Theorie der Wärmeleitung finden wir, wie bereits weiter oben festgestellt wurde, im Wesentlichen die vermittelnde Wirkung der Fermionen, also im Sprachgebrauch der modernen Physik der Elektronen, soweit es sich um Metalle handelt. In Isolatoren hingegen übernehmen die Gitterschwingungen diese Aufgabe. Die Gitterschwingungen werden ebenso wie Leitungselektronen im Festkörper statistisch wie ein Gas behandelt (Phononengas oder Elektronengas), das aber anders als ein klassisches Gas, also ein Gas, wie es Clausius beschrieben hat, der Quanten-Statistik unterliegt. Wie ich bereits in einem früheren Aufsatz beschrieben habe, kommt der wesentliche Unterschied zwischen diesen Statistiken in den Verteilungsfunktionen

$$n_i = \frac{1}{e^{\epsilon_i/kT+\alpha} + 0} \quad \text{Maxwell-Boltzmann} \quad (1)$$

$$n_i = \frac{1}{e^{\epsilon_i/kT+\alpha} + 1} \quad \text{Fermi-Dirac} \quad (2)$$

$$n_i = \frac{1}{e^{\epsilon_i/kT+\alpha} - 1} \quad \text{Einstein-Bose} \quad (3)$$

zum Ausdruck, worin  $\epsilon_i$  die Energie eines mit dem Index  $i$  gekennzeichneten Zustandes und  $\alpha$  ein freier Parameter ist, der durch die Zahl der vorhandenen Quanten bestimmt wird. Im Wärmekurs weist Rudolf Steiner darauf hin, dass die Phänomene eines Wirklichkeitsgebietes nicht nur Realitätscharakter für dieses Gebiet, sondern auch Bildcharakter für das darunter liegende Gebiet haben. Also sind die Phänomene des Gasgebiet in gewisser Weise Bilder von realen Vorgängen im Wärmegebiet. Man muss sich hier die Frage stellen, ob die oben angedeutete Verwendung der Quantenstatistik, die ja aus der statistischen Mechanik der Gase abgeleitet ist, nicht Ausdruck dieser Beziehung ist. Man hat die statistische Beschreibung ursprünglich entwickelt um die Taten der Wärme im Bereich des Gasigen mechanisch zu erklären. Es hat sich dann gezeigt, dass modifizierte Versionen der statistischen Theorie auch für Licht, Gitterschwingungen und Elektronen zur Anwendung gebracht werden können, aber immer im Zusammenhang mit Fragestellungen, die dem Bereich der Wärme angehören. Für den Phänomenologen stellt sich nicht unbedingt die Frage, ob man die statistische Theorie verwerfen muss, sondern ob es möglich ist sie umzuinterpretieren bzw. so zu modifizieren, dass sie von den Modellvorstellungen abgelöst und mit den Phänomenen verbunden wird.

Bei der Theorie der spezifischen Wärme im Festkörper spielen die Elektronen praktisch keine nennenswerte Rolle. Nach heutiger Auffassung steckt die gesamte innere Energie des Festkörpers in den Gitterschwingungen. In versteckter Form finden wir dies sogar schon bei Fourier, denn zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung entwickelte er die Theorie der Fourier-Reihen und Fourier-Integrale. Der Wärmezustand wird demnach durch eine Überlagerung stehender Wellen beschrieben, die sich hinter dem Term  $e^{ikx}$  verbergen. Es stellt sich die Frage, ob man darin nicht eine Andeutung für die Existenz von Gitterschwingungen sehen darf. Steiner lobt im 12. Vortrag des Wärmekurses ausdrücklich die Vorgehensweise von Fourier, weil sie sich nicht irgendwelcher Modelle bedient, also nicht im Hauptstrom der Physik des 19. Jahrhunderts liegt, der die gesamte Physik auf Mechanik zurückführen wollte, sondern weil sie nur versucht, die vorliegenden Phänomene in eine mathematische Gestalt zu bringen. In Bezug auf die Theorie der spezifischen Wärme und der Wärmeleitfähigkeit ist der Sprung von den Phänomenen zur Theorie allerdings sehr groß. Die hier angesprochene Vorzeicheneigenschaft ist keineswegs eine Eigenschaft, die sich, wie sie sich zur Zeit darbietet, unmittelbar an beobachtbare Phänomene anschließt. Andererseits ist bisher aus dem Bereich der Phänomenologie überhaupt keine Erklärung für spezifische Wärmen und Wärmeleitfähigkeiten erkennbar, sie werden lediglich als gegeben hingenommen. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es nicht möglich ist die Gitterschwingungen und ihre Beschreibung durch quantisierte Felder enger mit den Phänomenen zu verknüpfen als dies bisher möglich gewesen ist. Darin

sehe ich eine wichtige Aufgabe für zukünftige Forschungen.

Siegen, Januar 2000

## Wenn Quantenmechanik — Wo anfangen?

VON PETER SCHWAB

Walter Minder beschreibt die Philosophie des Leukippos und seines Schülers Demokritos (um 400 v. Chr.) [1]:

Man zerschlage zum Beispiel einen Marmorblock in 100 Stücke. Er ist dann zerteilt. Die Stücke haben aber zusammen genau denselben Raum nötig wie vorher der Block, sie sind gleich schwer. Nun werfe man von den 100 Stücken deren 99 fort und behalte eines zurück. Jetzt zerschlage man dieses Stück wieder in 100 Stücke, behalte eines zurück, zerschlage weiter und weiter, immer in derselben Weise –, könnte das beliebig oft, 10, 100, 1000, eine Million Male wiederholt werden? Das muß doch einmal ein Ende nehmen, man muß zu einer Grenze kommen, wo die Teilbarkeit aufhört, wo nichts mehr weiter zerschlagen, zerrissen, zerschnitten werden kann, zum Unzerschneidbaren (atomon), zum Atom!

Einen Tag nach dem Atombombenabwurf auf Hiroshima entstand ein Gespräch zwischen Werner Heisenberg und Carl Friedrich v. Weizsäcker [2]:

“Man wird hier”, so führte Carl Friedrich v. Weizsäcker den Gedanken weiter fort, “wohl einen grundlegenden Unterschied machen müssen zwischen dem Entdecker und dem Erfinder. Der Entdecker kann in der Regel vor der Entdeckung nichts über die Anwendungsmöglichkeiten wissen, und auch nachher kann der Weg bis zur praktischen Ausnützung noch so weit sein, daß Voraussagen unmöglich sind...”

Ist es nicht vielmehr so, daß Isolieren und Zertrümmern bis zum heutigen Tag die Methoden der physikalischen Forschung sind, und daß am Keim bereits erkennbar ist, was daraus erwachsen muß? Solche Gedanken trage ich in mir, wenn ich mich



frage, ob ich mich mit der Quantenmechanik auseinandersetzen soll. Und wenn sie mich dazu bewegen, mich abzuwenden, so sind sie mir doch Aufruf zu einem Bewußtwerden dessen, was ich tue, wobei ich das Denken als Tätigkeit ansehe.

Nun habe ich angefangen, mich mit dem Ziel der Welt (Die High Tec gehört nun mal dazu) zu nähern, und muß feststellen, daß eher das Gegenteil davon eingetreten ist. Ein Gefühl, den Boden unter den Füßen zu verlieren. Also Anfangen am Anfang — und als Anfang der Quantenmechanik gilt das Gesetz über die spektrale Verteilung der Temperaturstrahlung (Max Planck 1900). Der “Anfang” erweist sich aber selbst als das Ende einer komplizierten Entwicklung.

Worum handelt es sich bei der Temperaturstrahlung? In seinen “Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung” schreibt Planck [3]:

Wir wollen nun weiter für das Folgende überall die vereinfachende Annahme einführen, daß der physikalisch-chemische Zustand der emittierenden Substanz nur von einer einzigen Variablen abhängt: der absoluten Temperatur  $T$ . Dann ergibt sich mit Notwendigkeit, daß auch der Emissionskoeffizient  $\epsilon$  außer von der Schwingungszahl  $\nu$  und von der Natur des Mediums allein von der Temperatur  $T$  abhängig ist. Damit sind eine Reihe von Strahlungsvorgängen, die als Fluoreszenz, als Phosphoreszenz, als elektrisches oder chemisches Leuchten bezeichnet werden, und die von E Wiedemann unter dem Namen “Lumineszenzphänomene” zusammengefaßt worden sind, von der Betrachtung ausgeschlossen. Wir haben es vielmehr mit reiner “Temperaturstrahlung” zu tun.

Max Planck entwickelt die Theorie der Wärmestrahlung sehr sorgfältig und, an der Schwierigkeit des Gegenstandes gemessen, gut verständlich. Er muß dabei Größen als endlich, als “nicht zu klein” annehmen, schreibt sie aber als Differential. Ich kann das als Näherungsbetrachtung auffassen. Problematischer wird für mich der Umstand, daß er Modellvorstellungen schildert, als wären sie wahrnehmbar. (Planck spricht in §2 von Wärmestrahlen als Lichtstrahlen.) Werdem mir nämlich diese Vorstellungen einfach erzählt, ohne daß ich den Prozeß ihrer Entstehung nachvollziehe, dann wird das Ganze für mich eine phantasievolle Reise in das Innere der Materie (des Strahlungsfeldes), der Zusammenhang mit den Tatsachen bleibt verdeckt und von einem Boden ist nichts zu sehen.

Den in §7 erwähnten “chemisch-physikalischen Zustand” werde ich gerade aufgrund der Emission beurteilen. So daß ich geneigt bin, mich dierkt an den Emissionskoeffizienten zu wenden. Aber der hat es in sich! Denken wir uns ein (erwärmtes) Volumen  $d\tau$ , darum eine Kugel vom Radius 1 (vielleicht 1 cm)

und betrachten ein kleines Stück der Kugeloberfläche  $d\Omega$ . Plank erläutert [3]:

§6. Alles Bisherige zusammengefaßt können wir die gesamte in der Zeit  $dt$  vom Volumenelement  $d\tau$  in der Richtung des Elementarkegels  $d\Omega$  im Schwingungsintervall von  $\nu$  bis  $\nu + d\nu$  emittierte Energie gleich setzen:

$$dt d\tau d\Omega d\nu 2\epsilon_\nu \quad (4)$$

Die endliche Größe  $\epsilon_\nu$  nennen wir den “Emissionskoeffizienten” des Mediums für die Schwingungszahl  $\nu$ .

(Der Faktor 2 rührt daher, daß man für nichtisotrope Medien die Polarisation berücksichtigen müßte.)

Von einer emittierten Energie kann ich nur Kenntnis erhalten, wenn sie (zumindest zum Teil) absorbiert wird. Damit habe ich es aber wieder gleich mit Allem zu tun. Die Trennung von Emission und Absorption ist ein gedankliches Konstrukt. Darum gilt es für mich, dieses gedanklich zu erfassen. Wie schließe ich an meine Alltagserfahrungen an und erhalte die Möglichkeit, vermutete Zusammenhänge messend bestätigen zu können? Womit messe ich? Mit einer Art “Wärmeauge” – mit Pupille  $d\Omega$ , ausgekleidet mit einer schwarzen Netzhaut, versehen mit einem Temperaturfühler? Wie komme ich dann von der Temperatur zur “richtigen Energiegröße”? (Siehe [4].)

Von dem Verständnis der Herleitung des Gesetzes über die spektrale Verteilung der Temperaturstrahlung erhoffe ich mir den Aufschluß zweier Fragen bezüglich des Wirkungsquantums:

1. Was heißt Wirkung? Sind hier nur die Einheiten gleich – wie beim Drehmoment und der Energie – oder handelt es sich um eine Größe, die dem mechanischen Wirkungsbegriff entspricht?
2. Was heißt Quantum? Max Planck meint im §5: “Zu einer endlichen Strahlung gehört dann offenbar immer ein endliches, wenn auch auch unter Umständen sehr kleines Intervall von Schwingungszahlen.” [3] Wie paßt das zusammen mit  $E = h\nu$ ?

## Literatur

- [1] Walter Minder: Geschichte der Radioaktivität, Springer-Verlag, Berlin 1981, S. 4 und 5

- [2] Werner Heisenberg: Der Teil und das Ganze, R. Piper-Verlag, München 1969, S. 266
- [3] Max Planck: Theorie der Wärmestrahlung, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1923
- [4] Georg Maier: Optik der Bilder, Verlag der Kooperative Dürnau, Dornach 1986, Kapitel 5

## Die Entstehung des Wirkungsbegriffs

VON F. W. DUSTMANN

Der Wirkungsbegriff gehört zu den am wenigsten verstandenen Begriffen der neuzeitlichen Physik, spielt aber andererseits eine wesentliche Rolle in Teilbereichen der analytischen Mechanik und in der gesamten Quantenphysik. In Bezug auf Letztere kann man geradezu von einem Schlüsselbegriff sprechen. Dennoch wird die Wirkung auch heute noch im Wesentlichen nur als Rechengröße betrachtet, mit der sich keine physikalische Intuition verbindet wie etwa mit dem Arbeits- oder Leistungsbegriff. Dass dies möglicherweise wenigstens teilweise eine Folge des Siegeszugs der Newton'schen Mechanik ist und in einem anderen Kontext nicht unbedingt so sein muss, soll der folgende Aufsatz zeigen.

### Kraft und Wirkung bei Leibniz

Der Wirkungsbegriff taucht meines Wissens erstmals bei G. W. Leibniz auf, wobei festzustellen ist, dass Leibniz sich ihm noch vorsichtig tastend annähert. Er steht dort zunächst nicht in Beziehung zu einem Extremalprinzip wie später bei Maupertuis. Im Rahmen der Leibniz'schen Weltbetrachtung kann man ihn als durchaus konsequente Fortentwicklung anderer, ebenfalls von ihm gebildeter Begriffe ansehen, während er bei dem Versuch einer Einbettung in die Newtonsche Physik als Fremdkörper erscheint. Den Schlüssel zum Verständnis liefert der sich vom Newton'schen stark unterscheidende Kraftbegriff. Für Leibniz ist die Kraft ähnlich wie für Descartes und seine Schüler eine Entelechie, etwas dem Körper Innewohnendes, das nicht von außen am Körper angreift, um eine Änderung des Bewegungszustands hervorzurufen, sondern als konstitutives Element zum Körper gehört. Ein Körper ist für Leibniz nicht nur ein undurchdringliches Ausgedehntes, sondern ein Ausdruck der in ihm wohnenden Kraft [1].

Wir haben an einem anderen Orte ausgeführt, daß in den materiellen Dingen etwas enthalten ist, was zur bloßen Ausdehnung hinzukommt, ja ihr vorangeht: nämlich eine natürliche Kraft, die vom Schöpfer den Dingen allerorts eingepflanzt worden ist. . . . Da es nun nicht angeht, diese Kraft wie durch ein Wunder auf Gott selbst zurückzuführen, so muß man annehmen, daß sie von ihm in die Körper selbst gelegt worden ist, ja, daß sie deren innerste Natur ausmacht.

Diese innewohnende Kraft ist verantwortlich dafür, dass der Körper sich bewegt. Für Leibniz gab es kein passives Trägheitsprinzip. Er betrachtete die Beibehaltung des Bewegungszustandes als Folge der Erhaltung der bewegenden Kraft (*vis viva*), die ständig aktiv ist, um die Bewegung aufrecht zu erhalten. Im Gegensatz zu Descartes und seinen Anhängern betrachtete Leibniz nicht die Bewegungsgröße  $mv$  als das rechte Maß der bewegenden Kraft, sondern die Größe  $mv^2$ . Auf die Gründe dafür will ich hier nicht näher eingehen. Bei der Einbettung in die Newton'sche Mechanik kam später der Faktor  $1/2$  dazu, so dass wir heute die *vis viva* formal mit der kinetischen Energie identifizieren können. Die Vorstellungen allerdings, die Leibniz damit verband, sind weitgehend vergessen worden.

Man kann nun fragen, welche Wirkung eigentlich die einem Körper innewohnende *vis viva* entfaltet. Leibniz sah diese im Wesentlichen zunächst darin, dass der Körper seinen Ort im Raum verändert, dass er also eine Wegstrecke zurücklegt. Nun kann aber eine solche Wirkung umso größer genannt werden, je größer die Masse des bewegten Körpers ist. Deshalb betrachtete er zunächst das Produkt aus Masse und zurückgelegter Wegstrecke und bezeichnete es als **Effekt** (*effect formel*). Es handelt sich hier um eine Wirkung, die die immanente Kraft nach Leibniz auch bei einer geradlinig-gleichförmigen Bewegung hervorbringen muss, um diese Bewegung aufrecht zu erhalten. Man kann im *Effekt* eine frühe Form des Wirkungsbegriffes sehen, die durchaus noch einen intuitiven Zugang gestattet.

Daneben gab es aber noch einen zweiten Versuch der Annäherung an den Wirkungsbegriff, bei dem die Wirkung der bewegenden Kraft nicht nur im Zurücklegen eines bestimmten Weges gesehen, sondern auch die Schnelligkeit, mit der dies geschieht, zum Ausdruck gebracht werden soll. Dies erreichte Leibniz dadurch, dass er den *effect formel* noch mit der Geschwindigkeit multiplizierte. Man kann diese Definition auch so deuten, dass jetzt nicht nur der Transport einer Masse, sondern eher die Vermittlung einer Bewegungsgröße  $p = mv$  über eine Strecke  $s$  hinweg entscheidend ist. Je größer  $mv$  und je größer  $s$  ist, desto größer wird die Wirkung der bewegenden Kraft angesehen. Die Wirkung wird also als Produkt  $mvs$  definiert. Leibniz bezeichnete diese Größe als **Aktion** (*action motrice*). Ein anderer Zugang zur *Aktion* ergibt sich, wenn man die *vis viva*  $mv^2$  mit der Zeit  $t$  multipliziert. Die *Aktion* ist also um so größer, je größer die *vis viva* und je länger die Wirkungszeit ist. Auch dies ist eine intuitiv gut zugängliche Vorstellung, die

eine gewisse Analogie zu Begriffsbildungen der Newton'schen Physik erkennen lässt. Während in der Newton'schen Betrachtungsweise die *Wirkung der Kraft* in der Änderung der Bewegungsgröße

$$\Delta p = \int_{t_1}^{t_2} F dt$$

gesehen wird, ist die *Wirkung der lebendigen Kraft* in der Leibniz'schen Physik durch

$$S = V \cdot \Delta t$$

zu beschreiben, worin  $V = mv^2$  die *vis viva* ist. Diese Betrachtung bezieht sich zunächst nur auf gleichförmige Bewegungen und muss in geeigneter Weise auf beliebige Bewegungen übertragen werden. Dies könnte etwa in der folgenden Weise geschehen:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} V dt = m \int_{t_1}^{t_2} v^2 dt = m \int_{s_1}^{s_2} v ds$$

Leibniz hatte vermutlich die an die menschliche Bewegungserfahrung anknüpfende Vorstellung einer fortlaufend wirkenden Aktivität im Sinne, die notwendig ist, um den Körper in Bewegung zu halten, so wie eben auch der Mensch sich fortlaufend anstrengen muss, wenn er sich aus eigener Kraft fortbewegt. Die Leibniz'schen Begriffsbildungen schließen sich viel enger an die Beobachtung der menschlichen Bewegungsorganisation an als die Newton'schen. Dies ist im Hinblick auf den Hinweis Rudolf Steiners von Interesse, dass man stärker vom Studium des menschlichen Bewegungsapparates ausgehen müsse, wenn man die Mechanik weiterentwickeln wolle.

Aus dem Blickwinkel der ursprünglichen menschlichen Erfahrung ist es zunächst schwer verständlich, dass eine fortlaufende Bewegung ohne Kraftaufwand möglich sein soll. Dies erlebt man im Gespräch mit Schülern, die noch nicht eine Schulung in moderner Dynamik durchgemacht haben, sehr deutlich, denn sie assoziieren Bewegung zunächst stets mit Kraft. Newton „beseitigte“ das Problem, indem er diesen Sachverhalt von der menschlichen Erfahrung ablöste und die Erhaltung der gleichförmigen Bewegung einfach als Grundprinzip postulierte und damit als nicht erklärungsbedürftig ansah. Inzwischen haben wir uns so sehr an diese Betrachtungsweise gewöhnt, dass sie uns als selbstverständlich erscheint und jede andere als abwegig. Die Frage, die sich uns allerdings stellt, ist, ob eine von der menschlichen Erfahrung abgeleitete Begriffsbildung wie die von Leibniz nicht ebenso gut wie oder in mancher Hinsicht vielleicht sogar besser als die äußerliche Betrachtungsweise Newtons geeignet ist auch den Bewegungsablauf im Bereich der toten Materie angemessen zu erfassen. Im Sinne einer axiomatischen Beschreibung der Mechanik ist die Newton'sche Vorgehensweise voll berechtigt und

soll nicht in Frage gestellt werden. Es soll lediglich darauf verwiesen werden, dass eine andere Beschreibung eventuell neue Erkenntnisse und einen neuen Zugang zum Thema liefern kann.

## Minimalprinzipien

Es ist gelegentlich die Vermutung geäußert worden, dass bereits Leibniz das Prinzip der kleinsten Wirkung gekannt habe. Dies lässt sich jedoch nicht nachweisen [3]. Leibniz hat bereits 1682, angeregt durch die Arbeiten von Fermat, versucht die Gesetze der Lichtausbreitung aus einem Minimalprinzip abzuleiten, dem Prinzip des *leichtesten Weges*. Dabei betrachtet er den Widerstand gegen die Lichtausbreitung längs des Lichtweges. Der Gesamtwiderstand des Weges  $\sum ws$  soll bei der Lichtausbreitung minimal werden, wobei  $w$  so etwas wie eine Widerstandsdichte ist, die proportional zur optischen Dichte ist. Eine Ausweitung dieser Gedanken auf die Mechanik ist aber bei Leibniz nicht zu finden, wohl aber etwas später (1744) bei Maupertuis [5], der offensichtlich an die Überlegungen von Leibniz anknüpft. Bereits Leibniz hatte die Vermutung geäußert, dass die Lichtgeschwindigkeit im dichteren Medium größer als im dünneren ist und sich damit Newton und nicht Fermat oder Huygens angeschlossen. Zur Begründung zog er die Analogie eines Kanales heran, der eine Verengung hat. In der Engstelle fließt das Wasser schneller (Kontinuitätsgleichung). Das Licht sollte sich nach Leibniz im optisch dichteren Medium ähnlich verhalten. Da es weniger Platz hat, sollte es schneller hindurchströmen. So gelangt man zunächst zu einem Minimalprinzip für die Größe

$$\int_{\text{Lichtweg}} v ds$$

Maupertuis erkannte, dass sich durch Hinzufügen der Masse  $m$  als Faktor daraus ein Minimalprinzip für die Größe machen ließ, die Leibniz als Wirkung (*action motrice*) bezeichnet hatte, und dass das Prinzip in dieser Form einen umfassenderen Geltungsbereich haben könnte. Tatsächlich führte eine Anwendung auf den *zentralen Stoß* zum gewünschten Erfolg, der Ableitung der Stoßgesetze [3] aus dem Minimalprinzip. Maupertuis verband diese Erkenntnis alsbald mit religiös-weltanschaulichen Vorstellungen. Er sah darin einen Beweis dafür, dass Gott die Welt ökonomisch und zielgerichtet erschaffen habe. Maupertuis sah in der Aktion ein Maß des „wahren Aufwandes in der Natur“ [5]. Erst viel später wurde erkannt, dass es sich gar nicht wirklich um ein Minimalprinzip handelt, sondern um ein Stationaritätsprinzip, dass also die Wirkung sich bei einer kleinen Variation des Weges in 1. Ordnung nicht ändert. Die weltanschauliche Verbrämung trug Maupertuis denn auch prompt die Gegnerschaft vieler aufgeklärter Wissenschaftler ein, die derartige Finalursachen aus der Wissenschaft verbannen wollten.

Es gab noch einen weiteren Beweggrund, der Maupertuis veranlasste, die Mechanik mit Hilfe des Wirkungsprinzips zu formulieren. Dies war seine kritische Haltung gegenüber dem Newton'schen Kraftbegriff. Die religiös gefärbten Begründungen für seine ablehnende Haltung sind heute nur noch schwer nachzuvollziehen. Deshalb werde ich mich im nächsten Abschnitt einer moderneren Auseinandersetzung mit diesem Thema zuwenden, die aber die gleiche Zielrichtung hat wie die von Maupertuis: die Vermeidung des Kraftbegriffs. Letzterer sah in der Kraft nicht die reale Ursache für eine Bewegungsänderung, sondern nur eine Beschreibung der beobachtbaren und ständig wiederkehrenden Wirkungen bei gleichen Vorgängen. H. Pulte schreibt dazu [4]: „In der Natur sind keine Kräfte als Ursachen beobachtbar, sondern immer nur bestimmte Wirkungen; der Kraftbegriff hat daher keine von der im 2. Bewegungsgesetz ausgedrückten Bewegungsänderung verschiedene Bedeutung.“

## Die drei Bilder der Mechanik

Heinrich Hertz hat 1894 in seinem grundlegenden Werk zur Mechanik [6] drei ganz verschiedene Darstellungsweisen der Mechanik beschrieben. Für das erste Bild stehen die Bewegungsgleichungen und die mit ihnen verbundenen Kräfte im Zentrum. Die kinetische und die potentielle Energie sind abgeleitete Größen, die streng genommen überflüssig sind, aber gelegentlich ein nützliches Hilfsmittel sein können. Die Wirkung ist in dieser Mechanik eigentlich ein Fremdkörper. Das Wirkungsprinzip wird allenfalls als Hilfsmittel betrachtet um die Bewegungsgleichungen abzuleiten und kann dann vergessen werden. Die Kritik von Hertz an diesem Bild richtet sich vor allem gegen die Rolle der Kräfte und deckt sich weitgehend mit der von Rudolf Steiner. Die Kräfte werden hier gewöhnlich metaphysisch interpretiert „als die vor der Bewegung und unabhängig von der Bewegung bestehende Ursache der Bewegung“.

Das zweite Bild der Mechanik — die energetische Mechanik — verzichtet auf Kräfte als Grundgrößen. In diesem Bild werden Masse und Energie als unzerstörbare substanzartige Größen eingeführt. Die Bewegungsgleichungen werden aus dem Prinzip der stationären Wirkung abgeleitet, ohne dass die Einführung von Kräften notwendig ist. Das Wirkungsprinzip regelt die Verteilung der Energie in Zeit und Raum und damit den Ablauf der dynamischen Prozesse. Hertz sah in dieser Mechanik zwar einen gewissen Fortschritt, da die „obskuren“ Kräfte nicht mehr nötig waren, aber er erkannte auch, dass die Annahme einer substanzartigen Energie ebenso problematisch war wie die Annahme kausal wirkender Kräfte. Seine Kritik richtete sich dabei vor allem gegen die potentielle Energie, da die kinetische Energie aus den Grundgrößen Weg, Zeit und Masse ableitbar ist, während die erstere eigentlich genauso metaphysisch ist wie die Kraft.

Hertz entschloss sich deshalb in Anknüpfung an Vorarbeiten von J. J. Thomson einen dritten Weg zu beschreiten, auf dem auf die Verwendung von potentiellen Energien verzichtet wird. An ihre Stelle treten kinetische Energien verborgener Massen. Nimmt die kinetische Energie der wahrnehmbaren Massen zu, so liegt das daran, dass die verborgenen Massen einen Teil ihrer Energie an die sichtbaren Massen abgeben. Auch dieses Bild der Mechanik bedient sich eines Wirkungsprinzips

$$\delta \int T dt = 0,$$

worin  $T$  die gesamte kinetische Energie (der sichtbaren und der verborgenen Massen) ist. Dieses Bild der Mechanik fällt derartig aus dem gewohnten Rahmen, dass es praktisch überhaupt nicht angenommen wurde und in Vergessenheit geraten ist. Dies liegt natürlich nicht zuletzt daran, dass auch hier unbeobachtbare Elemente, nämlich die unsichtbaren Massen eingeführt werden um eine vollständige Theorie zu ermöglichen, d.h. man postuliert eine unsichtbare Welt hinter der sichtbaren, die diese steuert, und landet damit wieder bei der Metaphysik. Hertz rechtfertigt seine Vorgehensweise damit, dass er darauf verweist, dass er keine „Wesen einer eigenen und besonderen Art“ einführt (Kräfte, Potentiale usw.), sondern dass er mit dem bereits Bekannten auskommt, nämlich mit Bewegung und Masse. Seine Hypothese ist, dass sich hinter der Bühne der sinnlichen Wahrnehmung genau das gleiche abspielt wie auf ihr.

Es kann kein Zweifel bestehen, dass vom Standpunkt einer goetheanistischen Wissenschaftsauffassung dieser Versuch sich ebenfalls den Vorwurf gefallen lassen muss, dass er metaphysische Elemente enthält. Dabei spielt es eigentlich keine Rolle, ob man Wesen einer neuen Art hinter den Dingen einführt oder ob man diese Rolle verborgenen Wesen der bereits bekannten Art zuordnet. Dennoch weist die Hertz'sche Kritik auf ein Problem hin, dass bisher nicht gelöst ist. Der Lösungsvorschlag ist allerdings nicht akzeptabel. Der goetheanistische Ansatz liegt gerade darin, dass man nicht ausgedachte Wesen hinter der Bühne der Wahrnehmung postuliert, sondern dass man in den mehr unmittelbaren Beobachtungen durch Bildung von Beobachtungsreihen Wesen einer höheren Art erkennt, die aber jetzt nicht hinter der Bühne lauern, sondern sich in den Akteuren auf der Bühne ausleben, ohne dass wir sie in naiver Weise wahrnehmen. Es muss unsere Aufgabe sein, diese höheren Wesen in der Verschränktheit der Phänomenen zu erkennen.

## Literatur

- [1] Leibniz, G. W.: *Specimen dynamicum*, 2, 750.



- [2] Leibniz, G. W.: *ber die Natur an sich oder über die den erschaffenen Dingen innewohnende Kraft und Tätigkeit* (1698), in: „Philosophische Schriften“ Band 4, S. 269ff., Darmstadt, 1992.
- [3] Pulte, H.: *Das Prinzip der kleinsten Wirkung und die Kraftkonzeptionen der rationalen Mechanik*, Stuttgart, 1989.
- [4] Ebd., S. 92.
- [5] Maupertuis, P. L. M.: *Accord de differentes Loix de la Nature qui avoient jusqu'ici paru incompatibles*, in: *Oevres*, 4, 45 - 64, Lyon, 1768 (repr. Hildesheim / New York, 1974).
- [6] Hertz, H.: *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*, Oswalds Klassiker der exakten Wissenschaften, B. 263, Frankfurt/M., 1996.

## **Zu Florian Theilmanns Text: ”Verschränkte Zustände und Goethes Raumbegriff”**

VON JÜRGEN VOGT

Florian Theilmann äußert den Verdacht, daß die Verwunderung über die Experimente mit verschränkten Zuständen verschwinden müßte, wenn ihnen Goethes Raumbegriff zugrunde gelegt würde. Diesen Verdacht, teile ich, kann ihn aber nicht für die verschränkten Zustände begründen, da ich mich auf diesem Gebiet viel zu wenig auskenne. Deshalb möchte ich das Doppelspaltexperiment heranziehen.

Das Doppelspaltexperiment ist nur verwunderlich, wenn das Licht als materieller Transportvorgang angesehen wird. Nur dann stellt sich die Frage, welchen Weg das Licht” genommen hat. Wenn mit der Goetheschen Auffassung des Lichts ernst gemacht wird, müßten Beugungsphänomene als Ergebnis der Gesamtsituation behandelt werden (Lampe, Spalt, evtl. Linse, Schirm). Von einem Weg zu sprechen, den das Licht nimmt, hätte keinen Sinn, genausowenig wie ein Widerspruch zwischen Wellen- und Teilchenvorstellung entstehen könnte. Die Mathematik, die die Beugungserscheinungen beschreibt, wäre eine - wenn auch nur äußerlich und noch nicht ihrem Wesen nach erfaßte - Idee, die Zusammenhang in die Erscheinungen bringt.

Lustigerweise ist die Aussage der Quantenoptik letztendlich die Gleiche: das

Ergebnis eines Versuchs hängt von der gesamten Anordnung ab. Trotz dieser Übereinstimmung zwischen Quantenoptik und Goetheanistischer Betrachtung stellt sich die Frage, ob der Gedankenweg, der zur Quantenoptik geführt hat, beschränkt werden kann. Entwickelt er sich nicht aus fragwürdigen Grundlagen? Entzieht er sich – so betrachtet – nicht selbst die Grundlage?

Zum Beispiel war es doch lange (und ist es noch?) umstritten, ob die Gravitation eine Fernwirkung sein kann. Newton konnte es sich nicht vorstellen. Er nahm an, daß es eine Substanz gibt, die die Kräfte vermittelt.

Stehen wir womöglich gegenüber den quantenmechanischen Phänomenen an einem ähnlichen Punkt? Wird man sich in ein paar hundert Jahren wundern, daß es uns nicht gelungen ist, das Licht ohne materiellen Transportvorgang zu denken? Nur befürchte ich, daß die Menschheit nicht "von selbst" so weit kommen wird. 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.

## 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	Schlesiering 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