

# THERMISCHE TÖNE

## Schwarzkörperstrahlung und Akustik bei Ehrenfest, Planck, Einstein

Von Jens Loescher (St. Gallen)

*Sound Ideation: Black Body Radiation and Acoustics with Ehrenfest, Planck, Einstein.*

The essay follows the ideational path of some quantum physicists in their discussion of the quantization of blackbody radiation. I focus on notebooks by Paul Ehrenfest and Albert Einstein. The analogies that Ehrenfest and Einstein use to describe the quantum-mechanical „behaviour“ of thermal waves all borrow from acoustics. As in the emerging experimental psychology, the thinking of the first Solvay generation is „musically infected“. The article concludes a series of attempts to describe the genesis of ideas in the natural sciences as „internalistically“ as possible, in the tradition of Larry Holmes.

Der Essay verfolgt die Ideation einiger Quantenphysiker bei ihrer Auseinandersetzung mit der Quantelung von Schwarzkörperstrahlung. Dabei fokussiere ich auf Notizbücher Paul Ehrenfests und Albert Einsteins. Die Analogien, vermittels derer Ehrenfest und Einstein das quantenmechanische ‚Verhalten‘ thermischer Wellen beschreiben, nehmen durchweg Anleihen bei der Akustik. Wie in der entstehenden experimentellen Psychologie ist das Denken der ersten Solvay-Generation ‚musikalisch infiziert‘. Der Artikel schliesst eine Reihe von Versuchen ab, in der Tradition von Frederic Lawrence Holmes die Ideengese in den Naturwissenschaften so ‚internalistisch‘ wie möglich zu beschreiben.

„Grammophon Frau – Albert schimpft – Frau dreht Trichter nach“

(PAUL EHRENFEST, Prager Tagebuch. Archive for the History of Quantum Physics AHQP, ehr 12, notebooks.)

“The living room of the Ehrenfest’s home was made conspicuous by the blackboards covering the greater part of the side walls. Paul and Tatiana would furiously argue over a particular equation. Paul would sometimes stop to play a Bach number on his piano during the middle of the argument. He would soon stop, and then the argument would resume ... (From an unpublished lecture by L.B. Loeb. Loeb might be an excellent source for many of our subjects)”.

(Kuhn-Mitarbeiter\*in. AHQP,

Unpublizierte Miscellanea zu Ehrenfest, S. 9.)

„Wer kennt nicht seine dynamische Gastheorie? – Zuerst entwickeln sich majestätisch die Variationen der Geschwindigkeiten, dann setzen von der einen Seite die Zustands-Gleichungen, von der anderen die Gleichungen der Centralbewegung ein, immer

höher wogt das Chaos der Formeln; plötzlich ertönen die vier Worte: ‚Put  $n = 5$ ‘. Der böse Dämon verschwindet, wie in der Musik eine wilde, bisher alles unterwühlende Figur der Bässe plötzlich verstummt; wie mit einem Zauberschlage ordnet sich, was früher unbezwingbar schien. Da ist keine Zeit zu sagen, warum diese oder jene Substitution gemacht wird; wer das nicht fühlt, lege das Buch weg; MAXWELL ist kein Programmusiker, der über die Noten deren Erklärung setzen muss. Gefügig speien nun die Formeln Resultat auf Resultat aus, bis überraschend als Schlusseffect noch das Wärme-Gleichgewicht eines schweren Gases gewonnen wird und der Vorhang sinkt.“

(LUDWIG BOLTZMANN, Populäre Schriften, Leipzig: Barth 1888, S. 29.)

## I.

### *Einleitung<sup>1)</sup>*

Das Schwarzkörper-Problem ist deshalb so interessant, weil es die Energieübertragung unanschaulich macht, die für die Physik entscheidend ist. In der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts häufen sich Theorien, die zusätzlich zur mechanischen Energieübertragung auch mikroskopische und wellentheoretische Energieübertragungen thematisieren. Dabei herrscht eine prinzipielle Dichotomie, die einerseits von Korpuskeln und entsprechenden ‚klassischen‘ Kräften ausgeht, andererseits von einem Feld, dem elektromagnetische Kräfte zugrunde liegen. Auch die jeweiligen mathematischen Formalisierungen des Energieübertrags unterscheiden sich signifikant (Wien, Boltzmann, Maxwell).

Das Schwarzkörperproblem beschreibt einen Körper, der Lichteinfall nahezu vollständig absorbiert und die entsprechende Energie im nicht-sichtbaren Bereich als Schwarzkörperstrahlung wieder abgibt. Präzisionsmessungen von Lummer und Kurlbaum bestätigten eine lange gehegte Vermutung, nämlich dass die Abgabe von Schwarzkörperstrahlung nicht ‚linear‘ zur Wellenlänge des einfallenden Lichts und zur Temperatur, also der ‚Energie-Aufnahmebereitschaft‘ durch die Moleküle des Innenraums des schwarzen Körpers erfolgt, sondern, so Planck, in Quanten. Somit ergibt sich bei kürzeren Wellenlängen eine Abweichung von Boltzmanns Äquipartitionstheorem. Es wird nicht mehr, sondern weniger Energie aufgenommen (und abgegeben), da bei kürzeren Wellenlängen das Energieaufnahme-Quantum zu hoch für die einfallende Strahlung ist. Insofern wird in der Literatur zu Recht Plancks Vortrag im Jahr 1900 als Epochenscheide wahrgenommen, der die Physik endgültig in den Bereich des Unanschaulichen bringt.<sup>2)</sup> Denn eine Quantelung der Energieübertragung

<sup>1)</sup> In memoriam Prof. Dr. Thomas R. Eimer, Radboud University Nijmegen, Niederlande.

<sup>2)</sup> Es handelt sich hier um einen vorbereiteten Kommentar Plancks zu Lummers und Kurlbaums Bericht ‚über die Emission langer Wellen durch den schwarzen Körper‘ in der Sitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 19. Oktober 1900 in Berlin. Arnold Sommerfeld bezeichnet diese Sitzung als die Geburtsstunde der Quantentheorie (Atombau und Spektrallinien, Leipzig 1919, S.4).

gibt es im mechanischen Bereich nicht, da, von Reibungsverlusten abgesehen, Körper laut Energieerhaltungssatz Energie kontinuierlich übertragen.

Dieser Gestalt-Switch (Kuhn), den Plancks ‚Akt der Verzweigung‘ hervorbrachte,<sup>3)</sup> beschäftigte diejenigen Physiker, die aus der Wellentheorie heraus bereits die klassische Physik verabschiedet hatten. Das Ziel Ehrenfests, Einsteins und anderer bestand darin, den von Planck geöffneten Spalt nicht in das klassische ‚Universum‘ zu integrieren, sondern die daraus ableitbare Kluft zu verstärken und andere Bereiche damit zu ‚infizieren‘. Die Vielzahl der Analogien, die Ehrenfest und Einstein benutzen, um die Energiequantelung im schwarzen Körper anschaulich zu machen, dient also auch der Übertragung dieses prinzipiellen Erkenntnisbruchs in andere sicher geglaubte mikroskopische und makroskopische Bereiche der Physik. Analogien von Quantenphysikern wollen also anschaulich machen, aber auch common-sense-Argumente aus den Angeln heben, da die quantenmechanische ‚Welt‘ prinzipiell unanschaulich ist und den *common sense* verletzt. Die vielleicht berühmteste Analogie, die genau diese Doppelbewegung des Veranschaulichens und des permanent Gegenläufigen demonstriert, ist Schrödingers und Einsteins Diskussion um die Katze in der Stahlkammer.

In der Frühphase sind die Analogien weniger ‚burlesk‘, sondern bedienen sich der allgemein bekannten Paradigmen: zunächst stellt sich das Problem, wie der ‚vakuistische‘ Innenraum des schwarzen Körpers ‚plenistisch‘ gefüllt werden kann. Korpuskular- und wellentheoretische Paradigmen befinden sich hier im Widerstreit. Der Innenraum kann mit Federn, Saiten, Spiegeln oder mit Gasen gefüllt werden. Planck entschied sich für einen hypothetischen ‚Hilfskörper‘ (Ehrenfest), den er, wie zu zeigen sein wird, in klarer Analogie zur Akustik, Resonator nennt. In einer Diskussion mit Einstein verdeutlicht Planck, dass Resonator das Konzept sei, das am besten die Absorptions- und Abgabe-Leistung des schwarzen Körpers beschreibe.<sup>4)</sup> Mit dieser hypothetischen Entität allerdings vollzieht Planck – mehr als mit der Konstante  $h$  – eine problematische Einhegung des Erkenntnisbruchs, die, wie beschrieben, von Ehrenfest, Einstein und Bohr nicht geteilt wird. Im Gegenteil: deren Denkbewegungen in den Notizbüchern gehen in die Richtung, die „quantenmechanischen Krallen“ (Ehrenfest) von Federn, Saiten, Molekülen in Gasen und Lösungen zu schärfen.

<sup>3)</sup> Ich gehe hier nicht auf die Debatte der ‚discontinuist‘ versus ‚continuist‘-Fraktionen ein (Klein versus Kuhn), also ob Planck tatsächlich für die Resonatoren distinkte Energiequanten eingeführt hat und ob er sich darüber im Klaren war, dass dies den gesamten mikroskopischen Bereich der Physik betrifft.

<sup>4)</sup> Siehe Plancks Kommentar zu Einsteins Vortrag am 21. September 1909 vor der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg, in dem dieser vorschlug, das Konzept Resonator durch Spiegel zu ersetzen.

Und so ist diese Epochenscheide um 1900 die letzte Phase, in der sich Physiker ernsthaft mit dem Galilei'schen Objektarsenal auseinandersetzen, wenn auch, um es heuristisch für seine endgültige Verabschiedung zu nutzen. Fortan verzichtet die Physik auf Anschaulichkeit. In der langen Geschichte der Naturwissenschaften vor dem neunzehnten Jahrhundert gab es allerdings eine Disziplin, die immer schon unanschaulich war: die Musik. Seit der Gregorianik und dann Johann Sebastian Bach, also der modernen Harmonielehre, ist dies eine mathematische Disziplin. Sie ist semantisch prinzipiell nicht rigide oder leer und sie folgt – bei Bach – widerspruchsfreien Transformationsregeln. Ungleich der Mathematik arbeitet Musik ausschließlich im engen Zeitfenster kognitiver Aufmerksamkeit: im Akt des Zuhörens. Ein zusätzlicher Filter – das Gedächtnis, aus dem sich die Folge von Tönen in ein Werk sedimentiert – erhöht den Druck auf diese Kunstform, emotive und ästhetische Valenzen im Moment zu kreieren und memorabel zu machen. Das re-engineering der ‚mathematischen‘ Formalisierung kann zwar mittels der Partitur erfolgen – analog zur Papierarbeit der Physiker –, das Kunstwerk an sich – die ‚Theorie‘ – aber wird in der Gedächtnisarbeit konstruiert. Ebenso ist mathematische Wahrheitsfindung in hohem Maße auf Gedächtnisleistung angewiesen, da der Prozess mit Projektionen arbeitet (Algebra auf Geometrie, etc.), zeitlich ‚antragbar‘ und unabgeschlossen ist.<sup>5)</sup> Deshalb ist mathematisches Denken auf intuitive, plötzliche und im Gedächtnis haftende Verständlichkeit angewiesen: ‚hörendes‘, musikalisches Denken.

Die These dieses Aufsatzes lautet, dass die entscheidenden Versuche, Plancks Geniestreich wider Willen weiterzudenken, ‚musikalisch‘ sind. Genauer gesagt: sie nehmen Anleihen in der physikalischen und psychologischen/physiologischen Akustik. Rayleigh war Akustiker, bevor er sich der Schwarzkörperstrahlung zuwandte. Bei ihm ist der schwarze Körper mit Schallwellen gefüllt, und das sich akkomodierende Ohr ist ein ‚gequantelt‘ aufnehmender Resonanzkörper. Wie Helmholtz, Mach und Rayleigh hatte sich Planck einlässlich mit akustischer Akkomodation beschäftigt, also mit dem Phänomen, dass Versuchspersonen natürlich gestimmte Intervalle als harmonische wahrnehmen. Akkomodation lässt sich mit physikalischem common sense nicht erklären, da die Frequenzen von natürlichen im Gegensatz zu harmonischen Intervallen klar differieren. Gleichwohl ist das Phänomen messbar. Insofern beschreibt dieses fachliche Interesse Plancks mehr als nur eine Digression des Musikliebhabers. Es ist die Vorbereitung auf den Erkenntnisbruch der Schwarzkörperstrahlung, also darauf, den eigenen confirmation bias permanent durch den ‚Eigensinn‘

---

<sup>5)</sup> Siehe Gödels Widerlegung der Widerspruchsfreiheitshypothese der Finitisten um Hilbert und Bernays.

der Empirie hinterfragbar zu halten. Schließlich kann Einsteins und Ehrenfests Prager Freundschaft als Gründungsurkunde der hörenden Quantenphysiker gelesen werden.

In ‚externalistischer‘ Perspektive lässt sich bei Ehrenfest, Einstein und Planck ein Forschungshabitus ablesen, der neben den ‚nationalen‘ Postulaten technischer Exaktheit eines Emil Du Bois-Reymond oder Werner Siemens den Bildungsbürger wieder in die Waagschale wirft. Um die Jahrhundertwende verschiebt sich die „Bau-auf“-Sprache der Ingenieure und wissenschaftlichen Entrepreneure erneut in bürgerliche Kategorien: Naturwissenschaftler sind wieder bourgeois, nicht citoyen. Dies steht nicht im Widerspruch zur Professionalisierung und Institutionalisierung der Naturwissenschaften vom imperialen Zeitalter, etwa dem preußischen System Althoff, bis hin zum wirtschaftlichen Autarkiestreben des NS-Regimes. Im Gegenteil: die „Neue Staatlichkeit“ in der Wissenschaftsförderung (Kaiser Wilhelm Gesellschaft, Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft) markierte das Interesse einer an Wissenschaft interessierten und ihrerseits ‚verwissenschaftlichten‘ Politik. Im Unterschied zur Gründerzeit reicht nun der Habitus des ‚Machers‘ nicht aus, sondern Quantenphysiker reklamieren für sich das symbolische Kapital einer alteingesessenen Schicht. Akustik als ästhetische und physikalische Disziplin war für diese Eigenpositionierung das ideale Feld.<sup>6)</sup> Man kann dies an der Funktion von Hauskonzerten in der Grunewalder Professorengemeinde zeigen, aber auch an Max Plancks erwähnten ‚Nebeninteressen‘ sowie an Einstein und Ehrenfest. Als Ressource für die Neue Staatlichkeit der Wissenschaftsförderung reklamierten die ‚hörenden Quantenphysiker‘ Ressourcen für sich.

## II.

### *Grundlegung*

Paul Ehrenfest hat einen festen Platz in der kollektiven Erinnerung der Quantenphysiker inne. Seine Einschätzung, es gebe kein ‚Ehrenfest-Problem‘, keine Fragestellung, die mit seinem Namen untrennbar verbunden sei,<sup>7)</sup> hat sich als unzutreffend erwiesen. Spätestens mit Einsteins Ritterschlag war dem adiabatischen Prinzip ein Platz in der Physikgeschichte sicher. Darüber hinaus galt Ehrenfest als Meister der Verknappung und Veranschaulichung von komplexen quantenphysikalischen Problemen. Es gelang ihm, zumeist in Vorlesungen und auch Vorträgen, Positionen der Quantenphysik mit wenigen pointierten und

<sup>6)</sup> TIMOTHY LENOIR, *Instituting Science. The Cultural Production of Scientific Disciplines*, Stanford (Stanford University Press) 1997, S. 13.

<sup>7)</sup> Brief an Abram Ioffe, 20. Februar, 1913.

oftmals überzeichneten Gedankenexperimenten kognitiv fassbar zu machen, ohne sie mathematisch herzuleiten.<sup>8)</sup> Derartigen genialischen Verknüpfungen und Symbolisierungen gehen in der Regel intensive Vorarbeiten voraus, die mit rhetorischen Techniken arbeiten. Dementsprechend stelle ich hier einige frühe Notizbücher Ehrenfests in den Mittelpunkt, die der Vorbereitung seiner Publikationen zum adiabatischen Prinzip dienten. Es handelt sich insgesamt um 24 Bücher, die in Leiden unter der Signatur ENB 1 abgelegt sind und in den sechziger Jahren von Thomas Kuhn und seinen Mitarbeitern verfilmt wurden. Im Wesentlichen konzentriere ich mich hier auf Notizbuch 6, das am 12. Juli 1905 begonnen und im August 1906 geschlossen wurde.

Der Gang der Argumentation verläuft wie folgt: Ehrenfest verfolgt Techniken der Veranschaulichung des quantenphysikalischen Phänomens der Schwarzkörperstrahlung. Zunächst wird Schwarzkörperstrahlung thermisch verstanden: der leere Raum des Hohlkörpers mit kinetischen/mechanischen Hilfskörpern gefüllt. Diese Hilfskörper werden in subsequenten Konkretisierungen sowie Zeichnungen in den Notizbüchern etabliert – und zwar als Puffer, als Stoßatome und als akustische Saiten. Ehrenfests innovativer Pfad folgt durchgehend der Analogie kinetische Gastheorie/Wärmestrahlung (ENB 1, VI, 401), die in Form von ‚Tafeln‘ in den Notizbüchern verräumlicht wird. Praktisch bedeutet dies visuelle Gegenüberstellung, das Offenlassen von Lücken und Transfers zwischen den Kategorien der Analogie.

In einer berühmten Experimentreihe hatten Lummer und Kurlbaum im Jahr 1898 einen fast vollständig Strahlung absorbierenden Hohlraum konstruiert.<sup>9)</sup> Weil diese Objekte an der Innenseite mit Chrom-Nickel oder Kobaltoxid geschwärzt werden, sprachen schon Lummer und Kurlbaum von schwarzen Körpern. Das Thermik-Lehrbuch von Baehr und Stephan beschreibt den Versuchsaufbau: „Um den Schwarzen Körper als Bezugsnorm

---

<sup>8)</sup> Siehe zu Ehrenfest immer noch Martin Kleins Grundlagenwerk: ›Paul Ehrenfest. The Making of a Physicist‹, Amsterdam 1970. Klein öffnet das Feld in seiner Monographie zu Recht mit Ehrenfests fliegendem Laboratorium in der Leidener Antrittsvorlesung und zitiert Lichtenbergische Aphorismen in Briefen an Ioffe. Sowohl Einstein als auch Pauli betonten in ihren Nekrologen Ehrenfests didaktisches Talent.

<sup>9)</sup> WILHELM WIEN, OTTO LUMMER, Methode zur Prüfung des Strahlungsgesetzes absolut schwarzer Körper, in: *Annalen der Physik* 56 (1895). OTTO LUMMER, ERICH PRINGSHEIM, Über die Strahlung des schwarzen Körpers für lange Wellen, in: *Verhandlungen der deutschen Physikalischen Gesellschaft* 2 (1900), S. 163–180. Siehe dazu: DIETER HOFFMANN, On the Experimental Context of Planck's Foundation of Quantum Physics, in: JÜRGEN RENN, JOCHEN BÜTTNER, MATTHIAS SCHEMMELE, Exploring the limits of classical physics: Planck, Einstein, and the structure of a scientific revolution, in: *Studies in History and Philosophy of Science Part B* 34 (1), 2003, S. 37–59. DIETER HOFFMANN, Black Body, Planck's constant  $h$ , in: D. GREENBERGER, K. HENTSCHEL, F. WEINERT (Hrsg.), *Compendium on Quantum Physics*, Heidelberg 2009, S. 36–39.

für Strahlungsmessungen zu verwirklichen, verwendet man einen Hohlraum mit einer kleinen Öffnung. Ein durch diese einfallender Strahl trifft auf die Hohlraumwand, wird dort größtenteils absorbiert, und der reflektierte Teil trifft eine andere Stelle der Wand, wo er wieder absorbiert und zu einem kleinen Teil reflektiert wird, usw. Bei genügend kleiner Hohlraumöffnung kann nur ein verschwindend kleiner Teil der einfallenden Strahlung den Hohlraum wieder verlassen. Die Bedingungen vollständiger Absorption der einfallenden Strahlung ist damit in hohem Maße erfüllt.<sup>10)</sup>

Planck nahm diese experimentelle Konstellation zum Anlass für seine Gründungsurkunden der Quantenphysik, den berühmten Berliner Akademie-Vortrag im Jahr 1900 sowie die Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung, die im Jahr 1906 erschienen. Denn es zeigte sich – in Theorie und Experiment –, dass die einfallende Strahlung zwar nach Kirchhoffs Gesetz vollständig absorbiert wird und in Schwarzkörperstrahlung übergeht, dies aber nicht kontinuierlich, sondern in bestimmten steady states oder Quanten. In der Theorie, also idealiter, nehmen linear schwingende Dipole, die Planck Oszillatoren nannte, wegen ihrer Eigenschwingung Strahlung nur in bestimmten ‚Intervallen‘, Quanten auf und geben schwarze Strahlung auch nur in Quanten ab.

Nun hatten sowohl Lorentz als auch Bohr folgendes Gedankenexperiment in den Raum gestellt: Was geschieht, wenn der Hohlraum unendlich langsam verkleinert, also komprimiert wird? Die Kompressionsenergie müsste sich in kinetische Energie/Wärme der im Hohlraum befindlichen Gasmoleküle und/oder Strahlungsenergie umsetzen. Hat diese Veränderung der Energieverteilung nun Auswirkungen auf die Quantelung der Schwarzstrahlung – und wenn ja, wie? Ehrenfest fasst ‚Versuchsaufbau‘ und Fragestellung im Jahr 1928 so: „Sind die Eigenschwingungen eines Spiegelhohlraums durch Einbringung eines beliebigen Strahls erregt, und verkleinert man nun unendlich langsam den Hohlraum durch Zusammenschieben der Spiegelwände, so wachsen dabei auf Kosten der gegen den Strahlungsdruck geleisteten Kompressionsarbeit die Partialenergien aller Eigenschwingungen, und zwar direkt proportional mit ihrer Frequenz.“ Der Punkt ist: diese Energiezunahme geht in steady states vor sich, nicht kontinuierlich.<sup>11)</sup> „Bei einer adiabatischen Beeinflussung, d.h. bei einer Veränderung der Bewegungsbedingungen, die, verglichen mit dem Ablauf der inneren Zustandsänderungen unendlich langsam erfolgt, geht jede ‚quantös‘ erlaubte Bewegung des undeformierten Systems in eine ‚quantös‘

<sup>10)</sup> HANS-DIETER BAEHR, KARL STEPHAN, Wärme- und Stoffübertragung, Heidelberg 2013, S. 543.

<sup>11)</sup> PAUL EHRENFEST. Collected Scientific Papers, hrsg. von MARTIN KLEIN, Amsterdam 1959, S. 464. Es handelt sich um den Aufsatz ‚Adiabatische Transformationen in der Quantentheorie und ihre Behandlung durch Niels Bohr‘, in: Die Naturwissenschaften, H. 27, 1928.

erlaubte Bewegung des deformierten Systems über.<sup>12)</sup> Wiewohl im Einklang mit Wiens Verschiebungsgesetz, ist dieses Phänomen erkennbar ‚quantenmechanisch‘ und geht über Plancks Postulat hinaus.

### III.

#### *Mechanische Hilfskörper*

Physik am Ende des neunzehnten Jahrhunderts operierte mit zwei grundverschiedenen Konzepten: zum einen das ‚plenistische‘, das sich auf das Verhalten von Gasen richtete; und das ‚vakuistische‘, das elektromagnetische Felder in einem ‚leeren‘ Raum in den Mittelpunkt stellte. Diskreter Partikel versus kontinuierliches Feld: zwischen diesen Polen bewegt sich auch die Debatte um das adiabatische Prinzip.

Ehrenfest, der Boltzmann-Schüler, arbeitet seit 1905 an einer Neufassung des adiabatischen Prinzips, zumeist im Sinn einer durchaus ‚mechanischen‘ Auffassung von Resonatoren, die im Sinn eines Partikels – paradox – Energie nur gequantelt aufnehmen und abgeben. Boltzmanns ‚Anti-Maxwell-Programm‘, eine statistisch bestimmbare Energieverteilung im thermischen Equilibrium eines Gasgemisches, lässt sich ja auch als letzte Ehrenrettung Newtonscher Mechanik lesen, die im Konzept eines elektromagnetischen Feldes und ätherlosen Raums verloren geht. Rayleigh und Jeans hatten Schwarzkörperstrahlung bereits in dieser ‚plenistischen‘ Weise interpretiert. Und so begegnen uns in Ehrenfests Notizbüchern, die die großen Publikationen zum adiabatischen Prinzip vorbereiten, gleichsam konkretisierte Plancksche Oszillatoren, die das unanschauliche Paradox einer kontinuierlichen Energiezufuhr in gequantelte Energieaufnahme materialisieren. Dieser Vorgang wird mehrfach in das Bild einer ‚unregelmäßig‘ leitenden Kopplung der Oszillatoren gebracht. Dieser, so wörtlich, ‚Gummifaden‘ sorgt nicht nur dafür, dass die Oszillatoren gedämpft und phasenverschoben schwingen, sondern er sorgt eben auch für eine ‚gequantelte‘ Energieaufnahme, ist also das mechanische Pendant des Planckschen ‚Quantensprungs‘. Gekoppelte Oszillatoren sind wahrscheinlich die originellste Verschiebung Ehrenfests im Vergleich zu Planck, bei dem Oszillatoren ja isoliert schwingende Dipole sind (*siehe Abb. 1*).

Wir sehen hier den leeren Raum des Schwarzkörpers nicht nur gefüllt, sondern geradezu bevölkert. Ehrenfest spricht durchgehend von einem Maxwell-Gas, in dem sich die ‚Hilfskörper‘, welche die kinetische/thermische Energie letztendlich in schwarze Strahlung ‚umsetzen‘ sollen, befinden. Per

---

<sup>12)</sup> Ebenda.

456  
 Äther=Atomennetz  
 mit Resonat[oren] = ausgez[eichnete] Atomen  
 (Stoßatome) gestoßen von  
 freiflieg[enden] Molekülen.

1. Äther enorm vielmal  
 gegeben und Moleküle.  
 Für die Stoßatome gilt dann  
 Maxwell – Geschw[indigkeits] Verth[eilung] –  
 Nun damit vertr[äglich] Normal-  
 schwing[ung], etc

2. Nur ein Äther mit enorm  
 schwingenden Resonatoren –

H-Theorem      Stöße  
    in innere Zustrahl[ung]

3. Zwei Resonatoren d[urch]  
 Gummifaden verbunden.  
 inmitten eines Maxwell Gases – Erweitern.

*[Seitenwechsel]*

4. Zahlreiche elast[isch] aufgeh[ängte]  
 elektr[ische] Moleküle

1. gestoßen  
 2. Fourier beeinflusst

H-Theorem bilden zur  
 Determin[ierung] der Fourient[wicklung] u[nd] der Stöße

*Abb. 1 (ENB, VI, 456. Wortergänzungen J. L.)*

definitionem ist ein Maxwell-Gas stoßfrei. Hier wird jedoch, und auch dies durchgehend, die einfallende Lichtstrahlung durch Molekülstöße repräsentiert, die die Energie an die Hilfskörper weitergeben. „Durch Zurückgehen auf Hauptschwing[ung] des Systems Aether plus Resonatoren zeigen, dass so nie eine Änderung der ‚Farbenverteil[ung]‘ herauskommen kann – | wohl aber durch Molekülstöße“ (ENB I, VII/782; Worterg. J. L.), heißt es in einem späten Eintrag. Für die Partikel-Kandidaten der Hilfskörper fallen die unterschiedlichsten Namen: Oszillatoren, Resonatoren, Puffer, Hindernis-Kugeln, Stöpsel-Moleküle, Puffer-Koordinaten, Stäbe. Die mechanischen Pendants der einfallenden Lichtstrahlung werden Stoßatome oder einfach Moleküle genannt. Folgt man der Logik dieser Begriffe und Bilder, so stößt und (zer)streut sich das Gas mit Boxhandschuhen zum thermischen Equilibrium. Für ein quantenphysikalisches Phänomen ist hier erstaunlich viel von Newtons und Hartleys Karambolagebillard enthalten.

Schon Kuhn bemerkt, dass in den ‚adiabatischen‘ Notizbüchern die Resonatoren nicht nur als Stäbe (also Dipole) firmieren, sondern als Puffer oder Pufferkoordinaten, im Prinzip also als Springfedern.<sup>13)</sup> Hier ist dies unter Punkt 3 – mit Zeichnung – der Fall. Dieser ‚Hilfskörper‘ hat in den Notizbüchern Konjunktur, weil er mechanisch ein wichtiges Prinzip der Planckschen Oszillatoren ausdrückt, die Eigenschwingung. Puffer absorbieren die Stöße der Gasmoleküle (die Strahlungsenergie) je nach ihrer Eigenschwingung und geben diese als ‚Schwarzwellen‘ wieder ab. Unter Punkt drei wird dieses Szenario dahingehend modifiziert, dass zwei Puffer miteinander gekoppelt sind und der Stoßimpuls über diese ‚axonale‘ Verbindung transportiert wird. Dieser Gummifaden schwingt allerdings – in Analogie zur aus mehreren Stücken zusammengesetzten Saite – nicht-linear. Er transferiert den Stoßimpuls – die Strahlungsenergie – nur in bestimmten ‚Quanten‘. So gerät das gesamte Äthernetz in eine vielfältig gekoppelte und ‚quantös erlaubte‘ gedämpfte Schwingung.

Dies wird bereits zehn Einträge später deutlich, wenn der Schreibende seinen Schreibbefehl „Erweitern“ einlöst, mit Stellenangabe des Bezugseintrags (siehe Abb. 2).

466  
Energisch anpacken

1. 456/1  
2. Zahlreiche Syst[eme].  
Nur dieses  
Molekül von Maxwell-Gas  
gestoßen  
Zahl u[nd] Zeitmittel

3. Ein großes ‚Äthernetz‘  
mit zahlreichen Resonatoren  
Jeder Stoß auf einen Resonator  
pflanzt sich mit bestimmter

1. Verkl[einerung]  
2. Phasenverschiebung

auf alle anderen fort

Abb. 2 (ENB, VI, 466. Wortergänzungen J. L.)

<sup>13)</sup> THOMAS KUHN, *Black Body Radiation and the Quantum Discontinuity, 1884–1912*, Oxford 1978. S. 154. Laut Kuhn nimmt Ehrenfest bereits um 1905 Notiz von Rayleighs und Jeans’ mechanischer und akustischer Ausformung des Schwarzkörperproblems.

### *Zusammenfassung*

Das „Zurückgehen auf die Hauptschwingung des Systems“, also gleichsam die Boltzmannisierung der Planckschen Lesart des Schwarzkörper-Problems, zieht die Idee der Kopplung der Oszillatoren zwangsläufig nach sich. Der Hohlraum des Schwarzkörpers ist gemäß der Analogie thermisches Gasgemisch/strahlungsabsorbierendes ‚Feld‘ von Hilfskörpern bevölkert, die gequantelte Strahlungsabsorption und -abgabe mechanisch veranschaulichen. Diese Hilfskörper werden vermittels Zeichnungen zusätzlich konkretisiert. Ehrenfest etabliert im wahrsten Sinn des Wortes Hindernisse im Hohlraum, weil er das quantenphysikalische Phänomen der Schwarzkörperstrahlung wie in einer Nebelkammer sichtbar machen möchte.

### IV.

#### *Akustische Hilfskörper*

Die Idee, die Gesamtschwingung des Hohlraums in den Mittelpunkt zu stellen, geht auf John William Strutt, Baron Rayleigh – im Folgenden: Rayleigh – und James Jeans zurück. Rayleigh war Akustik-Experte und hatte 1877 ein maßgebendes Werk, ‚The Theory of Sound‘, vorgelegt, bevor er sich der thermischen und im Besonderen der Schwarzkörperstrahlung zuwandte. Im Wesentlichen steht hier die Analogie zwischen Frequenzen akustischer Wellen und der Wärmestrahlung im Vordergrund – trotz der physikalischen Unterschiede: akustische Wellen sind skalar und longitudinal, elektromagnetische Wellen sind vektoriell und transversal. Erneut spielt, wie bei Federn, die Eigenfrequenz, und damit die ‚selektive Aufnahme‘ von ‚Impulswellen‘ eine große Rolle: Stimmgabeln, Saiten, die Resonanzkörper musikalischer Instrumente sind dafür Beispiele; zentral ist hier jedoch der Helmholtz-Resonator. Dies schwingt ja schon im Planckschen Begriff des Resonators mit, der den Helmholtzschen offensichtlich alludiert.

Die Funktion dieser Hohlraumkugeln, die direkt an das Ohr appliziert werden, ist es ja, Obertöne aus einem Klangspektrum herauszufiltern (zu verstärken), was aufgrund der ‚Eigenschwingung‘ des akustischen Hohlraums geschieht. Für Ehrenfest, den leidenschaftlichen Pianisten, sind Obertöne ein intuitiv erfahrbares Konzept. Das Klangspektrum eines Tones, das sich ja aus Grundton (fundamental) und Obertönen zusammensetzt, lässt sich vermittels der Fourier-Analyse in einzelne Sinusfunktionen auseinanderlegen. Im physikalischen Sinn sind diese ‚Fourier-Wellen‘ lineare Schwingungen, der ‚Gesamt-Klang‘ oder die Gesamtschwingung des Tons nicht zwangsläufig. Die Analogie zwischen den Partialschwingungen des ‚Ehrenfest-Gases‘, also Äther-

schwingungen auf bestimmten Frequenzen, und den *partials*, also den Obertönen, ist schlagend und wird von Ehrenfest präzise gesehen. In dem Moment, da der leere Raum des schwarzen Körpers ‚plenistisch‘ gefüllt wird, lassen sich elektromagnetische Wellen als akustische ‚lesen‘. Dies ist mit der „Analogie - Moleküle - Partialschwingungen“ in Notizbuch 6 gemeint (ENB I, VI, 458).

Rayleigh ersetzt das ‚System‘ des schwarzen Körpers mit den akustischen Wellen einer „cubic mass of air“<sup>14)</sup> und transferiert Regeln der physikalischen Akustik wie Wellenausbreitung, -dispersion und -streuung auf das elektromagnetische Verhalten des strahlenden Innenraums. Umgekehrt denkt er über die ‚Quantelung‘ akustischer Phänomene nach und modelliert das adiabatische Prinzip akustisch. Ehrenfest vermerkt mit Interesse, wie Rayleigh es in einem Artikel aus dem Jahr 1902 unternimmt, mechanische/akustische Schwingungen in einen adiabatischen Zustand zu bringen: „unendlich langsame Verkürzung 1. der Fadlänge eines Pendels, 2. der Länge einer transversal schwingenden Saite durch Überschieben einer engen Röhre“<sup>15)</sup>. Letzteres ist präzise der Versuchsaufbau, den Carl Stumpf – unter tätiger Mithilfe Plancks in Berlin – in seinen Experimenten zum Obertonspektrum, also zur Klangfarbe, einsetzt. Überhaupt erinnert das Stumpfsche Röhrensystem und die in ihm erzeugten Interferenzen an die Energieübertragung im Schwarzen Körper.<sup>16)</sup>

Das Problem der akustischen/mechanischen Analogie besteht darin, dass Schwingungen linear erfolgen, also nicht als Modell für gequantelte Energieaufnahme dienen können. Deshalb kreisen Ehrenfests, Einsteins und Lorentz‘ Überlegungen darum, Grenzphänomene gleichförmiger Schwingungen zu konstruieren: „Ich erinnere mich einer Unterredung, die ich vor einiger Zeit mit Herrn Einstein hatte. Wir sprachen von einem einfachen Pendel, das man kürzen kann, indem man den Faden mit zwei Fingern anfasst und an ihm entlanggleitet. Falls das Pendel zu Beginn ein genau seiner Schwingungsdauer entsprechendes Energieelement hatte, so muss am Ende des Versuchs seine Energie offenbar kleiner sein als die eines der neuen Frequenz entsprechenden Energieelements.“<sup>17)</sup> Welcher akustische Hilfskörper ist der geeignete Kandidat, um diesen Quantensprung im Energieübertrag auszudrücken (*siehe Abb. 3*).

<sup>14)</sup> RAYLEIGH, *Scientific Papers*, Cambridge University Press, 6 Bde., 1899–1920. Bd. 2 (1900), S. 540.

<sup>15)</sup> EHRENFEST. *Collected Scientific Papers* (zit. Anm. 12), S. 464. RAYLEIGH, On the presence of vibrations. *Phil Mag* 3, 338, 1902. Einstein und Lorentz diskutieren zeitgleich die ‚adiabatische‘, also gequantelte Energieverminderung eines schwingenden Pendels durch kontinuierliche manuelle Verkürzung mit zwei Fingern. *Einstein Papers*, Bd. 3, *The Swiss Years: Writings 1909–1911*, S. 561.

<sup>16)</sup> Siehe JENS LOESCHER, The dilemma of an upright phenomenologist. *Carl Stumpf’s Legacy*, in: *Sudhoffs Archiv* 105 (2021/2), S. 206–226.

<sup>17)</sup> Lorentz in einer Diskussion im Rahmen der ersten Solvay-Konferenz im Jahr 1911. *Einstein Papers*, Bd. 3, *The Swiss Years: Writings 1909–1911*, S. 561.

368  
 Verteilung der Energie  
 über die Eigenschwing[ung] eines  
 Systems wenn fortwährend  
 konservative ganz unregel-  
 mäßige Störungen erfolgen

1. Stöpselmoleküle
2. Moleküle an Stab stoßend
3. aus mehreren Stücken  
zusammengesetzte  
Saite (das ist schon ganz  
die Plancksche Resonatorsache)
4. Lossteuern in allen [?]  
auf Complexionentheorie

*Abb. 3 (ENB, VI, 368. Wortergänzungen J. L.)*

In der Tat wäre die Saite (Nr. 3) ganz „die Plancksche Resonatorsache“, also linear schwingend, wenn sie nicht aus verschiedenen Stücken zusammengesetzt wäre. So fungiert dieser fiktive Hilfskörper als Veranschaulichung einer Energieaufnahme, die mehrere Frequenzen aufnimmt (entsprechend der Eigenfrequenzen der Saitenstücke). Die einzelnen Saitenfragmente schwingen linear, die gesamte Saite nicht. Dies entspräche einem ‚thermischen Ton‘, der mehrere Grundtöne innehat, einem Intervall, das einer (nicht-linearen) Schwingung entstammt – ein wahrhaft untertemperiertes Klavier.

## V.

### *„Papierner“ Hilfskörper*

In den Ehrenfest-Notizbüchern, etwa dem in Prag beim ersten Einstein-Besuch verfassten, fallen Skizzen von Räumlichkeiten in die Augen, auf die schon der Ehrenfest-Biograph Martin Klein aufmerksam gemacht hat. Auch Unterrichtstafeln werden wiederholt, ja durchgehend kommentiert und zum Teil gezeichnet. Wenn es um die Veranschaulichung von komplexen Sachverhalten geht, werden diese Alltags-Beschäftigungen zu einer papiernen Erkenntnis-Strategie in Form von ‚Tafeln‘. ‚Tafeln‘ sind räumliche Anordnungen auf dem Schriftträger, die die kognitive Funktion von Unterrichtstafeln ersetzen sollen. Die zugehörigen kognitiven Praktiken sind: Gegenüberstellung, Ergänzung, ‚Lückenhaftigkeit‘, Übertragung, ‚Notation‘, Modellierung (siehe *Abb. 4 und 5*).

400  
 Analogon zu Strahlungs-/  
 Thermodynamik  
 [Wärmestrahlung]  
 zwei Medien  
 -o-  
 Energieatome  
 -o-  
 Energiemoleküle  
 versch[iedener] Farbe  
 -o-  
 -o-  
 ebenso  
 ebenso  
 Umwandl[ung] durch Resonatoren  
 -o-  
 !!  
 (zurückrechnen aus einer  
 Energieverth[eilungs]formel)  
 -0-

*Abb. 4 (ENB, VI, 400.  
 Wortergänzungen J. L.)*

*Abb. 5 (ENB, VI, 401.  
 Wortergänzungen J. L.)*

[Substanz zwischen zwei Lösungs-  
 mitteln]  
 zwei Lösungsmittel  
 -o-  
 Atome eines Grundstoffs  
 -o-  
 Allotrope, Atomaggregate  
 -o-  
 Osmotischer Druck  
 Auswand=Einwand  
 Verwandlung-Rückverwandl[ung]  
 Umwand[lung] durch Hilfskörper  
 -o-  
 Molekularenergie  
 -o-  
 Wahrscheinlich 1 Aggregat –  
*[Seitenwechsel]*  
 Einzel- und Total-Entropie  
 -o-  
 Adiab[at]ische Compression  
 bei spurweiser  
 Anwesenheit des  
 Hilfskörpers  
 isotherme Compress[ion]  
 -o-  
 ?  
 ?!!  
 -o-  
 adiab[at]ische Compress[ion]  
 ohne Hilfskörper  
 -o-  
 Mittlere Kinet[ische] Energie  
 für alle Aggregate  
 dies[elbe]

Die abgebildete Tafel steht am Anfang der Beschäftigung Ehrenfests mit dem adiabatischen Prinzip. Eine rhetorische Figur, die Analogie zwischen Wärmestrahlung und der Thermodynamik von zwei Lösungsmitteln, wird hier als argumentativer Steinbruch genutzt – dies durchaus im Einklang mit antiken und scholastischen sowie naturphilosophischen Stoffsammlungen rhetorischer Provenienz. Offenbar werden auf diesen Tafeln (etwa ein Dutzend in den adiabatischen Notizbüchern) Konzepte verschiedener logischer Kategorien interpoliert, wobei die Zuordnung im Sinn von ‚Klasse‘ und ‚Instanz‘ durchaus maßgebend ist. Insofern bleibt die ‚ontologische‘ Ordnungsfunktion und Systematik rhetorischer *topoi* gewahrt. Jedoch: Die Funktion der Ehrenfest’schen Analogie-Tafeln besteht erkennbar darin, Lücken offen zu halten: den Transfer identischer Konzepte von einer Klasse zur anderen zu ermöglichen, also die Klassenzugehörigkeit von Instanzen zu verändern. Zweitens dienen die Tafeln und besonders die ‚papiernen‘ Puffer dazu, *Pendants* zu den Instanzen der jeweils anderen Klasse *nicht* zu spezifizieren. Dergestalt ist dieses Verfahren zwar an der Rhetorik angelehnt, aber eben nicht auf Vollständigkeit angelegt. Im Gegenteil: viel wichtiger als der Beweis ist die *Erprobung* der Analogie als Hilfsmittel und Test für die Argumentation.

### *Schluss*

Musik ist *per se* unanschaulich wie Mathematik und Quantenphysik. Anschaulichkeit entsteht durch einen komplexen kognitiven Prozess der räumlichen Modellierung. Entscheidend ist dabei das Arbeitsgedächtnis, das eine Vielzahl von Daten zu einer ‚Gestalt‘ zusammensetzt. Wir wissen aus Autobiographien (Poincaré, Hadamard), dass Mathematiker und Quantenphysiker derart kompositorisch arbeiten. Deshalb spielt Ehrenfest Klavier, bevor er sich weiter über eine Formel streitet. Der Punkt ist also nicht, dass Ehrenfest und Planck Eigenschwingungen thematisieren (diese sind in der Tat ein universelles Phänomen, das sowohl in mechanischen und akustischen Systemen als auch in optischen oder quantenphysikalischen auftritt), sondern dass sie akustische Metaphern benutzen (Saite, Resonator), um ‚gequantelte‘ Eigenschwingungen anschaulich zu machen.

