

636 *E.B.*: Ludwig Boltzmann. Mensch - Physiker - Philosoph, Franz
Deuticke, Wien 1955, 152 S. (Lizenzausgabe: VEB Deutscher Verlag
der Wissenschaften, Berlin 1957; Übersetzungen: japanisch und - in
gekürzter Form - russisch.
Digitalisiert mit freundlicher Genehmigung des Verlages.



30



7442

LUDWIG BOLTZMANN



7442



7442



Ludwig Boltzmann, 1902

LUDWIG BOLTZMANN

Mensch · Physiker · Philosoph

Von

Engelbert Broda

Professor am I. Chemischen Laboratorium der Universität Wien

Mit einem Geleitwort von

Hans Thirring

Professor für Theoretische Physik an der Universität Wien



7442

1955

Franz Deuticke Wien

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG UND
DES NACHDRUCKES — AUCH AUSZUGSWEISE — VORBEHALTEN.

COPYRIGHT 1955 BY FRANZ DEUTICKE WIEN

Verlags-Nr. 4257

Entwurf des Einbandes von A. v. Chmielowski, Wien

Druck: Manzsche Buchdruckerei, Wien IX

GELEITWORT

In einer Zeit, da das Wort Atom dem Zeitungsleser täglich entgegenspringt, kann sich der Laie kaum richtig vorstellen, wie schwer es die Pioniere der Atomphysik noch vor knapp mehr als einem halben Jahrhundert hatten, um der Auffassung von der atomistischen Struktur der Materie allgemeine Geltung zu verschaffen. Gewiß war der Gedanke, daß alle Körper aus Atomen bestehen, schon in der Antike entstanden, gewiß basierten die Vorstellungen über chemische Bindungsprozesse schon seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts auf den Begriffen der Atome und Moleküle, und schließlich hatte sich seit der Entdeckung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie die Vorstellung, daß Wärme nichts anderes sei, als eine dem Auge verborgene Molekularbewegung, in vieler Hinsicht ausgezeichnet bewährt. Trotz all dem gab es bis an die Schwelle unseres Jahrhunderts sehr ernst zu nehmende Forscher, die schwerwiegende Bedenken gegen die Atomistik überhaupt und besonders gegen die erwähnte molekularkinetische Theorie der Wärme vorbrachten.

Eines der Hauptargumente gegen die Theorie, daß Wärme nur die unsichtbare Bewegung der Moleküle sei, stützte sich auf einen grundsätzlichen Unterschied zwischen mechanischen und thermischen Vorgängen. Die ersteren sind umkehrbar; könnte man in irgend einem System von Körpern, die (wie z. B. in unserem Planetensystem) nur mechanischen Kräften unterliegen, mit einem Male alle Geschwindigkeiten in die entgegengesetzte Richtung drehen,

so würde ein solches System die ganze bisherige Bewegung nunmehr in umgekehrtem Sinn durchlaufen. Zum Unterschied davon sind die Wärmevorgänge irreversibel: bringt man einen wärmeren und einen kälteren Körper zur Berührung, so wird auf Kosten des heißeren der kältere Körper wärmer. Mit anderen Worten, die Wärme geht durch die Wärmeleitung von selbst immer in der Richtung vom wärmeren zum kälteren Körper über. Es kann nie geschehen, daß Wärme von selbst in entgegengesetzte Richtung strömt. Da also, so sagten die Gegner der mechanischen Auffassung der Wärme, die beiden Gebiete Mechanik und Wärme so fundamentale Unterschiede aufweisen — hie grundsätzliche Umkehrbarkeit, dort grundsätzliche Nichtumkehrbarkeit — so lassen sich die Wärmevorgänge nicht auf rein mechanistischem Wege erklären.

LUDWIG BOLTZMANN war nun derjenige, dem es gelungen ist, diesen schweren Einwand, der tief an den Lebensnerv der Atomphysik rührte, durch eine scharfsinnige Analyse zu entkräften und so durch die Wegräumung des Haupthemmnisses die Bahn frei zu machen für die weitere theoretische Entwicklung der Atomphysik. Unter dem Einfluß der neuen Entdeckungen auf experimentellem Gebiet, namentlich der Radioaktivität, setzte dann auch seit dem Beginn dieses Jahrhunderts der stürmische Fortschritt der Atomphysik ein, dessen Wellenschlag heute weit über das Gebiet der Fachwissenschaft hinaus fühlbar wird. BOLTZMANN'S Pionierleistung gipfelt in der Aufdeckung der Rolle, welche die Statistik bei mechanischen Vorgängen in Systemen spielt, die aus ungezählten Trillionen von Einzelteilchen bestehen. Seine Formel über den Zusammenhang zwischen dem thermodynamischen Begriff der Entropie und der statistischen Wahrscheinlichkeit eines Zustandes wird von den Physikern der ganzen Welt noch in einer fernen Zukunft mit Nutzen und Erfolg gebraucht werden, wenn die Taten der großen Eroberer von gestern und vorgestern schon längst in Vergessenheit geraten sein werden.

Daß BOLTZMANN nicht nur ein großer Physiker, sondern darüber hinaus einer der bedeutendsten Denker unseres Vaterlandes und ein liebenswerter Mensch voll Originalität und Witz war, mag aus diesem Buch hervorgehen, das von fachkundiger Hand und mit der nötigen Wärme und Begeisterung geschrieben, eine fühlbare Lücke in der Literatur ausfüllt.

HANS THIRING

Inhalt

	Seite
DER MENSCH	
Lebenslauf	3
Patriotismus	5
Akademischer Vortrag	9
Liebe zur Schönheit	14
Gütige Menschlichkeit	19
Humor	21
Naivität	24
Tragischer Tod	25
Anmerkungen	29
DER PHYSIKER	
Stellung zur klassischen Physik	33
Atomistik	36
Analytische Mechanik	43
Elektrizitätslehre	51
Kinetische Theorie der Materie	57
Statistische Mechanik	62
Wahrscheinlichkeit und Entropie	66
Schwankungserscheinungen und „Wärmetod“	74
Anmerkungen	83
DER PHILOSOPH	
Stellung zur Philosophie	87
Rolle der Theorie	93
Anschaulichkeit	99
Denkgesetze	104
Inhaltslose Fragestellungen	111
Realität der Außenwelt	114
Ethik	121
Persönliches Bekenntnis	129
Anmerkungen	134
NACHWORT	
Nachwort	137
Anmerkungen zum Nachwort	145
Nachweis der Schriften Boltzmanns	146
Sachverzeichnis	147
Namenverzeichnis	150

Der Mensch

LEBENS LAUF

Das äußere Leben Ludwig Boltzmanns, wohl des größten Denkers, den Österreich hervorgebracht hat, verlief ruhig. Von Kindheit an lebte er in gesicherten materiellen Verhältnissen. Im Gegensatz zu seinem verehrten Lehrer JOSEF STEFAN und zu seinem älteren, geliebten Freund JOSEF LOSCHMIDT mußte er sich nicht den schwierigen Weg aus der Armut des Dorfes auf die Hochschule bahnen. Weder mußte er wie der erstere im Krämergeschäft des Lesens unkundigen Eltern helfen, noch wie der letztere in seinen Jugendjahren das Vieh hüten und sich nachher als Hauslehrer und Fabrikangestellter fortbringen. Boltzmann hatte das außerordentliche Glück, sich schon als junger Mensch, aus einer Mittelstandsfamilie stammend und von einer aufopfernden Mutter gefördert, rückhaltlos seinen Studien widmen zu können.

Bei der Wiedergabe der Daten folgen wir hauptsächlich Boltzmanns Schülern GUSTAV JÄGER¹⁾ und LUDWIG FLAMM^{2) 3)}. Boltzmann wurde am 20. Februar 1844 auf der Landstraßer Hauptstraße in Wien als Sohn eines „Kaiserlichen Königlichen Cameral-Concipisten“, also eines Steuerbeamten, geboren. Sein aus Berlin zugezogener Großvater war jedoch Uhrenfabrikant gewesen. Die Mutter stammte aus Salzburg.

Die Familie übersiedelte bald nach Wels und später nach Linz, wo Ludwig die Mittelschule besuchte. Er war ein ehrgeiziger und eifriger Schüler — zu eifrig, wie er selbst später bedauernd meinte, indem er Strebertum ablehnte. Interesse an der Natur zeichnete

schon den Schüler aus, der Schmetterlinge sammelte und Pflanzen beobachtete. Im Alter von 15 Jahren verlor Boltzmann den Vater.

Schließlich studierte er an der Universität Wien Physik. PETZVAL, dem man im Bau von Linsen zur Photographie große Fortschritte verdankt, ANDREAS VON ETTINGSHAUSEN und vor allem STEFAN, an dessen Arbeiten über Strahlung Boltzmann später anknüpfte, gehörten zu seinen Lehrern. Die Promotion erfolgte 1866, die Habilitation als Privatdozent schon 1867. Nach zweijähriger Tätigkeit als Assistent STEFANS folgte Boltzmann einem Rufe als Professor der mathematischen Physik an die Universität Graz.

In den Jahren 1869 und 1871 verbrachte Boltzmann als Gast einige Monate zuerst bei BUNSEN und KÖNIGSBERGER in Heidelberg, dann bei KIRCHHOFF und HELMHOLTZ in Berlin. Nachdem er vorübergehend wieder an der Wiener Universität tätig war, nämlich von 1873 bis 1876 als Professor der Mathematik, kehrte er nach Graz zurück, wo er nun den Lehrstuhl für Experimentalphysik übernahm und diesmal längere Zeit blieb. Boltzmann war damals in der wissenschaftlichen Welt schon sehr bekannt, und begabte junge Leute, wie SVANTE ARRHENIUS und WALTHER NERNST, kamen Mitte der Achtzigerjahre nach Graz, um bei ihm zu studieren.

Die Universalität, mit der Boltzmann imstande war, Mathematik ebenso wie Experimentalphysik zu lehren, ist staunenswert. Aber im Jahre 1890 bot sich endlich eine befriedigende Möglichkeit zur Übernahme des Faches, das Boltzmanns Herzen am nächsten lag. Er erhielt eine Berufung an den Lehrstuhl für theoretische Physik der Universität München.

Im Jahre 1894 starb STEFAN, und Boltzmann wurde als sein Nachfolger Professor für theoretische Physik an der Universität seiner Heimatstadt. Hier blieb er mit einer Unterbrechung (1900 bis 1902), die er an der Universität Leipzig verbrachte, bis zu seinem Tode am 5. September 1906.

In Wien lehrte Boltzmann nicht nur Physik, sondern er übernahm im Jahre 1903 auch einen Lehrauftrag für „Methode und allgemeine

Theorie der Naturwissenschaften“, wo er gewissermaßen als Nachfolger ERNST MACHS, der den Lehrstuhl für „Geschichte und Theorie der exakten Wissenschaften“ innehatte, ein wöchentlich dreistündiges Kolleg über Fragen der Philosophie las.

Schon zu Lebzeiten wurde die Größe Boltzmanns anerkannt. Er wurde im In- und Auslande gewürdigt, zu vielen Gastvorträgen eingeladen, zum Mitglied von zahlreichen Akademien gewählt, in Oxford zum Ehrendoktor promoviert und mit Orden geschmückt. Zum 60. Geburtstag Boltzmanns vereinten sich 117 hervorragende Fachgenossen aus vielen Ländern — darunter auch aus Amerika, Australien, Japan und Rußland — unter der Redaktion STEFAN MEYERS zur Herausgabe einer Festschrift.

PATRIOTISMUS

Akademische Stellungen allerdings bekleidete Boltzmann, wie man gesehen hat, trotz verlockender Berufungen ins Ausland, und obwohl ihn enge Beziehungen mit ausländischen, besonders natürlich mit deutschen Kollegen verbanden, mit Ausnahme von sechs Jahren nur in Österreich. Zwar lebte er auch in München gerne, wo er liebe Freunde und ein gut eingerichtetes Laboratorium fand. Immerhin schrieb er von dort 1892 an LOSCHMIDT: „Als erste Neuigkeit mitteilen muß ich, daß ich noch lebe, und zwar hier jedenfalls nicht besser als im lieben Österreich.“⁴⁾ In Leipzig fühlte er sich gar nicht besonders wohl; dabei dürfte, obwohl Boltzmann den dortigen physikalischen Chemiker WILHELM OSTWALD zu seinen persönlichen Freunden zählte, wissenschaftliche und philosophische Gegnerschaft zu diesem streitbaren Mann eine Rolle gespielt haben. Außerdem hatte er Heimweh und sehnte sich nach den österreichischen Bergen⁵⁾; die sächsische Küche soll ihm auch nicht behagt haben!⁶⁾

Zur Übersiedlung nach Berlin entschloß sich Boltzmann nicht. Schon während seines Aufenthaltes als junger Wissenschaftler in Berlin irritierte ihn die preußische Strenge. Er erzählt darüber im Nachruf an STEFAN, dessen olympische Heiterkeit er pries: „Ein einziger Blick HELMHOLTZs klärte mich darüber (daß nämlich dem Lernenden Heiterkeit und Humor nicht ziemte) auf, als ich bei meinen späteren Arbeiten im Berliner Laboratorium am ersten Tage harmlos den gewohnten Ton anschlug. Als ich dann Herrn GLAN, damals Assistent, jetzt Professor, diesen Blick schilderte, erwiderte er stolz: Sie sind hier in Berlin!“

Im Jahre 1888 erging an Boltzmann der Ruf, den durch den Tod KIRCHHOFFS freigewordenen Lehrstuhl zu übernehmen, und die Ernennung war wirklich schon erfolgt. Dennoch ging Boltzmann nicht nach Berlin. Der Komponist WILHELM KIENZL⁷⁾, mit dem Boltzmann zu jener Zeit befreundet war, meint, er habe sich der gestellten Aufgabe nicht gewachsen gefühlt. Es wird aber auch berichtet, er habe sich nach Abschluß der Verhandlungen mit dem preußischen Unterrichtsministerium zurückgezogen, weil ihn beim folgenden Essen mit den Berliner Kollegen eine Bemerkung seiner Tischdame (Frau HELMHOLTZ) irritierte, die sich auf seinen Mangel an Förmlichkeit bezog: „Herr Professor, ich fürchte, Sie werden sich in Berlin nicht wohlfühlen!“⁸⁾ (Später bedauerte Boltzmann allerdings lebhaft, auf den großen Berliner Wirkungskreis verzichtet zu haben⁹⁾. Den Lehrstuhl KIRCHHOFFS nahm dann unmittelbar PLANCK und später SCHRÖDINGER ein.)

Boltzmann hing in der Tat mit Liebe an seinem Vaterland Österreich. Es erfüllte ihn mit Stolz, wenn er österreichische Einrichtungen loben konnte, beispielsweise den guten physikalischen Studienplan an den Gymnasien. Mit Freude erwähnt er die Anerkennung MAXWELLS für den österreichischen naturwissenschaftlichen Unterricht in dessen Brief an LOSCHMIDT¹⁰⁾. Gleichzeitig aber stand er als wahrer Patriot den traditionellen Schwächen Österreichs durchaus kritisch gegenüber. So sagte er gesprächsweise, einem österreichischen

Ministerium dürfe man gar nicht verraten, wie gute Arbeiten sich auch mit geringen Hilfsmitteln machen lassen¹¹⁾. Bei einem Besuch in LOSCHMIDTS überaus bescheidener Wohnung nach dessen Pensionierung konnte er den schmerzlichen Ausruf nicht unterdrücken: „So beherbergt Wien seine großen Männer!“

Die Schwächen Österreichs ergaben sich keineswegs bloß aus der Unzulänglichkeit der Behörden. So klagt Boltzmann im Nachruf auf LOSCHMIDT: „Wir Österreicher sind doch sonderbare Leute. Wenn einer von uns etwas recht Großes leistet, so genießen wir uns förmlich, wir getrauen uns gar nicht recht, es öffentlich zu sagen. So riet noch unlängst ein Kollege, die LOSCHMIDT-Feier auf einen möglichst intimen Kreis zu beschränken. Andere Menschen sind da ganz anders ... Wenn auf der einen Seite wir uns fast fürchten, unsere großen Männer zu feiern, so haben diese manchenmal in nicht minderem Grade eine Scheu, Anerkennung zu finden. Ich habe dies schon vor vier Jahren als eine Charaktereigentümlichkeit unseres dahingegangenen Kollegen STEFAN bezeichnet, die ich nicht billigen konnte. Sie raubt nicht nur dem, der sich ihr hingibt, manche Lebensfreude, sie hemmt auch seinen Kontakt mit der übrigen wissenschaftlichen Welt und schmälert dadurch die Erfolge seiner wissenschaftlichen Tätigkeit; wer gleichmäßig nach großen Leistungen und äußerer Anerkennung strebt, erscheint daher als der vollkommene, bessere“

Seinem tiefen kritischen Patriotismus hat Boltzmann wohl am schönsten im Nachruf an STEFAN Worte verliehen: „Als ich vor zwei Jahren in Oxford in einer Gesellschaft auf das Unglücksjahr 1866 zu sprechen kam, glaubte mir einer der Anwesenden ein Kompliment zu machen, indem er sagte, die Österreicher waren zu gut, um zu siegen. Diese Güte und Selbstgenügsamkeit werden wir uns abgewöhnen müssen. Aber da heute Schlichtheit und Bedürfnislosigkeit immer mehr aus der Welt entschwinden, so müssen wir uns Glück wünschen, daß gerade Österreich wie einst so noch heute Männer besitzt, deren einziger Fehler ein Übermaß dieser Tugenden

ist, und mit dem höchsten Vorbilde der Genügsamkeit und Heiterkeit, mit unserem MOZART, wollen wir ausrufen:

„In unsern heiligen Mauern,
Wo der Mensch den Menschen liebt,
Kann kein Verräter lauern,
Weil man dem Feind vergibt.“

Wen solche Lehren, wen die Beispiele solcher Männer nicht erfreuen, der verdient nicht, ein Mensch, verdient nicht ein Österreicher zu sein.“

Besonders wohl fühlte sich Boltzmann, den KIENZL als großen Naturfreund bezeichnet, in Graz, von wo er daher auch später nur ungern schied. Er kaufte auch auf der „Platte“ in Oberkroisbach bei Graz ein hochgelegenes Bauerngut, das eine schöne Fernsicht bot und das er zu einem Landhaus ausgestaltete.

Durchaus den besten österreichischen Traditionen entsprach die Weltoffenheit Boltzmanns. Dreimal besuchte er Amerika, was zu jener Zeit durchaus ungewöhnlich war. Die Frucht einer dieser Reisen ist die prächtig-humorvolle Reiseschilderung *Reise eines deutschen Professors ins Eldorado*. Im Nachruf auf STEFAN verurteilte er ausdrücklich, daß weder dieser noch der unglückliche LOSCHMIDT jemals eine Reise außerhalb des österreichischen Vaterlandes gemacht haben. „Ich kann dies nicht billigen; ich glaube, daß sie bei geringerer Abgeschlossenheit noch mehr hätten leisten können. Wenigstens hätten sie ihre Leistungen rascher bekannt und daher fruchtbringender gemacht.“

Mit Boltzmanns Weltoffenheit und Toleranz fremden Wesens steht auch im Einklang, daß er die Krawalle nationalistischer Studenten an der Wiener Universität durchaus verurteilte, die die vom Ministerpräsidenten Grafen BADENI angestrebte Versöhnung mit den Tschechen vereiteln wollten¹²⁾. Unterdrückung war Boltzmann überhaupt zuwider, und so ist es auch natürlich, daß er republi-

kanische Gedanken hegte (siehe S. 131). Mit Wohlgefallen zitiert er in seiner amerikanischen Reisebeschreibung SCHILLER: „Noch ein paar tausend solcher Kerle wie ich, und aus Deutschland soll eine Republik werden, gegen die Rom und Sparta Nonnenklöster waren ... Die Freiheit brütet Kolosse aus.“

AKADEMISCHER VORTRAG

Der akademische Vortrag Boltzmanns wird als „kristallklar“ bezeichnet¹³⁾. STEFAN MEYER äußert sich, daß „selten mit so enormem Wissen so hervorragende Lehrfähigkeit gepaart war“¹⁴⁾. Nach L. FLAMM²⁾ war Boltzmanns Ausdrucksweise lebhaft, klar und fesselnd, witzig und humorvoll, und häufig auch von anregenden Anekdoten begleitet. Oft war er schalkhaft und manchmal auch derb-bissig.

Boltzmann kündigte in seiner ersten Wiener Periode (1868—1870) Vorlesungen über Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie, Elastizitätslehre, mathematische Theorie der Akustik und mathematische Theorie der Kapillarität, in der zweiten Periode (1874—1877) über Theorie der Differentialrechnung, mechanische Wärmetheorie, Differential- und Integralrechnung, Zahlentheorie, ausgewählte Kapitel aus der höheren Analysis, analytische Geometrie und Funktionenlehre an. In der dritten Periode (1894—1900) folgten analytische Mechanik, Gastheorie, Theorie der Elektrizität und des Magnetismus, Optik und Akustik sowie Wärmelehre, in der letzten Periode außerdem „Ausgewählte Kapitel aus der Naturphilosophie“. Für das Wintersemester 1906/07 war noch „Elastizitätslehre und Hydrodynamik“ angekündigt. Wahrhaft ein Programm, dessen Umfang von Boltzmanns Arbeitskraft Zeugnis legt!

LISE MEITNER, die seine Vorlesungen von 1902 bis 1905 hörte¹¹⁾, berichtet: „Er war ein guter Vortragender, in meiner Erinnerung

sind seine Vorlesungen die schönsten und anregendsten, die ich jemals gehört habe. Er las einen vierjährigen Kurs, Mechanik, Hydro-mechanik und Elastizitätslehre, Elektrizität und Magnetismus, kinetische Gastheorie. Er hatte eine sehr große Tafel in der Mitte, auf die er alle Hauptrechnungen schrieb, und zwei an den Seiten angebrachte Tafeln, wohin die Nebenrechnungen kamen. Alles sehr übersichtlich und klar geschrieben, so daß ich damals oft dachte, man könnte an Hand der Tafeln die ganze Vorlesung rekonstruieren. Er war selbst von allem, was er uns lehrte, so begeistert, daß man aus jeder Vorlesung mit dem Gefühl wegging, es werde einem eine ganz neue und wunderbare Welt eröffnet. Er liebte es auch, persönliche Bemerkungen in seine Vorlesungen einzuflechten.“

Der hervorragende Metallurg FRANZ SKAUPY hat Boltzmanns Vorlesungen von 1902 bis 1904 gehört und erzählt¹⁵⁾: „In einem nicht sehr großen Raum, dessen Sitze ziemlich steil gegen den Katheder abfielen, waren zwei sehr lange Tafeln aufgestellt, eine rechts und eine links, vielleicht sogar noch eine in der Mitte. Auf diesen Tafeln, bei der linken beginnend, pflegte Boltzmann in der ersten Viertelstunde seiner Vorlesung, die er regelmäßig mit einem im hohen Ton ausgesprochenen ‚Nun, wir haben usw. . . .‘ begann, alle Entwicklungen der vorhergehenden Stunde außerordentlich schön und klar geordnet aufzuschreiben, so daß auch Einer, der etwa gefehlt hatte, sich mit dem Weiteren zurechtfinden konnte. Dann begann die eigentliche neue Vorlesung, in der der restliche Teil der linken Tafel und dann die rechte Tafel langsam und verständlich mit neuen Formeln beschrieben wurden. Wenn einer der Hörer, sagen wir zehn Minuten, an etwas anderes gedacht hatte, konnte er trotzdem durch Ablesen des bisher Geschriebenen mitkommen, so wohlüberlegt war alles auf der Tafel angeordnet. Der Saal war wohl immer voll besetzt, zumal offenbar nicht nur Physiker, sondern z. B. auch Chemiker, wie etwa ich, die Vorlesung hörten. Einer der Schüler, ich glaube, er hieß EHRENFEST¹⁶⁾, berichtete über irgendwelche Arbeiten, und benutzte die Gelegenheit, die Arbeiten Boltzmanns

in einer Vollständigkeit zu zitieren, derart, daß Boltzmann immer stärker schmunzelte und schließlich sagte: „Wenn ich bloß meine Arbeiten so gut kennen würde!“

Boltzmann scheute sich auch durchaus nicht, sich bei der Vorlesung mit den Worten „Ach, da habe ich eine Dummheit gemacht!“ selbst zu korrigieren. In seinem Bestreben, seine Vorlesungen und Vorträge möglichst lebendig und daher auch lehrreich zu gestalten, verwandelte er sie gelegentlich in eine Debatte. So holte sich Boltzmann als Diskussionsgegner in der Philosophie den glänzenden Redner FRIEDRICH JODL¹²⁾. Übrigens erregte Boltzmanns Vorlesung über Naturphilosophie, wie SKAUPY und FLAMM sich erinnern, großes Aufsehen; seine Antrittsvorlesung hatte außerordentlichen Zulauf. „Obwohl man den allergrößten Saal, der sich auftreiben ließ, für die erste Vorlesung genommen hatte, konnten doch Viele nicht teilnehmen, und das Ganze machte den Eindruck eines durch die lebhaften Äußerungen der Presse hervorgerufenen Rummels; alle Sensationslüsternen, ob sie nun Verständnis hatten oder nicht, wollten dabei sein.“^{15, 37)} Die Hörerzahl hat 600 betragen¹⁷⁾.

Vorlesungsexperimente wurden mit dem Assistenten auf das Gründlichste vorbereitet, wobei Boltzmann sich vom Hörsaal aus die Überzeugung verschaffte, daß der Verlauf der Erscheinung von jedem Hörer genau und in allen Einzelheiten verfolgt werden konnte. Alles dekorative Beiwerk wurde entfernt, da nur volle Klarheit zum Verständnis der Wahrheit führe. „Boltzmann war der geborene akademische Lehrer.“¹⁸⁾

Den Geist, in dem Boltzmann seine Vorlesungen hielt und in dem er Beziehung zu seinen Hörern suchte, erkennt man so recht aus den Schlußworten seiner zweiten Antrittsvorlesung *Über die Prinzipien der Mechanik* (Wien 1902):

„Entschuldigen Sie, wenn ich von alledem (verwickelte Lehrsätze, auf das höchste verfeinerte Begriffe, komplizierte Beweise) heute noch wenig geleistet habe . . . Ich denke, daß wir später im Verlauf der Arbeit besser darüber klar werden. Heute wollte ich Ihnen viel-

mehr nur ein Geringes bieten, für mich freilich auch wiederum Alles, was ich habe, mich selbst, meine ganze Denk- und Empfindungsweise.“

„Ebenso werde ich auch im Verlauf der Vorlesungen von Ihnen gar Mannigfaltiges fordern müssen: Angestrengte Aufmerksamkeit, eisernen Fleiß, unermüdliche Willenskraft. Aber verzeihen Sie mir, wenn ich, ehe ich an dieses alles gehe, Sie für mich um etwas bitte, woran mir am meisten gelegen ist, um Ihr Vertrauen, Ihre Zuneigung, Ihre Liebe, mit einem Wort, um das Höchste, was Sie zu geben vermögen, Sie selbst.“

Auch an Diskussionen nahm Boltzmann in temperamentvoller Weise teil. „Unvergeßlich wird es uns immer sein, wie gern und wie oft Boltzmann in seiner ursprünglich kräftigen Weise, stets die Sache durchblickend, in die Diskussionen eingriff . . . Seine markige, durch das Wissen und die Persönlichkeit imponierende Erscheinung war stets Gegenstand des Interesses in unserem Kreise.“¹⁹⁾ Der Präsident der Accademia dei Lincei nennt Boltzmann in seinem Nachruf „notevolissimo polemista, molto temuto nei congressi“²⁰⁾. A. SOMMERFELD²¹⁾ schreibt über Boltzmanns Auftreten in der „dramatischen“ Diskussion über die „Energetik“ (siehe S. 38 und 50) auf der Naturforschertagung Lübeck 1895: „Das Referat für die Energetik hatte HELM-Dresden; hinter ihm stand WILHELM OSTWALD, hinter beiden die Naturphilosophie des nicht anwesenden ERNST MACH. Der Opponent war Boltzmann, sekundiert von FELIX KLEIN. Der Kampf zwischen Boltzmann und OSTWALD glich, äußerlich und innerlich, dem Kampf des Stiers mit dem geschmeidigen Fechter. Aber der Stier besiegte diesmal den Torero trotz aller seiner Fechtkunst. Die Argumente Boltzmanns schlugen durch. Wir damals jüngeren Mathematiker standen alle auf der Seite Boltzmanns . . .“

Nicht weniger lebhaft als Boltzmanns Vorträge waren seine Schriften. In seiner großen Gedächtnisrede für Boltzmann sagt der hervorragende Holländer H. A. LORENTZ²²⁾: „In vielen von diesen (Schriften) redet er zu uns, wie wohl selten ein Physiker es getan hat,

und offenbart uns seine ganze Denk- und Empfindungsweise in Worten, die ihn auch unserem Herzen näher bringen . . . Hier macht er uns zu Teilgenossen seiner Zweifel und seiner Freuden, hier fesselt er uns durch tiefen, ernsten Sinn und leichten Scherz, hier reißt er uns hin, bald durch seine konsequent durchgeführte, mechanische Naturbetrachtung, bald durch seinen begeisterten Idealismus, der ihn dazu trieb, seine Werke mit so manchem Dichterwort zu schmücken . . . An Gegensätzen, die er sich nicht scheut, klar, oft grell sogar hervortreten zu lassen, fehlt es nicht in dem selbstgemalten Bilde; jedoch wir fühlen, daß sie nicht unversöhnlich sind, sondern einer gewissen Wurzel im Innersten seines Wesens entspringen, und so vertiefen sie den Einblick, den er uns in seinen Geist gestattet.“

Über das Verhältnis Boltzmanns einerseits zur Theorie, andererseits zum Experiment urteilt LORENTZ: „Boltzmann hat in den ersten Jahren seiner Laufbahn auf experimentellem Gebiet Schönes und Wichtiges geleistet und oft hat er in beredter Weise das Lob der Experimentalphysik verkündet. Bisweilen schien er sie fast um die Zuverlässigkeit ihrer Resultate und um ihre gleichmäßig fortschreitende Entwicklung zu beneiden. Jedoch im Grunde seines Herzens war er Theoretiker; er liebte es, dies im Ernst und Scherz nachdrücklich zu betonen, und hat nie aufgehört, die Weiterführung der Theorie, die Klarheit und Sicherung ihrer Grundlagen als seine Lebensaufgabe zu bezeichnen.“ „Die Idee“, sagte er selbst, „welche mein Sinnen und Wirken erfüllt, ist der Ausbau der Theorie.“

Im Einklang mit Boltzmanns Bestreben, seine Theorien in der Praxis bewährt zu sehen, steht dabei, daß er „trotz ungewöhnlicher mathematischer Begabung mathematische Probleme nie um ihrer selbst willen“, sondern stets im Hinblick auf eine Anwendung behandelte²³⁾. „Die Welt, die den Theoretiker Boltzmann fesselte, war bis zuletzt nicht die Welt, in der die Gedanken bei einander wohnen, sondern die Welt, in der sich die Sachen stoßen . . . Nicht dunkle Punkte zu verschleiern, sondern zu betonen, war seine Art.

Er führte lieber die weitläufigsten Rechnungen durch, als daß er ohne Not eine physikalisch unplausible Erklärung zuließ.“²³⁾

So ist es auch sehr leicht verständlich, daß Boltzmann gern selbst Hand anlegte, um rasch eine geeignete Vorrichtung für einen Versuch zu erhalten¹⁸⁾. ERNST MACH, selbst ein hervorragender Experimentalphysiker, nennt Boltzmann einen „kaum zu übertreffenden Experimentator“²⁴⁾. Die Neigung zum Experiment und zur Praxis blieb stets bestehen. Boltzmann experimentierte auf der Hochschule über den Schall, über das Licht und andere elektromagnetische Schwingungen, über die Elektrizität und die Elastizität. Auf technischem Gebiet interessierte er sich für Luftschiffe „schwerer als die Luft“, also für Flugzeuge, und hielt auch einen vielbeachteten Vortrag über das Thema, wobei er das Modell von WILHELM KRESS vorführte. Im privaten Leben befaßte er sich gerne mit den elektrischen Einrichtungen im Haushalt und konstruierte seiner Frau eine elektrische Nähmaschine — damals noch kein Handelsartikel.

LIEBE ZUR SCHÖNHEIT

„Eine ideale Schilderung Boltzmanns, oder, wenn Sie wollen, eine Schilderung des idealen Boltzmann existiert bereits. Sie ist zwischen den Zeilen der drei Gedenkreden zu lesen, die Boltzmann seinen Lehrern und Freunden STEFAN und LOSCHMIDT gehalten hat. Spricht Jemand über Leute, die er sehr verehrt, so verrät er ja meistens viel von seinem eigenen inwendigen Menschen.“²⁵⁾

Ein anschauliches Bild der Persönlichkeit Boltzmanns, wie sie Anderen als Fachgenossen erschien, verdanken wir KIENZL: „Eine höchst originelle Erscheinung war der große Physiker L. Boltzmann, der schon als junger Mann in meinem Elternhause (dem Hause des Bürgermeisters von Graz. E. B.) verkehrte, wo er auch seine spätere

Gattin, die Studentin der Mathematik HENRIETTE VON AIGENTLER, kennenlernte.“

„Er war der Prototyp eines weltunläufigen Gelehrten, ganz im Reich seiner Wissenschaft und seiner bahnbrechenden Forschung lebend, nebenbei auch Musik mit Vorliebe pflegend. Ein großgewachsener, starker Mann mit kräftigem Schädelbau, sehr kurzsichtig, daher bebrillt, mit kleingelocktem braunem Haupthaar, das von einem Vollbart umrahmte breite Gesicht stark gerötet, stets in etwas gebückter Körperhaltung.“

„Er verfügte über ein hohes Maß allgemeiner Bildung, was der auffallenden kindlichen Naivität seines Wesens keinerlei Eintrag tat, wie das bei konzentrierten, sich in hohen Sphären bewegenden Geistern oft vorkommt.“

Die Musik und überhaupt die Kunst spielte tatsächlich im Leben Boltzmanns eine besondere Rolle. In Linz hatte er bei ANTON BRUCKNER Musikstunden genommen²³⁾. In Wien gab es in seinem Hause allwöchentlich Kammermusik, wobei Boltzmann selbst das Klavier spielte. Die Familie hatte auch in der Oper ebenso wie im Burgtheater ihre Stammsitze²⁵⁾. In Boltzmanns populären Schriften kommen Hinweise auf die Musik häufig vor. Schon im „forwort“ zur Gesamtausgabe seiner *Populären Schriften* (dieses Vorwort ist Spaßes halber in einer übermodernen Rechtschreibung abgefaßt) bekennt sich Boltzmann ebenso zu BEETHOVEN wie zu seinem Lieblingsdichter SCHILLER. Unter Beziehung auf die Widmung: „Den Manen Schillers, des unübertroffenen Meisters der naturwahren Schilderung echter, aus tiefstem Herzen kommender Begeisterung gewidmet hundert Jahre nach dessen Eingang in die Unsterblichkeit“ heißt es da: „di forangestellte widmung ist keine frase, ich danke den werken göthes, dessen faust fileicht das grösste aller kunstwerke ist, und dem ich di mottos meiner ersten bücher entnommen, shakespeares etc. die höchste geistige erhebung; aber bei schiller ist es etwas anders, durch schiller bin ich geworden, one in könnte es einen mann mit gleicher bart- und nasenform wi ich, aber nimals mich geben.“

„wenn ein zweiter einen einfluss von gleicher grössenordnung auf mich ausgeübt hat, so ist es beethoven. aber ist es nicht charakteristisch, dass letzterer in seinem grössten werke zum schlusse schillern, und zwar nicht dem ausgereiften, sondern dem in jugendlicher begeisterung sprudelnden schiller das wort erteilt?“ Das Bekenntnis des alternden Boltzmann zum jugendlichen SCHILLER und zu BEETHOVEN ist so recht der Ausdruck der unermüdlichen kämpferischen Geistesart des großen Physikers.

Gerne kommt Boltzmann auch auf Faust — eben „das größte aller Kunstwerke“ — zu sprechen. „Wie Faust dem Weltgeist, so steht der Sterbliche zitternd der abstrakten Wissenschaft gegenüber.“⁽²⁶⁾ Als Boltzmann Naturphilosophie lehren soll und nicht weiß, wo das Licht in den philosophischen Fragen zu finden ist, meint er von sich, daß er in einer „wahren Faust-Stimmung“ lebt. Dieser sagt ja auch: „Ich soll lehren mit saurem Schweiß, was ich selbst nicht weiß.“ Das gleiche Zitat wird den Vorlesungen über Elektrizitätslehre vorangestellt. Auch HOMER wurde sehr geschätzt und gern zitiert^(11, 27). Einmal schloß er seine Vorlesung über Röntgenstrahlen mit den Worten: „KAINZ als Carlos ist ganz wunderbar.“⁽²⁸⁾ Dagegen macht sich Boltzmann in großer Ausführlichkeit über die absurde Pedanterie lustig, mit der SCHOPENHAUER die Künste einteilen und ihnen Rechte zuweisen will.

Die Schönheit wurde keineswegs nur außerhalb der wissenschaftlichen Tätigkeit geschätzt. Obwohl Boltzmann der Autor des berühmten Wortes ist, man möge doch Eleganz Sache der Schuster und Schneider sein lassen, schätzte er doch die Schönheit der Theorie sehr. Im Nachruf auf KIRCHHOFF sprach Boltzmann sich über diese Frage aus: „Gerade unter den zuletzt erwähnten Abhandlungen KIRCHHOFFS sind einige von ungewöhnlicher Schönheit. Schönheit, höre ich Sie da fragen; entfliehen nicht die Grazien, wo Integrale die Hälse recken, kann etwas schön sein, wo dem Autor auch zur kleinsten äußeren Ausschmückung die Zeit fehlt? Doch — ... wie der Musiker bei den ersten Takten MOZART, BEETHOVEN, SCHUBERT

erkennt, so würde der Mathematiker nach wenigen Seiten seinen CAUCHY, GAUSS, JACOBI, HELMHOLTZ unterscheiden. Höchste äußere Eleganz, mitunter etwas schwaches Knochengerüst der Schlüsse charakterisiert die Franzosen, die größte dramatische Wucht die Engländer, vor allen MAXWELL. Wer kennt nicht seine dynamische Gastheorie? Zuerst entwickeln sich majestätisch die Variationen der Geschwindigkeiten, dann setzen von der einen Seite die Zustandsgleichungen, von der andern die Gleichungen der Zentralbewegung ein, immer höher wogt das Chaos der Formeln; plötzlich ertönen die vier Worte: „Put $n = 5$.“ Der böse Dämon V 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 Programm-Musiker, der über die Noten deren Erklärung setzen muß. Gefügig speien nun die Formeln Resultat auf Resultat aus, bis überraschend als Schlußeffekt noch das Wärme-gleichgewicht eines schweren Gases gewonnen wird und der Vorhang sinkt. ... KIRCHHOFF selbst schrieb nie über Gastheorie. Seine ganze Richtung war eine andere, und ebenso auch deren treues Abbild, die Form seiner Darstellung, welche wir neben der EULERS, GAUSS', NEUMANN'S usw. wohl als Prototyp der deutschen Behandlungsweise mathematisch-physikalischer Probleme hinstellen berechtigt sind. Ihn charakterisiert die schärfste Präzisierung der Hypothesen, feine Durchfeilung, ruhige, mehr epische Fortentwicklung mit eiserner Konsequenz ohne Verschweigung irgendeiner Schwierigkeit, unter Aufhellung des leisesten Schattens. Um nochmals zu meiner Allegorie zurückzugreifen, er glich dem Denker in Tönen: BEETHOVEN. Wer in Zweifel zieht, daß mathematische Werke künstlerisch schön sein können, der lese seine Abhandlung über Absorption und Emission oder den der Hydrodynamik gewidmeten Abschnitt seiner Mechanik.“

Die Schönheit ergriff Boltzmann mit höchster Intensität. „Ich

lachte einmal, als ich las, daß ein Maler nach einer einzigen Farbe Tage und Nächte suchte; jetzt lache ich nicht mehr darüber“, schrieb er auf seiner Reise über den Ozean. „Ich habe beim Anblick dieser Farbe des Meeres geweint; wie kann uns eine bloße Farbe weinen machen? Dann wieder Mondesglanz oder Meerleuchten in pechschwarzer Nacht . . . Wenn eines unserer Bewunderung noch mehr wert sein kann als diese Naturschönheit, so ist es die Kunst des Menschen, welcher in dem seit den Zeiten der Phönizier und noch viel länger geführten Kampf mit diesem unendlichen Meer so vollständig siegte . . . Fürwahr, das höchste Wunder der Natur, das ist der kunstfertige Geist des Menschen! Wenn ich, wie einst SOLON, um den Glücklichsten der Sterblichen gefragt würde, ich würde ohne Zögern KOLUMBUS nennen. Nicht als ob nicht andere Entdeckungen der seinen gleichkämen, schon die des Deutschen GUTENBERG. Aber das Glück ist mitbedingt durch die sinnliche Wirkung, und die muß bei KOLUMBUS am höchsten gewesen sein!“

Der Geist des KOLUMBUS wird übrigens auch im Vortrag über *Luftschiffahrt* heraufbeschworen. „Der Erfinder des lenkbaren Luftschiffs muß hierin (in Mut und List) dem Muster aller großen Entdecker, CHRISTOPH KOLUMBUS, gleichen, der ebenso durch persönlichen Mut wie durch Scharfsinn allen Entdeckern der Zukunft das Beispiel gab. ‚Setzest du nicht das Leben ein, nie wird dir das Leben gewonnen sein!‘ Mag daher auch Mancher, durch die zahllosen Wunder der Technik unseres Jahrhunderts nicht belehrt, über die Flugversuche spotten; wir wollen die Worte beherzigen, die der idealste Dichter dem größten Entdecker zurief:

Zieh hin, mutiger Segler, mag auch der Witz dich verhöhnen,
Mag der Schiffer am Steuer senken die mutlose Hand,
Immer, immer nach West, dort muß die Küste sich zeigen,
Liegt sie doch schimmernd und liegt deutlich vor deinem Verstand.
Mit dem Genius steht die Natur in ewigem Bunde.
Was der eine verspricht, leistet die andre gewiß.

Außer der Überlegung und Begeisterung ist nur noch eines nötig, was auch KOLUMBUS am schwierigsten erlangte, Geld.“

GÜTIGE MENSCHLICHKEIT

Boltzmann war von „unerschöpflicher Liebenswürdigkeit“ und „glücklich, wenn er Jemandem gefällig sein konnte“⁽²⁹⁾; er war, wie LISE MEITNER mitteilt, „voll Herzensgüte, Glaube an Ideale und Ehrfurcht gegenüber den Wundern der Naturgesetzlichkeit“⁽¹¹⁾. Sein gütiges Verhalten zu den Studenten wird allgemein hervorgehoben. Jedenfalls in späteren Jahren ließ Boltzmann Niemanden „durchfallen“^(1. 14). „Sein Verhältnis zu den Studenten war sehr menschlich betont. Er hat sich sicher Jeden, der etwa beim Semesterschluß bei ihm kolloquierte, nicht nur auf dessen physikalisches Können angesehen, sondern auch versucht, hinter seine allgemeinen Charaktereigenschaften zu kommen. Äußere Formen haben ihm gar nichts bedeutet, und er hat keine Scheu gehabt, gefühlsbetonte Worte zu gebrauchen. Die paar Studenten, die an dem fortgeschrittenen Seminar teilnahmen, hat er von Zeit zu Zeit in sein Haus eingeladen. Dann hat er uns vorgespielt — er war ein sehr guter Klavierspieler — und allerlei persönliche Erlebnisse erzählt.“⁽¹¹⁾

Boltzmanns Schüler und unmittelbarer Nachfolger FRITZ HASENÖHRL sagte⁽²⁹⁾: „Die Erfolge des Forschers bedingen Begabung und Verstand, der Lehrer muß das Herz am rechten Fleck haben. Die Fähigkeit, sich in den Lernenden hineinzudenken, das Interesse an seiner Entwicklung, Wohlwollen und Zuneigung, mit einem Wort, ein menschenfreundliches Herz, das charakterisiert den guten Lehrer — im Elementarunterricht wie auf der Hochschule. Das waren die Eigenschaften, die aus Boltzmann einen glänzenden Lehrer machten und die ihm die unvergängliche Dankbarkeit seiner zahlreichen Schüler sichern.“

„Die Art, wie Boltzmann mit seinen Hörern verkehrte, ist unauslöschlich in deren Erinnerung geblieben. Niemals betonte er seine Überlegenheit; Jedem stand es frei, an ihn mit Fragen, ja auch mit Kritik heranzutreten. Ein ungezwungenes Gespräch entwickelte sich wie unter Gleichstehenden und oft merkte man erst nachträglich, wieviel man wieder von ihm gelernt hatte. Seine eigene Größe war nicht der Maßstab, den er an Andere anlegte. Wohlwollend beurteilte er auch bescheidenere Leistungen, wenn sie nur von ernster, redlicher Arbeit zeugten.“

Boltzmanns Grazer Kollege F. STREINTZ schreibt: „Der Verkehr zwischen dem Meister und den Schülern der Forschung war ein überaus reger und herzlicher. Boltzmann nahm den wärmsten Anteil an allen Arbeiten. In jeder schwierigen Situation wußte er Rat; dabei nahm er es niemals krumm, wenn man ihn in seiner Wohnung bei eigener Arbeit überfiel und um Führung bat aus irgendeinem Labyrinth, in das man plötzlich geraten war. Stundenlang stand der schlichte große Mann Jedem zur Verfügung, stets mit unversiegbarer Geduld und köstlichem Humor ausgerüstet.“¹⁸⁾

Boltzmann war überhaupt ein geselliger Mensch und liebte es, Freunde um sich zu haben. Unter den Wissenschaftlern gehörten zu seinen Freunden außer den engeren Kollegen der Physikochemiker WILHELM OSTWALD (trotz wissenschaftlicher und philosophischer Gegnerschaft³⁰⁾, der Biologe JACQUES LOEB und der Physiker WALTHER NERNST, sein Grazer Schüler. An NERNST schrieb Boltzmann nach der Erfindung der „Nernst-Lampe“ — „spröde“ seltene Erden als Glühkörper enthaltend — auf einen Lampenschirm, der 1907 von MACHE in Boltzmanns Wohnung aufgefunden wurde, die Zeilen:

Da Du den sprödesten Stoff Dir gewählt
Und ihn zwangst, den elektrischen Strom zu leiten,
Schufst Du das glänzendste Licht.

„Durch seine sprudelnde Mitteilsamkeit und Schlagfertigkeit, durch seine geistvollen, lustigen Einfälle wurde er in jedem Gesell-

schaftskreis von Damen und Herren sehr bald Mittelpunkt und er beherrschte die Unterhaltung.“²³⁾

An Kindern hatte Boltzmann große Freude, und er beschäftigte sich gern mit ihnen. Bei den Hausbällen, die er seinen drei Töchtern gab, spielte er manchmal selbst zum Tanz auf⁶⁾. Seine jüngste Tochter erzählt, daß sie einmal mit ihrem Vater an einer Tierhandlung vorbeiging und den Wunsch nach zwei Häschen aussprach. Die Mutter wollte zunächst diese unreinlichen Tiere nicht im Hause haben. Aber der Vater kaufte sie doch und baute ihnen mit eigenen Händen in seinem Arbeitszimmer, wo er als unumschränkter Herr galt, ein Haus, so daß sich die Tiere dort tummeln konnten²⁵⁾.

Obgleich Boltzmann ein äußerst intensiver Arbeiter war, der gelegentlich auch tagelang im Institut blieb und sich früh zur Arbeit erhob, fand er doch Zeit für körperliche Betätigung. Vor der Arbeit ging er im Winter gerne eislaufen, im Sommer liebte er das Schwimmen. An Sonntagen gab es Familienausflüge, an denen auch Freunde teilnahmen²⁵⁾. Im Urlaub unternahm Boltzmann ausgedehnte Seereisen. So besuchte er Konstantinopel, Smyrna, Algier und Lissabon.

HUMOR

Eine der anziehendsten Eigenschaften Boltzmanns war sein unvergleichlicher Humor, der in seinen Reden und Schriften immer wieder hervorbricht. In den späteren Abschnitten dieses Buches wird der Leser sich ja unmittelbar davon überzeugen können. Doch seien schon an dieser Stelle einige bezeichnende Aussprüche wiedergegeben, die Boltzmann in ernste Darlegungen eingestreut hat.

So berichtet er bei einer Schilderung der Leistungen der Spektralanalyse, durch die die chemische Zusammensetzung selbst ferner

Weltkörper erforscht werden kann, daß auf Kometen Alkoholdämpfe gefunden wurden, und meint, daß damit die Vorbedingung erfüllt sei, die LESSING in einem seiner Trinklieder als die wichtigste für die Wohnbarkeit erklärt.

Fröhliche Stimmung spricht aus seiner amerikanischen Reisebeschreibung, zu deren Beginn gleich die Worte stehen: „Noch am 8. Juni wohnte ich der Donnerstagsitzung der Wiener Akademie der Wissenschaften in gewohnter Weise bei. Beim Fortgehen bemerkte ein Kollege, daß ich nicht wie sonst nach der Bäckerstraße, sondern nach dem Stubenring mich wandte, und fragte, wohin ich gehe. Nach San Francisco, antwortete ich lakonisch. Im Restaurant des Nordwestbahnhofes verzehrte ich noch in aller Gemütlichkeit Jungschweinsbraten mit Kraut und Erdäpfel und trank einige Gläser Bier dazu. Mein Zahlengedächtnis, sonst erträglich fix, behält die Zahl der Biergläser stets schlecht.“

In seinem Nachruf auf LOSCHMIDT, in dem er seinen Sinn für Humor besonders hervorhebt, erzählt er von dessen in heiterer Selbstironie gefaßten Plan, in Wien ein negatives wissenschaftliches Journal, also eine Zeitschrift für lauter mißlungene Experimente zu gründen. In der gleichen Rede spricht er von seinen Experimenten mit Kugeln aus Schwefelkristallen, die jedoch niemand schleifen wollte. „So schlug er (LOSCHMIDT) mir vor, selbe mit ihm beim Warten vor dem Einlaß ins Burgtheater zu schleifen, wobei er noch von dem in Verwendung kommenden Schwefelkohlenstoff eine abwehrende Wirkung auf das andrängende Publikum hoffte. Sitzplätze spendierten wir uns damals nicht immer.“

Am Schlusse seiner Gedenkrede auf den toten Freund sagte Boltzmann schließlich: „Nun ist LOSCHMIDTS Leib in seine Atome zerfallen; in wie viele, können wir aus den von ihm gewonnenen Prinzipien berechnen, und ich habe, damit es in einer Rede zu Ehren eines Experimentalphysikers nicht an jeder Demonstration fehle, die betreffende Zahl dort an die Tafel schreiben lassen (10 Quadrillionen = 10^{25}).“ (Tatsächlich wurde die Zahl mit 25 Nullen an die Tafel geschrieben³¹.)

Als charakteristisch sei noch ein Vergleich Boltzmanns wiedergegeben, mit dem er in einer Vorlesung die Darstellung eines schwierigen Problems der Wärmeleitung begann⁸²). „Ein Mann verlangte am Schalter des Wiener Südbahnhofes eine Karte nach Japan. Man entgegnete ihm, er könne am Bahnhof nur eine Karte bis Triest lösen, dort müsse er die Schiffskarte nehmen. Als er mit der Karte nach Triest an der Bahnsteigsperrre erschien, machte man ihn darauf aufmerksam, daß in nächster Zeit bloß ein Zug nach dem Semmering gehe. Der Mann bestieg immerhin diesen Zug. Jedoch bereits in Atzgersdorf-Mauer war ihm die Reise zu viel, so daß er den Zug verließ. . . So, meine Herren, haben wir uns zwar ein fernes Ziel gestellt, werden uns aber vorläufig mit dem Erreichen von viel Geringerem begnügen müssen.“

Daß freilich Boltzmanns Witz auch ätzen konnte, bekamen, wie sich in der weiteren Darstellung noch zeigen wird, Boltzmanns Gegner zu spüren. Über SCHOPENHAUER sagte er: „Wie im Höchsten, so zeigt sich die Extravaganz SCHOPENHAUERS auch im Geringfügigsten. So z. B. hat er eine furchtbare Antipathie gegen den Bart des Mannes. Er ist etwas Schlechtes, und zwar aus philosophischen Gründen. 1. Die Behaarung erinnert an das Tierreich, und daher muß der Mann die Behaarung der unteren Gesichtshälfte ablegen. 2. Der Bart ist eine Verlängerung desjenigen Teils des Gesichts, welcher das Animalische darstellt und die Kauwerkzeuge enthält. Dieser Teil des Gesichtes soll beschränkt werden. Drittens soll der Bart ganz tote, keine Nerven und Muskeln enthaltende Substanz sein, und es soll geschmacklos sein, wenn man soviel tote Substanz mit sich herumträgt.“

„So sucht SCHOPENHAUER seine Ansicht ästhetisch zu begründen. Eine Erklärung, die näherliegt, wäre die gewesen, daß ein Gegner SCHOPENHAUERS, etwa Einer, der sich seiner Ernennung zum Professor widersetzt hat, einen langen Bart getragen hätte. Man sieht, wie sich ein Philosoph, der die Ästhetik bloß vom theoretischen Standpunkt aus betrachtet, verirren kann. Das Resultat ist mit

Gebrauch der SCHOPENHAUERSchen Ausdrucksweise: Dummheit, Einfältigkeit, Albernheit, Pinselhaftigkeit, Torheit, verschrobener Unsinn, verbohrtcr Stumpfsinn, himmelschreierender Blödsinn. Ich hoffe, diese Dynamitladung genügt.“

In dem Buch *Mechanik* von BUDE findet sich die Bemerkung des Verfassers: „Unter den deformierbaren Körpern ist einer, der seine Deformation mit Bewußtsein erzeugen kann. Das ist der Mensch.“ Boltzmann fügte dem von ihm benützten Exemplar die Randbemerkung hinzu: „Seinen Körper mit Bewußtsein deformieren kann auch das Schwein, aber solchen Stiefel schreiben kann allerdings nur der Mensch.“

NAIVITÄT

Von Freunden wird oft eine Eigenschaft Boltzmanns hervorgehoben, die als Kindlichkeit, Naivität oder Weltfremdheit bezeichnet wird. So nennt ihn HÖFLER¹⁷⁾ — ähnlich wie KIENZL — einen „mächtigen und dabei doch wieder bis zum Kindischen kindlichen Mann“. Auch OSTWALD³³⁾ nennt Boltzmann einen „Fremdling in dieser Welt“. Dazu möchte der Verfasser der vorliegenden Biographie mit aller Bescheidenheit bemerken, daß die großen Erfolge, die Boltzmann im Kampf um die Enträtselung der Natur wie auch in der Diskussion mit wissenschaftlichen Gegnern erzielte, doch zu zeigen scheinen, daß er sehr genau wußte, worauf es wirklich ankam.

Dem gegenwärtigen Autor will scheinen, daß Boltzmanns Eigenschaft, die Freunden oft als Naivität erschien, in einem Widerstreben bestand, Traditionen und Konventionen unbesehen zu folgen, in einem Wunsch, an Probleme der Wissenschaft wie auch des Lebens vorurteilsfrei und nach eigenem besten Ermessen heranzugehen.

wollen, als einen bequemen Ausdruck für die Thatsache, dass ein ruhend in Freiheit gesetztes A sich nach unten in Bewegung setzt.

b) Elastische Reformation. Wird ein deformirter elastischer Körper im Ruhezustande losgelassen, so nimmt er eine Bewegung an, welche ihn schliesslich zu seiner natürlichen Gestalt zurückführt; er „reformirt sich“.

c) Mensch. Unter den deformirbaren Körpern ist einer, der seine Deformationen mit Bewusstsein erzeugen kann. Das ist der Mensch. Indem er einen Körper A vorübergehend an sich befestigt, kann er ihn entweder deformiren oder beschleunigen. Bewegungswirkungen, die wir ausüben, sind für uns mit einem gewissen Anstrengungsgefühl verknüpft; der augenblickliche Betrag desselben ist für uns roh schätzbar; wenn wir z. B. das eine Mal an einem Cubikcentimeter, das andere Mal an einem Cubikdeciimeter massiven Eisens eine bestimmte Beschleunigung anbringen, so ist der Unter-

Bauwerke, Mechanik, I.

*Trimm Ringen mit Eisenstücken & Eisenring, Kammern auf dem Stein
über dem Stein & Eisenring, Kammern auf dem Stein*

Dies war offenbar gerade die Haltung, die Boltzmann seine wahrhaft glänzenden Erfolge in der Wissenschaft ermöglichte.

Auch im praktischen Leben handelte Boltzmann offenbar, wie seine äußeren Erfolge zeigen, wesentlich zielbewußt und zweckmäßig. Das gleiche Bild der Zielklarheit erhält man aus Boltzmanns Beschreibung seiner amerikanischen Reise. Allerdings waren seine Handlungen oft ungewöhnlich. Nach Ankauf einer Kuh für sein Landhaus soll er seinen Kollegen, den Professor der Zoologie, konsultiert haben, wie wohl das Melken zu bewerkstelligen wäre³⁴). Natürlich mußte es auch KIENZL wie den anderen Grazern merkwürdig erscheinen, daß der berühmte Boltzmann die neue auf dem Viehmarkt erworbene Kuh selbst durch Graz zum Landhaus führte. Aber spricht es nicht eher gegen das herkömmliche Urteil der Menschen, daß eine so natürliche und zweckmäßige Handlung Aufsehen erregt?

An LOSCHMIDT und STEFAN rügte Boltzmann ihren Mangel an praktischem Sinn. In seinem Nachruf auf den tatsächlich weltfremden LOSCHMIDT stellte Boltzmann die Forderung auf, ein Wissenschaftler müsse sich auch im Leben, und zwar im öffentlichen Leben, bewähren: „In seiner (LOSCHMIDTS) Begeisterung für alles Ideale der Wissenschaft und der Kunst vergaß er das Leben; das gehörte zu den Dingen, von denen er abstrahierte. Gewiß, wir werden das in unserem Interesse bedauern. Große Männer sollten auch im öffentlichen Leben nicht feiern.“

TRAGISCHER TOD

Boltzmann war ein Mann von zartem Charakter und leicht zu verletzen⁵). Er nahm gerne von seinen Mitmenschen das Beste an und kränkte sich, wenn die Annahme sich als unrichtig erwies⁹). Er

litt, obwohl er in seiner wissenschaftlichen Arbeit jeden Erfolg hatte, obwohl er die Schönheiten von Natur und Kunst mit vollen Zügen genoß, obwohl er die Welt mit Optimismus und Humor betrachtete und obwohl er einer großen Familie vorstand, unter Depressionen. So versank er manchmal auch in Gesellschaft in langes düsteres Schweigen, das dann kaum zu brechen war. Er selbst bemerkte im Scherz, daß der plötzliche Übergang von Frohsinn zu Traurigkeit, dem er unterworfen war, davon herrühre, daß er in der Nacht vom Faschingdienstag zum Aschermittwoch bei den verhallenden Klängen eines Balls geboren worden war¹³). In Leipzig wurde er oft, wie OSTWALD berichtet, von Kollegangst ergriffen. Bei den Depressionen hat gewiß mitgespielt, daß er durch Überarbeit seine Gesundheit und Nervenkraft untergraben hatte, von schwerem Asthma befallen war und arge Schmerzen litt²⁵). Er befürchtete eine Abnahme seiner geistigen Schaffenskraft⁹). In einem Anfall von Depression ging er schließlich während eines Sommeraufenthaltes in Duino bei Triest in den Tod.

Öfters wurde die Meinung geäußert, beim Tode Boltzmanns habe sein Gefühl mitgespielt, die Atomlehre, für die er sein Leben lang gekämpft hatte, werde in den Hintergrund gedrängt. Diese Ansicht wird z. B. von seinem Leipziger Schüler JAFFE ausgesprochen⁵). HÖFLER, ein persönlicher Freund, aber philosophischer Gegner, schreibt 1906: „Die der traditionellen Atomistik unter Führung ERNST MACHS erstandenen Feinde nannten ihn (Boltzmann) gerne die ‚letzte Säule‘ jenes kühnen Gedankenbaus, und Einzelne haben sogar die auf Jahre zurückreichenden Anzeichen von Schwermut darauf zurückführen wollen, daß er das Wanken jenes Baues erlebte und durch alle mathematische Kunst nicht aufhalten konnte.“¹⁷)

Boltzmanns Leipziger Kollege DES COUDRES schreibt in seinem Nachruf²³): „Im Vorwort zum letzten Band der *Kinetischen Gastheorie* stoßen wir auf Töne einer Stimmung (‚wir bringen ein erstes Grüßen durch Finsternisse getragen‘), Töne, wie sie in eine Urkunde paßten, die einem Grundstein einverleibt werden soll, um erst nach

Jahrhunderten wieder das Tageslicht zu erblicken. In diesem resignierten Gefühl, es möchte eine Zeitrechnung energetischer Barbarei für lange Zeit hinaus die Wirksamkeit seines Lebenswerkes hemmen und alles atomistische Denken unterdrücken . . .“ Daß schon beim Abgang Boltzmanns aus Wien 1900 wie auch beim Abgang aus Leipzig 1902 die bittere Gegnerschaft MACHS bzw. OSTWALDS gegen die Atomistik eine Hauptrolle gespielt hat, berichtet FLAMM (siehe auch S. 37).

In diesem Zusammenhang sei nochmals WILHELM KIENZL zitiert: „Ich erinnere mich noch eines anregenden Spazierganges mit ihm, bei dem der große Forscher, der sonst nie über sich sprach, mir gegenüber das erschütternde Bekenntnis ablegte, daß er sich in seinen letzten und höchsten Ideen von gar Niemandem verstanden wisse. Er könne über gewisse Probleme überhaupt nur mit einem einzigen Manne sprechen, und das sei HELMHOLTZ, der aber fern von ihm lebe.“ HELMHOLTZ starb im Jahre 1894³⁵).

Daß die Gegnerschaft gegen die Atomlehre zu Boltzmanns Depressionen beitrug, berührt uns als besonders tragisch, denn gerade in unserem Jahrhundert hat ja die Atomlehre ihre größten Siege erfochten. So schreibt schon DES COUDRES weiter: „Hier hat sich Boltzmann zu seinen Ungunsten getäuscht . . . Und auch die Fahne, unter der unsere jungen Experimentatoren ihre überraschenden Entdeckungen machen — sei es das Ultramikroskop, der Doppler-Effekt der Kanalstrahlen, seien es die Wunder der radioaktiven Stoffe — ist die atomistische Fahne, es ist die Fahne Ludwig Boltzmanns.“ Übrigens hatte 1906 zum großen Teil eben auf Grund der neuen experimentellen Erfolge die Atomistik ihre schwerste Zeit schon hinter sich. Dies wirkte sich aber auf die Depressionen Boltzmanns nicht mehr aus.

Der frühe Tod Boltzmanns muß umso schmerzlicher empfunden werden, als er selbst sein lebhaftes Bedauern darüber ausgesprochen hat, die weitere Entwicklung der Wissenschaft nicht mehr erleben zu können. Boltzmann starb, wie FLAMM es ausdrückt, als Märtyrer

seiner Ideen. Wohl konnte Boltzmann sich zu den „Tausenden Edelster“ zählen, von denen er schon neunzehn Jahre vorher im Nachruf auf KIRCHHOFF sagte, sie seien im „bitteren blutigen Kampf“ gegen das „Zopftum“, den „überkommenen Unsinn“ und „törichten Aberglauben“ dahingerafft worden.

Das Ehrengrab Boltzmanns im Wiener Zentralfriedhof wurde im Juli 1933 von Stadtrat JULIUS TANDLER in die Obhut der Gemeinde Wien genommen³⁶). „Die Stadt Wien und ihre Bevölkerung sind stolz auf den genialen Mann, der hier gelebt hat, und haben sich bemüht, ihm eine würdige Grabstätte zu widmen.“ Das Ehrengrab ziert eine schöne Büste Boltzmanns, von AMBROSI aus weißem Marmor geschaffen. Über der Büste steht die Formel, die ihre Gültigkeit behalten wird, wenn einmal alle diese Grabmäler unter dem Schutt der Jahrtausende versunken sind, wie THIRRING bei der Einweihung sagte, die kurze und einfache Formel, die die größte wissenschaftliche Leistung Boltzmanns verkörpert:

$$S = k \log W.$$

Indem er die eigenen Worte Boltzmanns über die Formeln CLERK MAXWELLS gebrauchte, fragte EHRENHAFT: „War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?“

ANMERKUNGEN ZUM I. TEIL

- 1) G. JÄGER, Neue Österreichische Biographie. Wien (1925), Band 2.
- 2) L. FLAMM, Wiener Chem.-Ztg. 47, 28 (1944).
- 3) L. FLAMM in: Österreichische Naturforscher und Techniker, Wien (1951).
- 4) H. DE MARTIN, J. J. LOSCHMIDT, Dissertation, Wien (1948).
- 5) G. JAFFE, J. Chem. Ed. 29, 234 (1952).
- 6) L. HAHN, Mündliche Mitteilung.
- 7) W. KIENZL, Meine Lebenswanderung, Wien (1953).
- 8) H. FICKER, Mündliche Mitteilung.
- 9) P. BOLTZMANN (Schwiegertochter LUDWIG BOLTZMANNs), Mündliche Mitteilung.
- 10) Nachruf auf JOSEF STEFAN, Wien (1895).
- 11) L. MEITNER, Briefliche Mitteilung.
- 12) H. MACHE, Mündliche Mitteilung.
- 13) A. LAMPA, Naturwiss. Rundsch. 21, 552 (1906).
- 14) S. MEYER, Österr. Rundsch. 8, 479 (1906).
- 15) F. SKAUPY, Briefliche Mitteilung.
- 16) Wohl der später sehr berühmte Theoretiker P. EHRENFEST (Leiden).
- 17) A. HÖFLER, Südd. Monatsh. 3, 418 (1906).
- 18) F. STREINTZ, Grazer Tagblatt, 20. Februar 1904.
- 19) Nachruf in den „Berichten der Philosophischen Gesellschaft in Wien“ über das Jahr 1906.
- 20) BLASERNA, Rendic. Lincei 15, 570 (1906).
- 21) A. SOMMERFELD, Wiener Chem.-Ztg. 47, 25 (1944).
- 22) H. A. LORENTZ, Vhdlg. D. phys. Ges. 9, 205 (1907).
- 23) TH. DES COUDRES, Ber. kön. sächs. Ges. Wiss. 58, 617 (1906).
- 24) E. MACH, Neue Freie Presse, 8. September 1906.
- 25) E. FLAMM (Tochter LUDWIG BOLTZMANNs), Mündliche Mitteilung.
- 26) Nachruf auf KIRCHHOFF.
- 27) Nachruf auf LOMMEL.
- 28) E. LUDWIG, Neue Freie Presse, 7. September 1906.
- 29) F. HASENÖHRL, Bericht über die Errichtung eines Denkmals für L. BOLTZMANN, Wien 1913.

³⁰⁾ Siehe G. OSTWALD, Mein Vater, Stuttgart 1953. (Den Hinweis auf dieses Buch verdanke ich Herrn Prof. L. EBERT.) W. OSTWALD nennt BOLTZMANN in seinem Buch „Große Männer“ „den Mann, der uns Allen an Scharfsinn und Klarheit in seiner Wissenschaft überlegen war“.

³¹⁾ A. BROMMER, Mündliche Mitteilung.

³²⁾ L. FLAMM, Mündliche Mitteilung.

³³⁾ W. OSTWALD, Große Männer, Leipzig (1909).

³⁴⁾ K. PRZIBRAM, Mündliche Mitteilung.

³⁵⁾ Obwohl BOLTZMANN für den Physiker HELMHOLTZ die größte Ehrerbietung hegte, ließ ihn der Mensch (der „Geheimrat“) HELMHOLTZ kalt, wie aus Bemerkungen in den Nachrufen auf STEFAN und LOSCHMIDT hervorgeht (siehe auch S. 6, und DES COUDRES, a. a. O.). In gewissem Sinn war also die Stellung zu HELMHOLTZ der zu OSTWALD entgegengesetzt.

³⁶⁾ J. TANDLER, H. THIRRING, F. EHRENSHAFT, Elektrotechnik und Maschinenbau, 51, Heft 53 (1933).

³⁷⁾ Bezeichnend ist der Bericht einer Hörerin (H. MAREK, geb. BRODA, Briefliche Mitteilung): „Eine meiner liebsten Jugenderinnerungen, obwohl ich leider blutwenig von seinen Deduktionen erfaßte, sind Boltzmanns Vorlesungen im größten Vortragssaale, bei denen ein wahrhaft beängstigendes Gedränge herrschte. Ebenso wie ich kamen Unzählige bloß wegen der Ausstrahlungskraft seiner unvergleichlichen Persönlichkeit, die packte und festhielt wie kaum die irgend eines anderen Menschen. Unmöglich konnte ein empfängliches Wesen sich dem Zauber des Menschen Boltzmann entziehen. Boltzmann hatte ein ausdrucksvolles und unendlich sympathisches Antlitz. Ich stand gerade in seiner Nähe, als er zu seiner Umgebung das ihn umschwirrende Gedränge mit dem aufgeregten Flattern der Enten am Grazer Hilmteich verglich, wenn Kinder Futterstückchen warfen.“

Der Physiker

STELLUNG ZUR KLASSISCHEN PHYSIK

Boltzmann arbeitete zwar, wie schon im ersten Abschnitt dieser Würdigung des großen Physikers betont wurde, in der ersten Zeit seines Wirkens als erfolgreicher Experimentator. Doch gehörte Boltzmanns größte Neigung der Theorie. Ihr widmete er sich in der letzten Periode seines Lebens ausschließlich, und in der Vervollkommnung der Theorie erblickte er seine eigentliche Lebensaufgabe. Wirklich sind es die theoretischen Leistungen, die Boltzmann unsterblich machen. Daher sollen hauptsächlich die Beiträge Boltzmanns zur physikalischen Theorie im Zusammenhang dargestellt und experimentelle Arbeiten im Rahmen dieser Darstellung an geeigneter Stelle bloß erwähnt werden. Dabei soll die Reihenfolge analytische Mechanik — Elektrizitätslehre — kinetische Theorie der Materie — statistische Mechanik eingehalten werden.

Zu Beginn der Darstellung sind zwei allgemeine Hinweise am Platz. Der erste Hinweis betrifft die Stellung Boltzmanns in der Geschichte der neueren Physik. Boltzmann war im wesentlichen ein Mann des 19. Jahrhunderts. Damit soll nicht nur etwas über den Zeitraum seines Wirkens ausgesagt werden, sondern es soll auch betont werden, daß Boltzmann noch ein Vertreter der Etappe der Physik war, die wir heute als „klassische Physik“ bezeichnen. Die klassische Physik war in ihren Hauptlinien — nicht zuletzt dank der Tätigkeit Boltzmanns — um das Jahr 1900 abgeschlossen.

Um die Jahrhundertwende wurden die ersten der großen Entdeckungen gemacht, wie vor allem die Entdeckung des Elektrons

durch J. J. THOMSON, der Röntgenstrahlen durch W. K. RÖNTGEN und der Radioaktivität durch H. BECQUEREL und das Ehepaar CURIE, die die Physik zur Weiterentwicklung über den klassischen Bereich hinaus veranlaßten. An diese Entdeckungen schloß sich, obgleich unmittelbar durch die experimentelle Untersuchung der elektromagnetischen einschließlich der Lichtstrahlung ausgelöst, im Jahre 1900 die Aufstellung der Quantentheorie durch MAX PLANCK. Im Jahre 1905 wurde die Quantentheorie durch ALBERT EINSTEIN allgemeiner gefaßt. Auch in anderer Hinsicht ging EINSTEIN — ebenfalls im Jahre 1905 — durch die Aufstellung der Relativitätstheorie über den klassischen theoretischen Rahmen hinaus.

Die neuere Physik, die durch Quanten- und Relativitätstheorie beherrscht wird, wird allgemein in einen gewissen Gegensatz zu der klassischen Physik gestellt. Das bedeutet, daß die klassische Physik ohne die neuen, zusätzlichen Annahmen der Quanten- und Relativitätstheorie die Erscheinungen nicht mehr vollständig zu deuten imstande war. Es bedeutet aber natürlich nicht, daß die klassische Physik überhaupt falsch war. In ihrem eigenen Bereich war sie richtig. Jedoch bei der Betrachtung schneller periodischer Bewegungen (von Drehungen oder Schwingungen) oder tiefer Temperaturen ist der Übergang zu den Formeln der Quantentheorie notwendig. Bei der Behandlung rascher Bewegungen aller Art wird die Anwendung der Relativitätstheorie unentbehrlich.

Obwohl nun Boltzmann noch zehn Jahre nach der Entdeckung der Radioaktivität, sechs Jahre nach der Aufstellung der Quantentheorie lebte und sogar noch die erste Veröffentlichung EINSTEINS über die spezielle Relativitätstheorie lesen konnte, blieb er im Bereich der klassischen Physik. Zum Beispiel wird die Radioaktivität nur gelegentlich, und Quanten- oder Relativitätstheorie werden gar nicht erwähnt. Man gewinnt geradezu den Eindruck, daß Boltzmann trotz seines Interesses am Neuen, Revolutionären sich bewußt auf die klassische Betrachtungsweise beschränkt hat, die er als sein eigenes

Feld betrachtete, als das Feld, dessen souveräne Beherrschung er gelernt hatte und über das er selbst nicht mehr hinausschreiten wollte.

Die Rolle, die er sich selbst zgedacht hatte, umschreibt er in ergreifender Weise in seinem Vortrag über die *Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik* (1899). Nachdem er die Entwicklungsstufe der theoretischen Physik zu Beginn seiner Studien skizziert hat, fährt er fort: „Was hat sich seitdem alles verändert! Fürwahr, wenn ich auf alle diese Entwicklungen und Umwälzungen zurückschaue, so erscheine ich mir wie ein Greis an Erlebnissen auf wissenschaftlichem Gebiet. Ja, ich möchte sagen, ich allein bin übrig geblieben von Denen, die das Alte noch mit voller Seele umfaßten, wenigstens bin ich der Einzige, der noch dafür, soweit er es vermag, kämpft. Ich betrachte es als meine Lebensaufgabe, durch möglichst klare, logisch geordnete Ausarbeitung der Resultate der alten klassischen Theorie, soweit es in meiner Kraft steht, dazu beizutragen, daß das viele Gute und für immer Brauchbare, das meiner Überzeugung nach darin enthalten ist, nicht einst zum zweiten Male entdeckt werden muß, was nicht der erste Fall dieser Art in der Wissenschaft wäre. Ich stelle mich Ihnen daher vor als einen Reaktionär, einen Zurückgebliebenen, der gegenüber den Neuerern für das Alte, Klassische schwärmt; aber ich glaube, ich bin nicht borniert, nicht blind gegen die Vorzüge des Neuen ...“

Von Boltzmann wurde schon 1872, also 28 Jahre vor der Veröffentlichung PLANCKS, bei statistischen Ableitungen von einer Quantisierung der Energie, also einer „atomistischen“ Zusammensetzung der Energie aus kleinsten Einheiten, Gebrauch gemacht. Zwar handelt es sich dabei um einen mathematischen Kunstgriff. Die Quantisierung kommt in den schließlich erarbeiteten Formeln nicht mehr zum Ausdruck. Doch war Boltzmann zweifellos ein Wegbereiter der Quantentheorie. „Für den atomistisch strukturierten Boltzmannschen Intellekt wäre die Quantentheorie das wahre Tätigkeitsfeld gewesen“, meint SOMMERFELD¹⁾.

PLANCKS erste Arbeiten — vor Aufstellung der Quantenhypothese

— beurteilte Boltzmann kühl. „Insbesondere verdroß ihn, daß ich der atomistischen Theorie, welche die Grundlage seiner ganzen Forschungsarbeit bildete, nicht nur gleichgültig, sondern sogar etwas ablehnend gegenüberstand.“⁽²⁾ Als PLANCK aber bei der Anwendung der statistischen Methoden Boltzmanns auf die Gesetze der Strahlung die Notwendigkeit der Annahme der Energiequanten erkannte, wobei nunmehr die Quantisierung auch im endgültigen Resultat erkennbar blieb, würdigte Boltzmann sogleich den großen Wert dieser Arbeit: „Es gewährte mir eine besonders wertvolle Genugtuung für manche durchgemachte Enttäuschung, daß Ludwig Boltzmann in dem Briefe, mit dem er die Zusendung meines Aufsatzes (über die Quantenhypothese) beantwortete, sein Interesse und sein grundsätzliches Einverständnis mit dem von mir vorgeschlagenen Gedankengang zu erkennen gab.“⁽²⁾)

ATOMISTIK

Der zweite allgemeine Hinweis, der vorangestellt sei, betrifft das unbegrenzte Vertrauen Boltzmanns zur Atomlehre. Er bemühte sich, wo er nur konnte, die Erscheinungen auf Grundlage der Atomlehre zu deuten. Die Stellung des 19. Jahrhunderts zur Atomistik erscheint uns heute — ein Jahrhundert später — widerspruchsvoll. In der Chemie hatte sich die Atomistik seit DALTON vollkommen durchgesetzt und unter MENDELEJEW durch das Periodische System der Elemente einen neuen, entscheidenden Triumph gefeiert. Dieser Erfolg der Atomlehre erklärt sich zum Teil wohl durch die Ansprüche, die die chemische Praxis an eine leistungsfähige chemische Wissenschaft stellte.

Dagegen machte sich nur ein Teil der Physiker die Atomlehre zu eigen. Während Boltzmann — in den Worten eines philosophischen Gegners³⁾ — „Atomistiker bis ins Unmögliche“ war, wurde die Atom-

lehre in Wien von ERNST MACH, der „an Atome nicht glaubte“^(4.23), in Leipzig von WILHELM OSTWALD bekämpft. In Deutschland herrschte gegen Ende des vorigen Jahrhunderts „gegen die Gastheorie eine feindselige Stimmung“, die „Angriffe gegen die Gastheorie mehrten sich“, diese war „aus der Mode gekommen“, wie Boltzmann sich im Vorwort zum ersten bzw. zweiten Teil der *Vorlesungen über Gastheorie* ausdrückt. Der Kampf gegen die feindlichen Anschauungen war durchaus nicht leicht, wie auch der junge PLANCK verspüren mußte: „Gegen die Autorität von Männern wie OSTWALD, HELM und MACH war eben nicht aufzukommen.“⁽²⁾

Boltzmann empfand die Lage der Atomlehre unter dem Hagel der Angriffe derart (siehe S. 26), daß er 1897 an den Schluß einer wissenschaftlichen Abhandlung im Anklang an GALILEI die Worte setzte: „Doch glaube ich von den Molekülen beruhigt sagen zu können: Und dennoch bewegen sie sich!“ So merkwürdig dies ein Jahrzehnt nach Hiroshima klingt, ist doch erst in unserem Jahrhundert die Atomlehre Gemeingut nicht nur der Chemiker, sondern auch der Physiker geworden.

Boltzmann richtete die Schärfe seiner Polemik gegen die Gegner der Atomlehre. „Vielleicht“, sagte Boltzmann im Vortrag über den *Zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie* (1886), „wird die atomistische Hypothese einmal durch eine andere verdrängt werden, vielleicht, aber nicht wahrscheinlich. Alle Gründe, welche für diese Behauptung angeführt werden könnten, namhaft zu machen, ist hier nicht der Ort. Ich brauche wohl nicht zu erinnern an die genialen Schlüsse THOMSONS⁵⁾, welcher auf den verschiedensten Wegen immer in recht befriedigender Weise berechnete, aus wieviel jener Einzelwesen (Atome. E. B.) ein Kubikmillimeter Wasser besteht. Ich brauche nicht zu erwähnen, daß, abgesehen von vielen Tatsachen der Chemie, mittels der atomistischen Hypothese die Vorausberechnung der Abhängigkeit der Reibungskonstante der Gase von der Temperatur, des absoluten und relativen Wertes der Diffusions- und Wärmeleitungs-konstante gelang, Vorhersagen, welche sich gewiß

der Berechnung der Existenz des Planeten Neptun durch LEVERRIER oder der Vorhersagung der konischen Refraktion durch HAMILTON an die Seite stellen lassen.“

Eine Abhandlung Boltzmanns aus dem Jahre 1897 heißt geradezu: *Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft*. Diese Unentbehrlichkeit ergibt sich aus ihrer kolossalen wissenschaftlichen Fruchtbarkeit: „Die heutige Atomistik ist ein vollkommen zutreffendes Bild aller mechanischen Erscheinungen, und es ist bei der Abgeschlossenheit dieses Gebietes kaum zu erwarten, daß auf demselben noch Erscheinungen entdeckt werden könnten, welche sich nicht in den Rahmen des Bildes fügen. Dieses umfaßt ferner auch die Wärmeerscheinungen. Daß der letztere Umstand nicht so sicher nachgewiesen werden kann, liegt lediglich in der Schwierigkeit, welche die Berechnung der Molekularbewegung bietet. Jedenfalls finden sich alle wesentlichen Tatsachen in den Zügen unseres Bildes wieder. Dieses erwies sich auch zur Darstellung der kristallographischen Tatsachen, der konstanten Proportionen der Massen bei chemischen Verbindungen, der chemischen Isomerien und der Beziehungen zwischen der Drehung der Polarisationssebene und der chemischen Konstitution usw. äußerst nützlich. Die Atomistik ist dabei noch großer Weiterentwicklung fähig . . .“

Die erstaunliche Fruchtbarkeit der Atomistik wird auch in der Polemik gegen OSTWALDS sogenannte Energetik besonders unterstrichen. „Die gewissermaßen von DEMOKRIT datierende Atomtheorie, die von BERNOULLI und RUMFORD stammende spezielle mechanische Wärmetheorie, die mechanischen Bilder der Chemie, Kristallographie, Elektrolyse usw. sind noch heute in steter Entwicklung begriffen . . . Wir haben also hier Erfolge, denen alle philosophischen Naturanschauungen von HEGEL bis OSTWALD nichts entgegenzusetzen haben.“

Nachdem auch im Vortrag *Die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit* (1899) der Beitrag der Atom- und Molekulartheorie zum Verständnis der Eigenschaften der Gase

ausführlich gewürdigt wurde, kommt Boltzmann zum Schluß: „Alle diese Leistungen und zahlreiche frühere Errungenschaften der Atomlehre können durch die Phänomenologie oder Energetik absolut nicht gewonnen werden, und ich behaupte, daß eine Theorie, welche Selbständiges, in anderer Weise nicht Gewinnbares leistet, für welche obendrein so viele andere physikalische, chemische und kristallographische Tatsachen sprechen, nicht zu bekämpfen, sondern fortzupflegen ist. Der Vorstellung über die Natur der Moleküle aber wird man den weitesten Spielraum lassen müssen ... Über ihre nähere, gewiß enorm komplizierte Beschaffenheit aber hat man noch keine Anhaltspunkte; man wird vielmehr solche zu gewinnen suchen.“ Schon im Jahre 1886 im Vortrag über den *Zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie* hatte Boltzmann betont, daß die Spektralanalyse den Zugang zur Erkenntnis des inneren Baues des Atoms öffnen wird. (Dieser Gedanke war auch schon von MAXWELL geäußert worden.)

Natürlich darf man nach Boltzmann den Atomen nur solche Eigenschaften beilegen, die sich durch die Erfahrung rechtfertigen lassen. „Freilich lehrt die einfachste Überlegung sowie die Erfahrung übereinstimmend, daß es hoffnungslos schwierig ist, durch bloßes Raten ins Blaue hinein gleich auf richtige Weltbilder zu verfallen, daß sich solche vielmehr immer nur langsam aus einzelnen glücklichen Ideen durch Anpassung bilden. Gegen das Treiben der vielen leichtsinnigen Hypothesenschmiede, welche hoffen, mit geringer Mühe eine die ganze Natur erklärende Hypothese zu finden, sowie gegen die metaphysische und dogmatische Begründung der Atomistik wendet sich daher die Erkenntnistheorie mit Recht“, heißt es in der erwähnten Abhandlung *Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik*.

Als Beispiel einer willkürlichen Annahme dient die der Unveränderlichkeit der Atome: „Der Vorwurf, daß hier eine unberechtigte Verallgemeinerung der beobachteten, nur begrenzte Zeit dauernden Unveränderlichkeit der festen Körper vorliege, wäre sicher gerechtfertigt, sobald man, wie es wohl ehemals geschah, die Unveränder-

lichkeit der Atome a priori zu beweisen suchte. Wir nehmen sie aber bloß deshalb in unser Bild auf, damit dasselbe den Inbegriff möglichst vieler Erscheinungen darzustellen vermag ... Wir sind bereit, die Unveränderlichkeit in jenen Fällen fallen zu lassen, wo eine andere Annahme die Erscheinungen besser darstellen würde.“ Im Lichte der neueren Erkenntnisse über die Transmutation der Atome, ja über die Möglichkeit der gegenseitigen Umwandlung elementarer Teilchen, erscheint diese Bemerkung in der Tat berechtigt!

Auch die Annahme der Unteilbarkeit der Atome ist keine Notwendigkeit. In dem in St. Louis im Jahre 1904 gehaltenen Vortrag *Über statistische Mechanik* stellt Boltzmann fest: „Wir werden uns nun (betreffend die Frage nach der atomistischen Zusammensetzung der Materie) nicht auf das Denkgesetz berufen, daß es keine Grenzen der Teilung der Materie geben könne. Dieses Denkgesetz ist nicht mehr wert, als wenn ein naiver Mensch sagen würde, wohin immer ich auf der Erde ging, schienen mir die Lotrichtungen immer parallel, daher kann es keine Gegenfüßler geben ... Die Rechnung ergibt nämlich, daß die Elektronen noch viel kleiner als die Atome der ponderablen Materie sind, und die Hypothese, daß die Atome aus zahlreichen Elementen aufgebaut sind, sowie verschiedene interessante Ansichten über die Art und Weise dieses Aufbaus sind heute in aller Munde. Das Wort Atom darf uns da nicht irreführen, es ist aus alter Zeit übernommen; Unteilbarkeit schreibt heute kein Physiker den Atomen zu.“

Nachdem wir die Einschätzung der Verdienste der Atomlehre durch Boltzmann wiedergegeben haben, soll gezeigt werden, auf welcher Linie sich Boltzmann mit den sogenannten Phänomenologen auseinandersetzt. Die Phänomenologen behaupteten, durch den Verzicht auf den Atombegriff die Wissenschaft von einer unbewiesenen Annahme befreit zu haben. Darauf erwiderte Boltzmann, daß diese Befreiung nur eine scheinbare ist. Sowohl Anhänger wie auch Gegner der Atomistik gehen beim Aufbau ihrer Theorien von Gesetzen aus, die aus Experimenten an sichtbaren, also der Makro-Welt ange-

hörigen Körpern gewonnen werden. Beide Schulen leiten daraus die Gesetze ab, die für die Mikro-Welt gelten sollen. Die Atomisten meinen, daß die abgeleiteten Gesetze dann am besten der Wirklichkeit entsprechen, wenn man die gedankliche Teilung der Materie nicht unbegrenzt weit treibt, also bei Atomen, Elektronen — oder was sonst die kleinsten bisher faßbaren Einheiten sein mögen — haltmacht; dagegen behaupten die Gegner der Atomlehre, die die Materie als ein Kontinuum auffassen, daß man die Teilung unbegrenzt weiter treiben kann und soll. Boltzmann betont nun, daß beiderlei Annahmen von vornherein hypothetisch sind und daß ihre Richtigkeit oder Unrichtigkeit erst beim Vergleich mit der Erfahrung beurteilt werden kann. Keineswegs aber enthält die eine Annahme a priori weniger Hypothetisches als die andere Annahme.

Die Analyse dieses Problems ist von Boltzmann mehrmals durchgeführt worden, zum Beispiel auch im Vorwort zum Buch über Gas-*theorie*, aber vielleicht in der einfachsten Form in dem genannten Vortrag *Über statistische Mechanik*: „Da zeigt sich nun, daß wir das Unendliche nicht anders definieren können, als die Limite (der Grenzwert. E. B.) immer wachsender endlicher Größen; wenigstens war bisher noch Niemand imstande, in anderer Weise einen irgendwie faßbaren Begriff des Unendlichen aufzustellen. Wollen wir uns daher vom Kontinuum ein Bild in Worten machen, so müssen wir uns notwendig zuerst eine große endliche Zahl von Teilchen denken, die mit gewissen Eigenschaften begabt sind, und das Verhalten des Inbegriffs solcher Teilchen untersuchen. Gewisse Eigenschaften dieses Inbegriffs können sich nun einer bestimmten Limite nähern, wenn man die Anzahl der Teilchen immer mehr zu-, ihre Größe immer mehr abnehmen läßt. Von diesen Eigenschaften kann man dann behaupten, daß sie dem Kontinuum zukommen, und dies ist meiner Ansicht nach die einzige widerspruchsfreie Definition eines mit gewissen Eigenschaften begabten Kontinuums.“

„Die Frage, ob die Materie atomistisch zusammengesetzt oder kontinuierlich ist, reduziert sich daher darauf, ob jene Eigenschaften

bei Annahme einer außerordentlich großen, endlichen, oder ihre Limite bei stets wachsender Teilchenzahl die beobachteten Eigenschaften der Materie am genauesten darstellen. Freilich, die alte philosophische Frage haben wir hiermit nicht beantwortet, aber wir sind doch von dem Bestreben geheilt, sie auf einem widersinnigen und aussichtslosen Weg entscheiden zu wollen. Der Denkprozeß, daß wir zuerst die Eigenschaften eines endlichen Inbegriffs untersuchen und dann die Zahl der Glieder des Inbegriffs außerordentlich wachsen lassen müssen, bleibt ja in beiden Fällen derselbe.“

Daß man a priori nicht einmal der Kontinuität der Zeit sicher sein kann, schreibt Boltzmann in den *Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik*⁶⁾: „Für mein Gefühl liegt in den Differentialquotienten nach der Zeit noch eine gewisse Unklarheit. Abgesehen von den wenigen Fällen ... wird man behufs Herstellung eines Zahlenbildes die Zeit immer in eine endliche Zahl von Zeiteilen geteilt denken müssen, bevor man zur Limite übergeht. Vielleicht sind unsere Formeln nur der sehr angenäherte Ausdruck für Durchschnittswerte, die sich aus viel feineren Elementen konstruieren lassen und nicht im strengen Sinn differenzierbar sind. Doch fehlt hierfür bisher noch jeder Anhaltspunkt in der Erfahrung.“ Schon an einer früheren Stelle des gleichen Buches heißt es: „Jeder, der einmal Mechanik studiert hat, wird sich wohl erinnern, welche Schwierigkeit ihm das Verständnis der Beweise machte, daß die Bewegung während einer sehr kurzen Zeit als geradlinig und gleichförmig, die Kräfte während einer solchen als unveränderlich betrachtet werden können. Diese Schwierigkeiten liegen einfach darin, daß die betreffenden Beweise gar nicht richtig sind. Die analytischen Funktionen haben wir ja gerade zur Darstellung der Erfahrungstatsachen gemacht. Ihre Differenzierbarkeit kann nicht als Beweis für die Differenzierbarkeit empirisch gegebener Funktionen gelten, da ja die Zahl der denkbaren undifferenzierbaren Funktionen gradeso unendlich groß ist wie die der differenzierbaren. Ebenso ist die Tatsache, daß jeder mit der Hand oder einer Maschine gezogene Strich einer differenzierbaren

Funktion entspricht, nur ein Beweis, daß, soweit heute unsere Beobachtungsmittel gehen, die Differenzierbarkeit der in der Mechanik empirisch gegebenen Funktionen eben etwas erfahrungsgemäß Gegebenes ist. Deshalb haben wir ohne jede Beschönigung die Differenzierbarkeit einfach als Annahme hingestellt, welche mit den bisherigen Erfahrungstatsachen übereinstimmt.“ In der Abhandlung *Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik* wird die „Vorstellung, daß niemals eine Abweichung von der Limite entdeckt werden könnte, der sich das Bild bei immer kleiner werdenden Zeitatomen nähert“, „als von der Erfahrung noch nicht bewiesen“ bezeichnet. Beim Fallenlassen dieser Vorstellung sind schon die Gesetze der Mechanik des materiellen Punktes nur angenähert richtig²²⁾.

Schließlich sei zur Beurteilung der Rolle der Atomistik im Rahmen der Gesamtauffassungen Boltzmanns seinem hervorragenden Schüler und Kollegen FRANZ EXNER das Wort erteilt⁷⁾: „Das Interesse, das Boltzmann an der Gastheorie hatte, war ein viel universelleres, als es nach seinen speziellen Arbeiten den Anschein hat. Ihm war diese Theorie der Repräsentant einer Weltanschauung; der atomistischen Anschauung, und in ihr fand er die beste Stütze gegen die in jüngster Zeit beliebten, aber unklaren energetischen Vorstellungen, wie sie namentlich von OSTWALD und seinen Schülern propagiert werden. Gegen alle diese in Wirklichkeit einen Schritt nach rückwärts bedeutenden Theorien führte Boltzmann einen erbitterten, aber gerechten und höchst dankenswerten Kampf.“

ANALYTISCHE MECHANIK

Boltzmann hegte besondere Neigung zum grundlegenden Zweige der klassischen Physik, zur analytischen Mechanik. Er bemühte sich durch viele Jahrzehnte, die von anderen Zweigen der Physik

erfaßten Erscheinungen durch die Begriffe der Mechanik, des „Fundamentes der gesamten Naturwissenschaft“, zu deuten. In der zweiten Antrittsvorlesung *Über die Prinzipien der Mechanik* (1902) wird der Bereich der analytischen Mechanik außerordentlich weitreichend abgesteckt: „Sie hat die Gesetze zu erforschen, nach denen sich die Gesamtheit der Bewegungserscheinungen in der uns umgebenden Natur abspielt.“ Dies ist freilich eine Definition, die uns heute zu weit dünkt; der Bereich der Mechanik wird in den darauffolgenden Ausführungen Boltzmanns auch wirklich praktisch wieder eingeschränkt (siehe S. 45).

In seinen amerikanischen Vorlesungen über die *Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik* (1899) drückt Boltzmann sich bewundernd aus: „Die analytische Mechanik ist eine Wissenschaft, welche schon von ihrem Begründer NEWTON mit solchem Scharfsinn und solcher Vollendung ausgearbeitet wurde, wie es in dem gesamten Gebiete menschlichen Wissens fast ohne Beispiel dasteht. Die großen Meister, welche auf Newton folgten, haben das von ihm errichtete Gebäude noch weiter gefestigt, und es hatte den Anschein, daß eine vollendetere und einheitlichere Schöpfung des Menschengestes als die Grundlehren der Mechanik, wie sie uns in den Werken von LAGRANGE, LAPLACE, POISSON, HAMILTON usw. entgegentreten, überhaupt nicht denkbar wäre. Gerade die Begründung der ersten Prinzipien schien von diesen Forschern mit einem Scharfsinn und einer logischen Konsequenz durchgeführt, die allezeit das Vorbild lieferten, welchem man die Begründung der übrigen Wissenszweige, wenn auch nicht immer mit dem gleichen Erfolge, nachzubilden suchte. Es schien lange ganz unmöglich, dieser Begründung überhaupt noch etwas hinzuzufügen oder daran etwas zu ändern.“ Tatsächlich wurden ja die Grundlagen der Mechanik erst durch die Relativitätstheorie einer Abänderung und Weiterentwicklung unterzogen.

Die Beziehung der Mechanik zu anderen Zweigen der Physik wird in der Leipziger Antrittsvorlesung (1900) durch ein Gleichnis dar-

gestellt: „Wenn eine Nation große Erfolge erzielt hat im Vergleich mit den in der Nachbarschaft wohnenden, so pflegt sie eine gewisse Hegemonie über die letzteren zu erlangen, ja sie geht nicht selten daran, sie zu unterjochen und sich dienstbar zu machen. Geradeso ergeht es auch mit den wissenschaftlichen Disziplinen. Die Mechanik erlangte bald die Hegemonie in der gesamten Physik. Zunächst unterwarf sich ihr naturgemäß und widerstandslos die Akustik ... Den Feldzug in das Gebiet der Wärmetheorie eröffnete die Mechanik durch die Vorstellung, daß die Wärme eine Bewegung der kleinsten Teile der Körper sei ...“. Später wurde die Mechanik, wie Boltzmann weiter ausführt, auf die Lehre von Elektrizität und Magnetismus, ja sogar auf die Entwicklung des Lebens und des Geistigen angewendet.

Freilich festigte sich in Boltzmann im Laufe der Zeit die Überzeugung, daß ein rein mechanisches Weltbild nicht der Wirklichkeit entspricht: „Ich selbst habe einmal eine Lanze für die mechanische Naturanschauung gebrochen, aber nur in dem Sinne, daß sie ein kolossaler Fortschritt gegenüber der früheren, rein mystischen ist. Dagegen war die Ansicht, daß es keine andere Naturerklärung geben könne, als die aus der Bewegung materieller Punkte, deren Gesetze durch Zentralkräfte (Anziehungskräfte in Richtung der Punkte. E. B.) bestimmt sind, schon ... längst fast allgemein verlassen“, heißt es im *Wort der Mathematik an die Energetik* (1896).

Ganz neue Gedanken zu diesem Problem finden sich in einer der letzten Schriften Boltzmanns, nämlich in dem 1904 erschienenen zweiten Band der *Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik*: „Wenn man sich schon überhaupt um die künftigen Jahrhunderte oder gar Jahrtausende kümmern will, so will ich gerne zugeben, daß es vermessen wäre, zu hoffen, daß das heutige mechanische Weltbild selbst nur in seinen wesentlichsten Zügen sich in alle Ewigkeit erhalten werde. Daher bin ich auch weit entfernt, von Versuchen, allgemeinere Gleichungen zu suchen, von denen die mechanischen nur spezielle Fälle sind, gering zu denken.“ Nachdem Boltz-

mann in den folgenden Worten die später zu besprechenden Irrwege der Phänomenologie und der Energetik abgelehnt hat, fährt er fort: „Vor allem dürfte man, wenn man das Bild materieller Punkte vermeiden will, in der Mechanik später nicht doch wieder materielle Punkte einführen, sondern man müßte von anders beschaffenen Einzelwesen oder Elementen ausgehen, deren Eigenschaften so klar wie die der materiellen Punkte zu schildern wären.“

„Ich schrieb das Vorstehende vor etwa sieben Jahren nieder, der Schlußsatz stellt also die von mir vor sieben Jahren gestellte Forderung dar... Ich brachte alles das jetzt absichtlich unverändert zum Abdruck. Was ich dort nach Jahrhunderten oder gar Jahrtausenden erwartete, ist in sieben Jahren zur Hälfte geschehen.“

„Aber nicht von der Energetik, nicht von der Phänomenologie ging der Hoffnungsstrahl einer nichtmechanischen Naturerklärung aus, sondern von einer Atomtheorie, die in phantastischen Hypothesen die alte Atomtheorie ebenso übertrifft, wie ihre Elementargebilde an Kleinheit die alten Atome übertreffen. Ich brauche nicht zu sagen, daß ich die moderne Elektronentheorie meine. Diese strebt gewiß nicht, die Begriffe der Masse und Kraft, das Trägheitsgesetz usw. aus Einfacherem, leichter Verständlichem zu erklären, ihre einfachsten Grundbegriffe und Gesetze werden sicher ebenso unerklärlich bleiben wie für das mechanische Weltbild der Mechanik. Aber der Vorteil, die gesamte Mechanik aus anderen, für die Erklärung des Elektromagnetismus ohnehin notwendigen Vorstellungen ableiten zu können, wäre ebenso groß als wenn umgekehrt die elektromagnetischen Erscheinungen mechanisch erklärt werden können. Möge das Erstere gelingen und dabei meine vor sieben Jahren gestellte Forderung erfüllt werden!“

Angesichts der inneren Vollendung der Mechanik betrachtete Boltzmann als seine Hauptaufgabe nicht die Herleitung neuer Lehrsätze, sondern, ähnlich wie das andere theoretische Physiker seiner Zeit taten, einerseits die Klärung der begrifflichen Grundlagen der Mechanik, andererseits ihre Anwendung auf andere Zweige der Physik.

Zweifellos hat die Klärung der Begriffe der Mechanik gegen Ende des 19. Jahrhunderts ganz wesentlich mitgeholfen, die Voraussetzungen für die Aufstellung der Relativitätstheorie durch EINSTEIN zu schaffen.

Bei der Ableitung der Mechanik bevorzugte Boltzmann die von ihm als deduktiv bezeichnete Methode. (Die Bezeichnung ist wohl nicht glücklich gewählt.) Es wird die Hypothese aufgestellt, daß mit Masse begabte punktförmige Gebilde („Massenpunkte“) existieren, die durch bestimmte einfache Kräfte aufeinander wirken. Man bemerkt die logische Beziehung zur Atomistik, die auch im ersten Kapitel der *Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik* unterstrichen wird. Aus den Grundannahmen wird dann das Lehrgebäude der Mechanik aufgebaut und erst nachträglich mit der Erfahrung verglichen. Als Vorteil der deduktiven Methode wird die reinliche Scheidung des Hypothetischen und des Experimentellen angesehen, durch die eine produktive Kritik der Theorie erleichtert wird. „Da die deduktive Methode nicht fortwährend äußere, uns aufgezwungene Erfahrungen mit inneren, von uns willkürlich gewählten Bildern vermengt“, heißt es in den erwähnten amerikanischen Vorlesungen über die *Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik*, „so ist es ihr weitaus am leichtesten, diese letzteren klar und widerspruchsfrei zu entwickeln. Es ist nämlich eines der wichtigsten Erfordernisse dieser Bilder, daß sie vollkommen klar sind, daß wir niemals in Verlegenheit sind, wie wir sie in jedem bestimmten Falle formen sollen, und daß wir jedesmal das Resultat eindeutig und unzweifelhaft aus denselben ableiten können. Gerade diese Klarheit leidet durch zu frühe Vermischung mit der Erfahrung und wird bei der deduktiven Darstellungsweise am besten gewahrt.“

Boltzmann ist sich dabei sehr wohl bewußt, was diese deduktive (oder „axiomatische“) Darstellungsweise ihrer Natur nach leisten kann und was sie nicht leisten kann: „Dagegen tritt bei dieser Darstellungsweise besonders die Willkürlichkeit der Bilder scharf hervor, indem man mit ganz willkürlichen Gedankenkonstruktionen beginnt

und deren Notwendigkeit nicht anfangs motiviert, sondern erst hinterher rechtfertigt. Davon, daß nicht auch andere Bilder erdacht werden können, die ebenso mit der Erfahrung stimmen würden, wird kein Schatten eines Beweises geliefert. Es scheint dies ein Fehler zu sein, ist aber vielleicht gerade ein Vorzug, wenigstens für Denjenigen, der die früher auseinandergesetzte Ansicht von dem Wesen jeder Theorie hat. (Nämlich, daß ihre Rechtfertigung nur im erfolgreichen Vergleich mit der Erfahrung liegt. E. B.) Ein wirklicher Fehler der deduktiven Methode besteht dagegen darin, daß der Weg nicht sichtbar wird, auf welchem man zur Auffindung des betreffenden Bildes gelangte. ...“

„Wir haben durch diese Behandlungsweise, welche wir die rein deduktive genannt haben, die Frage nach dem Wesen der Materie, der Masse, der Kraft, freilich nicht gelöst, aber wir haben diese Fragen umgangen, indem wir ihre Voranstellung vollkommen überflüssig gemacht haben. In unserem Gedankenschema sind diese Begriffe ganz bestimmte Zahlen und Anweisungen zu geometrischen Konstruktionen, von denen wir wissen, wie wir sie denken und ausführen sollen, damit wir ein brauchbares Bild der Erscheinungswelt erhalten ... Wir haben durch diese deduktive Methode ebensowenig die Frage nach dem absoluten Raume und der absoluten Bewegung gelöst; allein auch diese Frage hat keine pädagogischen Schwierigkeiten mehr; wir brauchen sie nicht mehr beim Beginn der Entwicklung der mechanischen Gesetze vorzubringen, sondern können sie erst besprechen, wenn wir alle mechanischen Gesetze abgeleitet haben.“

Die praktische Durchführung der Deduktion erfolgt in starkem Gegensatz zu HEINRICH HERTZ, dem man ebenfalls eine deduktive Darstellung der Mechanik verdankt, in der aber auf den Begriff der Kraft verzichtet wird. „Das Bild der Bewegungserscheinungen ist ebenso rein subjektiv wie das von HERTZ entworfene, insofern aber ein Gegenstück zu diesem, als jetzt alles mit von der Entfernung abhängigen anziehenden und abstoßenden Kräften gemacht wird. Freilich wird das Wort ‚Kraft‘ nicht sofort eingeführt. Als Ausgangs-

punkt dient bloß die Vorstellung, ein System von Punkten bewege sich in solcher Weise, daß die Beschleunigung eines jeden aus einer gewissen Anzahl von Komponenten zusammengesetzt ist, die in die Verbindungslinien mit den anderen Punkten fallen und von gegenseitigen Entfernungen abhängen. Die Vergleichung des hierauf gebauten Systems mit der Erfahrung soll auch jetzt wieder nachträglich stattfinden“ schreibt LORENTZ⁸).

In den gleichen Vorlesungen Boltzmanns wird die entgegengesetzte, phänomenologische Darstellungsweise diskutiert: „... indem man unmittelbar von den Tatsachen ausginge, wie sie sich der unbefangenen Beobachtung bieten, aus diesen Tatsachen die Bilder erst allmählich entstehen ließe und jede Abstraktion erst dann einführe, wenn sie auf keine Weise mehr abgewiesen werden kann. Diese letztere Darstellung wollen wir die induktive nennen. Dieselbe hat der deduktiven gegenüber den Nachteil, daß die Bilder von Anfang an nicht so rein hervortreten, daher ihre innere Konsequenz nicht so klar zu übersehen ist. Allein sie hat auch wieder den Vorteil, daß sie an Stelle der abstrakten, von der Wirklichkeit abgekehrten Darstellungsweise der deduktiven Methode eine rein an das unmittelbar Gegebene und Geläufige anknüpfende setzt und möglichst klar erkennen läßt, wie die abstrakten Bilder entstanden sind und warum wir gerade zu diesen Bildern unsere Zuflucht nehmen.“ Diese Darstellungsweise der Mechanik wird von Boltzmann, der der deduktiven Darstellung den Vorrang gibt, zwar nicht wirklich ausgeführt, aber immerhin in großen Zügen skizziert. Er wollte „bloß die Wege andeuten, auf denen eine solche vielleicht gewonnen werden könnte, und namentlich die Schwierigkeiten aufdecken, mit denen ihre Durchführung verknüpft ist“. Er schließt: „... so würde es mich sehr freuen, wenn es Jemandem gelänge, der deduktiven Darstellung eine induktive an die Seite zu stellen, welche gleich einfach und naturgemäß vorginge und doch das innere Bild in gleicher Deutlichkeit und Konsequenz hervortreten ließe Sollten sich aber die Lücken, die sich in meiner gegenwärtigen Darstellung (der induktiven Mechanik

E. B.) finden, nicht ausfüllen lassen, so würde mich auch dies freuen, denn es würde den definitiven Sieg der deduktiven über die induktive Behandlungsweise bedeuten. Ich möchte gewissermaßen die Vertreter der induktiven Richtung einladen, alle Fehler, die sich in meiner gegenwärtigen Darstellungsweise finden, aufzudecken ...“, damit beide Methoden sich im Wettstreit vervollkommen können.

Scharfe Kritik gilt der neu aufgekommenen Richtung der sogenannten Energetik. In der Abhandlung *Ein Wort der Mathematik an die Energetik* (1896) schreibt Boltzmann: „Es glaubten nun in neuester Zeit einige Forscher, ... die Fundamentalsätze (der Physik. E. B.) in viel einfacherer Form aussprechen zu können. Da sie schließlich zur Konsequenz gelangten, daß die Energie das eigentlich Existierende sei, nannten sie sich Energetiker. Wir wissen nicht, ob unsere heutige Naturauffassung die zweckmäßigste ist; daher ist das Streben, einen allgemeineren und höheren Gesichtspunkt als den der heutigen theoretischen Physik zu erreichen, gewiß gerechtfertigt. Die heutigen Energetiker begnügen sich aber keineswegs mit diesem Streben, sondern sie behaupten, daß sie einen solchen höheren Gesichtspunkt bereits erreicht hätten ... welche Behauptung ich im folgenden widerlegen zu können glaube.“ Die freundschaftliche, wenn auch scharfe Polemik behandelt zuerst die Probleme der Mechanik, dann der Wärmetheorie und gipfelt in einer vernichtenden Kritik des Vortrags OSTWALDS, des Wortführers der Energetiker, gegen den „wissenschaftlichen Materialismus“ auf der Lübecker Naturforscherversammlung 1895 (siehe S. 12).

„Ich weiß“, schreibt Boltzmann in der *Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik*, „wie fördernd es ist, die Probleme von den verschiedensten Seiten in Angriff zu nehmen, und mein Herz schlägt warm für jede originelle, begeisterte wissenschaftliche Arbeit. Ich drücke daher der Sezession die Hand. Nur schien mir, daß die Energetik sich oft durch oberflächliche, bloß formale Analogien täuschen ließ, daß ihre Gesetze der in der klassischen Physik üblichen klaren und eindeutigen Fassung, ihre Schlüsse der dort herausgearbeiteten

Strenge entbehrten, daß sie von dem Alten manches Gute, ja für die Wissenschaft Unentbehrliches mit verwarf.“

Die Anschauungen Boltzmanns über die Mechanik sind in den schon wiederholt zitierten *Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik* zusammenfassend niedergelegt. „Es ist der Standpunkt des Axiomatikers, der keine Mühe der Kleinarbeit scheut, um die Grundbegriffe zu klären ... Verglichen mit den systematischen Darstellungen von großartiger Einheitlichkeit, der LAGRANGESchen *mécanique analytique* oder der HERTZschen Mechanik, mutet die Boltzmannsche Methode ... mühsam und wenig elegant an. Aber Eleganz ist gut für den Schneider, soll er einmal gesagt haben. Es ist klar, daß ein so treuer Arbeiter im Weinberg der Mechanik Gegner der sogenannten Energetik sein mußte“, urteilt ARNOLD SOMMERFELD¹⁾.

Die Anwendung der Mechanik auf die mechanische Wärmetheorie und die Begründung der statistischen Mechanik durch Boltzmann, also die Arbeiten, die den Höhepunkt seines Schaffens darstellen, werden in späteren Abschnitten gesondert gewürdigt werden.

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

In bezug auf die Elektrizitätslehre stand Boltzmann seit seinen Studententagen im Banne der wundervollen neuen Theorie des schottischen, in Cambridge lehrenden Physikers JAMES CLERK MAXWELL, eines der führenden Vertreter der Wissenschaft des 19. Jahrhunderts. MAXWELL verband, wie J. G. CROWTHER⁹⁾ in einer interessanten Analyse nachgewiesen hat, in großartiger Weise die Beherrschung der Traditionen der Liebhaber, die zur britischen Wissenschaft in den letzten Jahrhunderten soviel beigetragen hatten, mit dem Verständnis für die Bedürfnisse der industriellen Zivilisation und mit der Bereitschaft, auch die von der neuen Zeit gebotenen Hilfsmittel zu verwenden.

Boltzmann rechnete es seinem Lehrer STEFAN hoch an, daß er — der nach seiner Meinung neben HELMHOLTZ der einzige Physiker des Kontinents war, der die Bedeutung der Elektrizitätslehre MAXWELLS sogleich erkannt hatte — ihm MAXWELLS Abhandlungen in die Hand gab, „und, da ich damals kein Wort Englisch verstand, noch eine englische Grammatik dazu“. Boltzmann übersetzte auch schon als junger Mann eine Schrift MAXWELLS ins Deutsche.

Der Däne OERSTED hatte im Jahre 1820 die Beobachtung gemacht, daß elektrische Ströme Wirkungen auf Magnete ausüben. Von dieser Beobachtung ausgehend, hatten AMPÈRE und andere kontinentale Gelehrte Gesetze über die Wechselwirkung nicht nur von elektrischen Strömen und Magneten, sondern auch von elektrischen Strömen untereinander abgeleitet. Ihre Lehren gründeten sich auf die Annahme einer unmittelbaren Fernwirkung. (Boltzmann sagte: Mehr oder minder haben wir alle die Ideen von den direkt in die Ferne wirkenden magnetischen und elektrischen Fluiden gewissermaßen mit der Muttermilch eingesogen.) Die weitere Entwicklung der Theorie erfolgte aber in England. In den Worten Boltzmanns: „FARADAY und MAXWELL hatten diesen anderen Weg schon angebahnt; sie konnten der ganzen bis dahin üblichen Vorstellung, daß es zwei elektrische Fluida gebe, deren Teilchen in die Ferne aufeinander wirken, und welche, gleichförmig gemischt, sich aufheben, keinen Geschmack abgewinnen, und Letzterer hatte, von ganz anderen Vorstellungen ausgehend, eine neue Theorie der Elektrizität entwickelt. Er nahm an, daß die Elektrizität kein Fluidum, sondern ein Bewegungszustand ist, welcher vom elektrischen Körper auf ein eigentümliches umgebendes Medium, den Lichtäther, übergeht. Letzterer übt dann Kräfte auf die darin eingetauchten Körper aus und erzeugt so den Schein, als ob dieselben direkt in die Ferne auf einander wirkten.“ Die MAXWELLSche Theorie ist also eine Theorie der Nahewirkung und entsprach damit den Auffassungen des der Mechanik zugeneigten Boltzmann viel besser als die alte Theorie. Mit großer Befriedigung stellt Boltzmann in der Vorlesung *Über die Prinzipien*

der Mechanik (1900) fest, daß durch die neuere Entwicklung der Physik von unmittelbaren Fernwirkungen (mit unendlicher Geschwindigkeit) nicht mehr viel übrig geblieben ist. „Es bleibt nur die Gravitation, aber auch hier läßt die Analogie des Wirkungsgesetzes mit dem der elektrostatischen und magnetischen Kräfte die Vermittlung durch ein Medium wahrscheinlich erscheinen.“ Die unmittelbare Fernwirkung der Schwerkraft, die von NEWTON nur unter Widerstreben angenommen worden war, ist bekanntlich 17 Jahre später durch die allgemeine Relativitätstheorie in überraschender Weise beseitigt worden.

Die Begeisterung Boltzmanns über die MAXWELLSche Theorie der Elektrizität hindert ihn keineswegs an der Würdigung der Verdienste ihrer Vorgängerin. In seinem Vortrag über *Statistische Mechanik* (1904) heißt es: „Die Hypothese der elektrischen Fluida ... wurde durch WILHELM WEBER zu hoher Vollendung gebracht, und die allgemeine Anerkennung, welche dessen Arbeiten in Deutschland fanden, stand dort in der Tat dem Studium der MAXWELLSchen Lehre im Wege. Es ist gewiß nützlich, wenn die WEBERSche Theorie für immer als warnendes Beispiel aufgestellt wird, daß man sich die nötige Beweglichkeit des Geistes stets wahren soll. Die Verdienste WEBERS aber werden dadurch sicher nicht geschmälert werden, von dessen Theorie ja MAXWELL selbst mit der größten Bewunderung spricht.“ In seinem Vortrag *Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik* nennt Boltzmann WEBER einen „genialen Forscher“, der sich die „unsterblichsten Verdienste um die Elektrizitätslehre“ erworben hat.

Zunächst wurden in 1873/74 veröffentlichten Untersuchungen Folgerungen nachgeprüft, die sich aus der MAXWELLSchen Theorie ergeben. So stellte diese Theorie, nach der das Licht durch den Elektromagnetismus erklärt wird, eine interessante höchst einfache Beziehung zwischen einer elektrischen und einer optischen Größe auf. Die elektrische Größe ist die sogenannte Dielektrizitätskonstante, deren reziproker Wert die Kraft angibt, mit der

elektrische Ladungen durch einen Isolator hindurch wirken; die optische Größe ist der Brechungsindex, der durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in dem Körper bestimmt ist, nämlich mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Unter gewissen Voraussetzungen ist die Dielektrizitätskonstante gleich dem Quadrat des Brechungsindex.

Boltzmann prüfte diese theoretisch abgeleitete Beziehung sowohl an isolierenden Festkörpern als auch an Gasen experimentell. Die erstere Prüfung erfolgte an den schon in anderem Zusammenhang genannten Schwefelkristallen, die in drei Richtungen des Raumes verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, daher auch verschiedenen Brechungsindex besitzen. Wirklich zeigte die Dielektrizitätskonstante in den verschiedenen Raumrichtungen im Einklang mit der Theorie verschiedene, und zwar die erwarteten Werte.

Die Untersuchungen an den Festkörpern wurden zum Teil sowohl nach einer bekannten Methode, der Kondensatormethode, als auch nach einer neuen, von Boltzmann selbst ersonnenen Methode durchgeführt, die sich auf eine bis dahin nicht näher untersuchte, sondern erst von Boltzmann theoretisch behandelte Erscheinung stützte, nämlich die Anziehung eines Isolators durch eine elektrische Ladung. Der Nachweis, daß die neue Methode die gleichen Ergebnisse wie die alte Methode lieferte, bestätigte gleichzeitig die Richtigkeit des theoretischen Gedankenganges.

Sehr schwierig, aber auch sehr wichtig war die Messung der (sehr wenig von Eins verschiedenen) Dielektrizitätskonstanten von Gasen, die nach der Kondensatormethode ausgeführt wurde. Wenn auch die Effekte an Gasen kleiner sind, so sind die an Gasen erhaltenen Ergebnisse doch leichter deutbar als die an festen Körpern erhaltenen.

Nachdem HERTZ die von MAXWELL postulierten elektromagnetischen Wellen im Jahre 1888 experimentell nachgewiesen hatte, erfand Boltzmann alsbald ein Verfahren, die von den Wellen in größerem Abstand erregten Fünkchen auch einem größeren Audi-

torium sichtbar zu machen und durch eine Interferenzmethode ihre Wellenlänge zu bestimmen.

Doch befaßte sich Boltzmann auch auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre vorwiegend mit theoretischen Fragen. Die MAXWELLSchen Arbeiten wurden gedanklich neu gefaßt und bilden den Gegenstand der berühmten *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichts*, die zwei Bände füllen (1891, 1893). Sie „bieten auch viel Überraschendes“, indem besonders über das Verhältnis von Elektrizitätslehre und Mechanik neuartige Überlegungen angestellt werden¹⁰⁾.

In ihrem Vorwort heißt es bescheiden: „Ein solcher Kärchner, dem die Aufgabe ward, den Weg zum Gebäude zu ebnen, die Fassade zu putzen, vielleicht auch dem Fundamente noch den einen oder anderen Stein einzufügen, will ich sein, und ich bin stolz darauf; denn gäbe es keine Kärchner, wie möchten wohl die Könige bauen? ... Drei Dinge mußte ich da vor allem, wollte ich meinen Zweck erreichen, anstreben: Klarheit, Anschaulichkeit und Kürze.“ Er wollte, wie er an anderer Stelle sagt, nur als Interpret MAXWELLS gelten.

Über die Betrachtungsweise Boltzmanns äußert sich ARNOLD SOMMERFELD¹⁾ in folgender Weise: „Was ist das Wesen der MAXWELLSchen Theorie, hatte HEINRICH HERTZ gefragt; sind es die MAXWELLSchen Gleichungen? Oder sind es die mechanischen Analogien, durch die MAXWELL zu seinen Gleichungen geführt war? Boltzmann beantwortete diese Frage umgekehrt wie HERTZ: Für ihn waren die mechanischen Bilder das Interessanteste. Das zeigen seine Münchner Vorlesungen über MAXWELLS Theorie.“ SOMMERFELD kommt zum Schluß, daß solche Modellbetrachtungen heute nur noch historisches Interesse haben, aber für die Zeit vor 50 Jahren und für Boltzmann äußerst charakteristisch sind. Er meint, daß wir von einem mechanischen Modell der Elektrodynamik keinen wirklichen Nutzen erwarten. Daß freilich derartige Gedanken auch Boltzmann in späterer Zeit nicht fremd waren, daß er vielmehr mit der Entwicklung mitging, zeigt seine Äußerung aus dem Jahre 1902: „Erst in neuerer

Zeit ist dagegen (gegen den Wunsch der Unterordnung der Elektrizitätslehre unter die Mechanik. E. B.) eine Reaktion aufgetreten. Die Schwierigkeiten, welche die rein mechanische Erklärung des Magnetismus und der Elektrizität bot, ließen Zweifel darüber aufkommen, ob alles mechanisch erklärbar sei, und gerade der Elektromagnetismus gewann immer mehr an Wichtigkeit nicht nur für die Praxis, sondern auch für die Theorie. Schließlich wurde seine Macht so groß, daß er sogar den Spieß umzukehren und die Mechanik elektromagnetisch zu erklären suchte. Während man früher Magnetismus und Elektrizität durch eine schwingende oder rotierende Bewegung der kleinsten Teile der Körper zu erklären versucht hatte, so ging man jetzt darauf aus, die Fundamentalgesetze der Bewegung der Körper selbst aus den Gesetzen des Elektromagnetismus abzuleiten“ (siehe S. 46).

Zahlreiche Einzelprobleme der Theorie der Elektrizität wurden von Boltzmann behandelt. Bemerkenswert ist besonders die Theorie des sogenannten HALL-Effektes (Entstehung einer Spannungsdifferenz quer zum Stromfluß bei Einwirkung eines senkrechten Magnetfeldes). „Er zeigte, daß diese Erscheinung sich in der Voraussetzung einer einzigen bewegten Elektrizität in einfachster Weise erklären läßt, und daß man aus der Größe des Effekts die Geschwindigkeit der strömenden Elektrizität ableiten kann. Diese Geschwindigkeit bestimmt nämlich die Kraft, welche durch das äußere magnetische Feld ausgeübt wird und die von HALL entdeckte Erscheinung zur Folge hat. Man kann diese Betrachtung sofort in die Sprache der heutigen Elektronentheorie übersetzen, und wir müssen daher Boltzmann die Ehre geben, zum ersten Male die Geschwindigkeit der einen Strom konstituierenden Elektronenbewegung bestimmt zu haben.“⁸⁾

Eine „wahre Perle der theoretischen Physik“ nennt LORENTZ Boltzmanns Theorie der Abhängigkeit der Strahlungsintensität elektromagnetischer (einschließlich der Licht-)Wellen von der Temperatur (1884). Dieses Gebiet, auf dem sein Lehrer STEFAN die experimentellen Tatsachen mit solchem Erfolg zum nach ihm benannten Strahlungs-

gesetz zusammengefaßt hatte, mußte ja auch Boltzmann interessieren. „Als BARTOLI die Bemerkung gemacht hatte, daß gewisse Erscheinungen bei strahlenden Körpern dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu widersprechen scheinen, sah Boltzmann sofort, wie man einem solchen fatalen Schlusse entgehen kann. Indem er den nach MAXWELLS Theorie von den Strahlen ausgeübten Druck (den P. N. LEBEDEW im Jahre 1901 auch im Versuch nachwies. E. B.) berücksichtigte, gelang es ihm, nicht nur vollständige Übereinstimmung mit dem zweiten Hauptsatz zu erzielen, sondern auch geradezu aus diesem das von STEFAN ausgesprochene Gesetz zu deduzieren, nach welchem die Gesamtstrahlung eines schwarzen Körpers der vierten Potenz der absoluten Temperatur proportional ist.“⁸⁾ Seither heißt dieses Strahlungsgesetz das STEFAN-BOLTZMANNsche Gesetz.

„Die Ableitung des STEFANSchen Gesetzes war der erste große Fortschritt, der seit KIRCHHOFF in der Strahlungstheorie gemacht wurde ... Als dann W. WIEN neun Jahre nachher sein Verschiebungsgesetz¹¹⁾ entdeckt hatte, hatte man es so weit gebracht, wie es überhaupt mit Hilfe der Sätze der Thermodynamik und der allgemeinen elektromagnetischen Theorie möglich war, und war der Punkt erreicht, wo die speziellen Strahlungstheorien, welche auf bestimmten Vorstellungen über den Mechanismus der Erscheinungen beruhen, einzusetzen hatten.“⁸⁾ Diese Vorstellungen wurden bekanntlich durch die schon erwähnte Quantentheorie von MAX PLANCK geliefert.

KINETISCHE THEORIE DER MATERIE

Der Sieg der Atomlehre hat auch den Sieg der mechanischen Wärmetheorie und der kinetischen („Bewegungs“-)Theorie der Materie mit sich gebracht. Diese Theorien wurden in quantitativer Hinsicht

von RUDOLPH CLAUSIUS begründet und von CLERK MAXWELL und HERMANN v. HELMHOLTZ ganz besonders gefördert. Doch war es Boltzmann, der hier wahrhaft grandiose Leistungen vollbracht hat.

Soweit die Materie aus Atomen (beziehungsweise aus Molekülen, die aus Atomen zusammengesetzt sind) besteht, muß ihre Energie hauptsächlich Energie der Atome sein¹²⁾. Nach der mechanischen Theorie der Wärme kann nun die fortschreitende Bewegung der Atome eines „sichtbaren“ Makro-Körpers insofern „geordnet“ sein, als sie nach einer Richtung hin bevorzugt auftritt. Dann bewegt sich der Makro-Körper als ganzer nach dieser Richtung, und seine Energie erscheint zum Teil als gerichtete Bewegungsenergie, die zu direkter Leistung von Arbeit (Überwindung eines Widerstandes) fähig ist. Oder die Bewegung der Atome ist der Richtung nach völlig ungeordnet, regellos. Dann verbleibt der Makro-Körper in Ruhe, und die Bewegung der Atome tritt ausschließlich durch den Wärmeinhalt des Körpers in Erscheinung.

Die kinetische Gastheorie, ein Teilgebiet der kinetischen Materietheorie, befaßt sich im einfachsten Fall mit einatomigen Gasen, also Gasen, deren Atome keine Moleküle bilden, beispielsweise Argon oder Quecksilberdampf. Die Atome solcher Gase sind im Idealfall völlig frei beweglich und besitzen — außer im Augenblick ihrer Zusammenstöße — lediglich kinetische Energie der geradlinigen Fortbewegung, die sogenannte Translationsenergie, aber keine potentielle Energie. Die Moleküle mehratomiger Gase, z. B. von atmosphärischem Sauerstoff, können außerdem rotieren, und ihre Atome können gegeneinander schwingen; ihre Energie besteht daher wie jede Energie schwingender Körper (Pendel!) aus einem kinetischen und einem potentiellen Anteil, also aus Energie der Bewegung und der Lage.

Auch die Atome der Flüssigkeiten und festen Körper weisen kinetische und potentielle Energie auf, und zwar auch dann, wenn sie nicht zu Molekülen zusammentreten. Während aber die Atome bzw. Moleküle der Gase in ihrer Bewegung nur durch die Behälter-

wand begrenzt sind, kommt Flüssigkeiten und Festkörpern infolge Überwiegens der Kohäsion (zusammenhaltender Kräfte) stets ein ganz bestimmtes Volumen zu. Die Größe dieses Volumens hängt allerdings von den Bedingungen, z. B. Druck und Temperatur, ab. Der Unterschied zwischen Flüssigkeiten und Festkörpern schließlich liegt darin, daß die Atome (Moleküle) der ersteren aneinander (wie Regenwürmer, sagt Boltzmann) vorbeikriechen und dabei dauernd ihre gegenseitige Lage ändern, während ideale feste Körper starr sind und ihre Atome (Moleküle) nur schwingen, auch in gewissen Fällen rotieren, sich aber nicht auf die Dauer gegeneinander verschieben. Im Gegensatz zu Flüssigkeiten kommt Festkörpern daher nicht nur ein bestimmtes Volumen, sondern auch eine bestimmte Gestalt zu.

Die sogenannte Temperatur ist ausschließlich durch die Bewegung der Atome innerhalb des Körpers bestimmt. Je lebhafter sie sich bewegen, umso heißer ist der Körper, und zwar ist die mittlere Bewegungsenergie der Atome aller einatomigen Gase bei gleicher Temperatur stets die gleiche, und nimmt der Kelvin-Temperatur (Temperatur von minus 273 Grad Celsius, also vom sogenannten absoluten Nullpunkt an gerechnet) proportional zu. Auch für andere Zustandsformen der Materie leitet die mechanische Wärmetheorie einfache Gesetze ab. Auf der Grundlage dieser Theorie ist auch leicht verständlich, wieso bei der Reibung von Makro-Körpern Bewegungsenergie in Wärme übergeht: Die Bewegung der Atome, die in bewegten Makro-Körpern eine Resultierende nach einer Richtung ergibt, geht in völlig ungeordnete Bewegung der Atome im Inneren der reibenden Körper über. Dabei bleibt nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie, das hier als „erster Hauptsatz der Thermodynamik“ ausgesprochen wird, die Gesamtmenge an Energie erhalten.

Mit Hilfe der kinetischen Theorie wurden die wichtigsten Eigenschaften besonders der Gase, z. B. ihr Druck und ihre spezifische Wärme, erfolgreich quantitativ berechnet. MAXWELL befaßte sich außerdem mit dem Problem der Verteilung der Energie über die einzelnen Atome eines Gases im Gleichgewichtszustand, und gab für

einen Sonderfall eine einfache Lösung. Boltzmann knüpfte an diese Arbeiten an und löste das Problem in voller Allgemeinheit.

Obwohl nämlich die mittlere (durchschnittliche) Energie der Atome eines Gases durch seine Temperatur festgelegt ist, ist die Energie der einzelnen Atome durchaus nicht gleich. Die Atome stoßen ja in ihrer heftigen Bewegung überaus häufig (z. B. jedes Atom in Wasserstoff von Zimmertemperatur und Atmosphärendruck größenordnungsmäßig zehnmilliardenmal in der Sekunde) zusammen und tauschen bei diesen Zusammenstößen miteinander Energie aus. Manche Atome werden „zufällig“ nach einem Stoß mehr Energie besitzen, als ihnen nach dem Durchschnittswert zukommt, während andere Atome „benachteiligt“ werden. Freilich ändert sich die Verteilung der Energie in jedem Augenblick, und ein Atom, das in einem Zeitpunkt zu wenig Energie hatte, kann später zu viel Energie haben.

Die Berechnung der Lagen und Geschwindigkeiten der Trillionen Einzel-Atome eines Makro-Körpers ist natürlich völlig unmöglich. Aber gerade weil die Zahl der Atome so riesenhaft ist, kann man Durchschnittswerte berechnen. Dies ist möglich, weil man auf das Verhalten der Atome ebensogut und noch viel besser die „Gesetze der großen Zahlen“ (der „Statistik“) anwenden kann, wie etwa auf die Bevölkerungsbewegung eines großen Landes. Geradeso wie man zwar nicht voraussehen kann, welche Einzelmenschen im nächsten Jahre sterben werden, aber doch mit guter Genauigkeit sagen kann, wie viele es sein werden, kann man Aussagen über das durchschnittliche Schicksal der Atome machen.

Boltzmann bestimmte als Erster in voller Allgemeinheit die Häufigkeit von Atomen mit bestimmter Energie. Er bestimmte also, welcher Teil der Atome eines unter bestimmten Bedingungen gehaltenen Gases einen Energiegehalt aufweist, der zwischen vorgegebenen unteren und oberen Grenzen liegt. Diese Häufigkeitsverteilung entspricht einer Kurve, die in der Nähe des Mittelwerts des Energiegehalts der einzelnen Atome ein Maximum aufweist und nach beiden Seiten rasch abfällt (Maxwell-Boltzmann-Verteilung). Es

ist also unwahrscheinlich, daß ein Atom sehr viel mehr oder sehr viel weniger als die mittlere Energie aufweist. Die Berechnung gilt übrigens auch für aus Molekülen bestehende Gase, für Gasgemische und für Gase, auf die ein äußeres Kraftfeld, z. B. ein Schwerfeld, wirkt.

Offenbar besteht dann ein Gleichgewichtszustand, wenn die gas-kinetische Rechnung ergibt, daß keine zeitliche Änderung der Häufigkeit zu erwarten ist. Dieses Gleichgewicht ist freilich nicht dadurch bedingt, daß in dem System überhaupt nichts geschieht; vielmehr dadurch, daß jeder mögliche Zustand der Atome in bezug auf Lage und Energie in jeder Zeiteinheit im Mittel von gleich vielen Atomen angenommen und andererseits wieder verlassen wird.

Boltzmann studierte neben den „idealen Gasen“, deren Verhalten nur durch Idealisierung aus dem der wirklichen, der „realen“ Gase abzuleiten ist, und die sich durch besondere Einfachheit auszeichnen, auch die letzteren. Man findet bessere Übereinstimmung mit der Erfahrung, wenn man die idealen Gasgesetze dadurch abändert, daß man das Eigenvolumen der Atome und ihre gegenseitige Anziehung berücksichtigt, was durch eine berühmte Gleichung von VAN DER WAALS geschehen kann. Auch auf andere als gasförmige Körper wurden aus der kinetischen Theorie wichtige Schlüsse gezogen. So befaßte sich Boltzmann mit dem Dampfdruck von Flüssigkeiten und mit dem „osmotischen“ Druck von in Flüssigkeiten gelösten Körpern, der bekanntlich auch in lebenden Systemen eine ganz besondere Rolle spielt. Diese Arbeiten wurden von Boltzmanns Schüler JÄGER fortgeführt. Auch auf Flüssigkeiten und Festkörper konnte Boltzmann seine Überlegungen ausdehnen.

Probleme der chemischen Verbindung und Dissoziation, z. B. der Reaktion $\text{Jod} + \text{Wasserstoff} \rightleftharpoons \text{Jodwasserstoff}$, wurden ebenfalls quantitativ behandelt. Die Rechnungen Boltzmanns führen zu dem für die chemische Gleichgewichtslehre grundlegenden, schon früher aufgefundenen „Massenwirkungsgesetz“. Dabei wurde der interessante Gedanke gefaßt, daß Atome bloß nach bestimmten räumlichen Richtungen hin reaktionsfähig sein können, also auf ihrer Ober-

fläche „empfindliche Bezirke“ bestehen. Dieser Gedanke hat sich später in der Lehre von der Reaktionsgeschwindigkeit (Reaktionskinetik) als sehr fruchtbar erwiesen.

Schließlich lieferte Boltzmann mit den Mitteln der gaskinetischen Methode unter Verwendung von Näherungsrechnungen wesentliche Beiträge zu den so viel schwierigeren Problemen der Verteilung der Energie über die Atome in „Nicht-Gleichgewichts-Zuständen“. Das sind also Zustände, bei denen im betrachteten System ein ständiger, einseitig gerichteter Transport von Stoff oder Energie stattfindet. Zu den behandelten Problemen gehörten die Diffusion, die Wärmeleitung und die innere Reibung (Viskosität) der Gase.

STATISTISCHE MECHANIK

Besonders in späteren Jahren ging Boltzmann gerne zu einer bemerkenswerten statistischen Methode über, die zwar an das Abstraktionsvermögen des Forschers große Anforderungen stellt, aber ungemein leistungsfähig ist. Diese Methode wurde unabhängig von Boltzmann, aber später, auch von dem genialen WILLARD GIBBS ausgearbeitet, von diesem besonders systematisch behandelt und als „statistische Mechanik“ bezeichnet*). Im Rahmen dieser Methode wird zunächst nicht das Verhalten der Atome innerhalb eines einzigen Makro-Körpers behandelt, sondern man betrachtet gedanklich eine unendliche Vielheit (eine „Menge“ oder ein „Ensemble“) von Körpern (Systemen). Diese sollen zwar unter sich in bestimmter Hinsicht übereinstimmen, z. B. in materieller Zusammensetzung, räumlicher Gestalt und Gesamtenergie (daher Temperatur), in anderer Hinsicht aber nicht, z. B. in der räumlichen Verteilung der Atome oder in der Verteilung der Energie über die Atome. Dann kann man wieder

*) Der Leser kann diesen Unterabschnitt überschlagen, ohne deshalb das Verständnis für die weiteren Ausführungen zu verlieren.

eine statistische Häufigkeitsverteilung ermitteln. Bei dieser wird aber zunächst nicht wie im Rahmen der gaskinetischen Untersuchung die Verteilung der Energie über die Atome eines Systems und die räumliche Verteilung dieser Atome, sondern die Verteilung der Systeme über die Zustände — charakterisiert durch bestimmte räumliche und Energieverteilung — innerhalb eines Ensembles angegeben. Man berechnet also nicht die Häufigkeit der Atome bestimmter Energie in einem System, sondern die Häufigkeit von Systemen bestimmter räumlicher und Energieverteilung in einem Ensemble.

Der Nutzen des Verfahrens der statistischen Mechanik liegt darin, daß Berechnungen von Gleichgewichtszuständen des Ensembles relativ leicht durchführbar sind. Sie kann ja auf modellmäßige Vorstellungen, auf welche Weise z. B. die Energieübertragung erfolgt, verzichten. Beispielsweise ergibt sich die nach dem gaskinetischen Verfahren nur mit großer Schwierigkeit erhaltene Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Energie über die Atome eines Gases in viel einfacherer und eleganterer Weise, wenn man jene Häufigkeitsverteilung der Systeme innerhalb des Ensembles aufsucht, die im Gleichgewicht herrscht. Berechnungen über Flüssigkeiten und Festkörper, wo die Atome in intensiver Wechselwirkung stehen, sind oft überhaupt nur nach dem Verfahren der statistischen Mechanik möglich. Hingegen kann die statistische Mechanik im Gegensatz zur Kinetik ihrem Wesen nach über die Geschwindigkeit von Zustandsänderungen keinen Aufschluß geben.

Für die praktische Durchführung ihrer Rechnungen bedient sich die statistische Mechanik zunächst des sechsdimensionalen „Phasenraums“ oder μ -Raums, dessen Koordinaten aus den drei Koordinaten der Lage im gewöhnlichen Raum sowie den drei Komponenten des Impulses nach den Richtungen dieses Raums bestehen. Daraus abgeleitet ist der sogenannte γ -Raum, zu dem jedes Teilchen eines Systems gesondert die genannten sechs Koordinaten beiträgt, der also z. B. für eine Trillion Atome sechs Trillionen Koordinaten zählt. Benachbarte Punkte des γ -Raums entsprechen „benachbarten“ Zu-

ständen des Systems. Die Zustandsänderung eines Systems wird durch eine Bahn eines einzigen Punktes in diesem γ -Raum dargestellt.

Die klassische Statistik Boltzmanns wurde in den Zwanzigerjahren unseres Jahrhunderts von FERMI, DIRAC, BOSE und EINSTEIN für Anwendungsgebiete modifiziert, die von der Quantentheorie beherrscht werden. „Die heutige Quantenphysik hat also in der Boltzmannschen Statistik ihren Ursprung.“⁽¹³⁾

Der entscheidende Unterschied zwischen der Quantenstatistik und der klassischen Boltzmannschen Statistik besteht darin, daß nach der neuen Statistik Zustände, die sich nur dadurch unterscheiden, daß Elementarteilchen gleicher Art (z. B. Elektronen) ihre Lagen vertauschen, nicht mehr gesondert gezählt werden. Es werden also z. B. die beiden Zustände, die sich nach Boltzmann dadurch ergeben, daß einerseits das Teilchen 1 die Lage A, das gleichartige Teilchen 2 die Lage B einnimmt, andererseits aber das Teilchen 1 die Lage B, das Teilchen 2 die Lage A, zu einem einzigen Zustand zusammengefaßt. Die Zahl der Möglichkeiten der Realisierung dieser Konfiguration (ursprünglich: beider Konfigurationen) — die ganz bestimmte einheitliche physikalische Eigenschaften hat — ist also auf die Hälfte herabgesetzt. Diese Forderung der Quantentheorie wird anschaulich, wenn man sich vorstellt, daß es durch kein Mittel möglich sein soll, zwischen mehreren Teilchen gleicher Art zu unterscheiden, daß man also auch individuelle Teilchen nicht wiedererkennen kann.

Diese Entwicklung konnte von Boltzmann natürlich nicht vorausgesehen werden. Immerhin ist äußerst bemerkenswert, daß Boltzmann in den *Vorlesungen über die Prinzipie der Mechanik* als Erster darauf aufmerksam machte, daß die Wiedererkennbarkeit eines individuellen Teilchens keine Selbstverständlichkeit ist, sondern der empirischen Verifizierung bedarf: „Jedenfalls soll man ... die Elemente, von denen man ausgeht, nicht bloß unbestimmt andeuten, sondern ebenso aufrichtig und klar präzisieren, wie ich dies hier versuche. Wir wollen nun unser Bild weiter ausführen dadurch, daß

wir uns bestimmte Gesetze für die Ortsveränderung aller dieser materiellen Punkte mit der Zeit fingieren. Annahme 1. Wir stellen uns vor, daß zur selben Zeit niemals zwei verschiedene materielle Punkte zusammenfallen, respektive unendlich nahe aneinander liegen, daß dagegen jedesmal, wenn sich zu irgendeiner Zeit irgendein materieller Punkt an irgendeinem Orte (natürlich relativ gegen unser Koordinatensystem) befindet, dann zu einer unendlich benachbarten Zeit sich ebenfalls ein und nur ein materieller Punkt an einem dem ersteren Orte unendlich benachbarten Orte befindet. Wir sagen, der letztere materielle Punkt ist derselbe wie der erstere und nennen dies das Gesetz der Kontinuität der Bewegung. Es gibt uns allein die Möglichkeit, denselben Punkt zu verschiedenen Zeiten wiederzuerkennen. Den Inbegriff aller Orte, an denen sich ein und derselbe materielle Punkt im Verlauf aller Zeiten befindet, heißt die Bahn dieses materiellen Punktes, der Inbegriff derjenigen Orte, welche er während einer endlich begrenzten Zeit durchlief, heißt der Weg während dieser Zeit. Wir können das Gesetz der Kontinuität auch so formulieren: Jedem materiellen Punkte, der zu einer gewissen Zeit gewisse Koordinaten hatte, entspricht zu einer unendlich wenig verschiedenen Zeit ein materieller Punkt mit je unendlich wenig verschiedenen Koordinaten, welcher derselbe materielle Punkt heißt, d. h. die Koordinaten jedes materiellen Punktes sind kontinuierliche Funktionen der Zeit.“

Dazu äußert sich E. SCHRÖDINGER¹⁴⁾: „Niemand hat vor Boltzmann für nötig gehalten, zu definieren, was man unter demselben materiellen Punkt versteht. Daß diese logische Klarheit — damals unbeachtet und unbesehen, ja vielleicht sogar als logische Tüftelei¹⁵⁾ betrachtet — von dem überzeugtesten Vertreter der Atomistik ausgeht, ist besonders interessant ... Die Wichtigkeit des Abgehens von Boltzmanns Axiom Nr. 1 (im Hinblick auf die Nicht-Identifizierbarkeit einzelner Elementarteilchen nach der Quantentheorie. E. B.) ist meines Erachtens nicht hinreichend gewürdigt, weil eben die meisten Physiker unserer Tage dem Boltzmann in logischem Denken

nicht das Wasser reichen, ja es in der Sintflut des Formelkrams recht eigentlich zu verlernen beginnen.“

WAHRSCHEINLICHKEIT UND ENTROPIE

Wir haben festgestellt, daß mit den Mitteln der Statistik die im Gleichgewicht herrschende räumliche Verteilung der Atome und die Verteilung der Energie über sie in einem System berechnet werden kann. (Hier handelt es sich mit den Worten Boltzmanns um ein Problem der „Statistischen Statik“.) Wodurch ist nun diese Gleichgewichtsverteilung gekennzeichnet? Wie unterscheidet sie sich von anderen möglichen Verteilungsarten der Atome im gleichen System?

Hier verdanken wir Boltzmann die ebenso grundlegende wie einfache Antwort: Die Gleichgewichtsverteilung ist die wahrscheinlichste Verteilung. Die Verteilung kommt ja, wenn man von einem Zustand fehlenden Gleichgewichts ausgeht, dadurch zustande, daß die Atome durch ihre überaus häufigen zufälligen Stöße aufeinander Energie übertragen. Durch das Wirken des blinden Zufalls wird sich also allmählich diejenige Verteilung einstellen, die die größte Wahrscheinlichkeit besitzt. Da jedes Makro-System eine enorme Zahl von Atomen enthält, dürfen wir nach dem Gesetz der großen Zahlen erwarten, daß sich der wahrscheinlichste Zustand tatsächlich verwirklicht. Der Gleichgewichtszustand ist also kein besonderer „singulärer“ Zustand, sondern derjenige Zustand, der in der vielfältigsten Weise erreicht werden kann.

Um dies durch einen Vergleich zu veranschaulichen: Wenn wir mit einem Würfel werfen, so dürfen wir mit gleicher Wahrscheinlichkeit alle Zahlen zwischen 1 und 6 erwarten. Werfen wir aber mit zwei Würfeln gleichzeitig, so sind zwar alle Würfe zwischen 2 und 12

möglich, aber am häufigsten werden Würfe von 7 auftreten, weil die Zahl der Kombinationen der Augen, die jeder der beiden Würfel zeigt, für diese Zahl am größten ist: Man kann 7 durch die Kombinationen $1 + 6, 2 + 5, 3 + 4, 4 + 3, 5 + 2, 6 + 1$ erhalten, während z. B. 12 nur durch eine einzige Augenkombination ($6 + 6$) erhalten wird. Offenbar prägt sich die Bevorzugung gewisser Ergebnisse umso stärker aus, je mehr Würfel wir für unseren Versuch nehmen, obwohl jeder Würfel, für sich allein betrachtet, nach wie vor mit gleicher Wahrscheinlichkeit alle Ergebnisse zwischen 1 und 6 geben kann.

In ähnlicher Weise bildet sich, um einen einfachen Fall zu wählen, in einem Gas mit seinen Trillionen Atomen mit an Gewißheit grenzender Wahrscheinlichkeit von selbst jene Verteilung aus, die unter den gegebenen Verhältnissen durch die meisten Kombinationen hergestellt werden kann. Diese Verteilung entspricht völliger Unordnung, also z. B. bei einem aus verschiedenen Atomarten bestehenden Gas vollständiger Durchmischung.

Nach der statistischen Betrachtung Boltzmanns besteht also der Übergang eines „Ungleichgewichts“ in ein Gleichgewicht — der Gegenstand der „statistischen Dynamik“ — in einem Übergang von einem weniger wahrscheinlichen Zustand in den Zustand größter Wahrscheinlichkeit. Sobald das Gleichgewicht einmal hergestellt ist, ändert sich am Zustand des Systems, wenn es gegen äußere Einwirkungen geschützt ist, also ein „abgeschlossenes“ System ist, im allgemeinen nichts mehr. Der Vorgang ist also durchaus einseitig, nicht-umkehrbar, irreversibel. Es ist etwa in Gasen im allgemeinen zwar ein spontaner Übergang von Ordnung in Unordnung, nicht aber von Unordnung in Ordnung möglich.

Diese Irreversibilität ist z. B. der früher besprochenen, älteren analytischen Mechanik starrer Körper fremd. In den Systemen, auf die ihre Methoden angewendet werden können, ist eine Rückkehr zu früheren Zuständen des Systems durchaus möglich, wenn die Systeme insofern idealisiert werden, als von Reibungsvorgängen abgesehen wird. Die Reibungsvorgänge fallen aber nicht mehr in

den Rahmen der analytischen Mechanik. Beispielsweise kann die Rotation der Planeten um die Sonne durch lange Zeiträume weitergehen, und dabei werden immer wieder die gleichen Konstellationen des ganzen Planetensystems auftreten. Die mechanischen Systeme sind also in hervorragender Annäherung zu „Kreisprozessen“ befähigt, bei denen sie immer wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren. Auf Erden wäre ein reibungsloses Pendel ein Beispiel eines sich völlig reversibel verändernden Systems: Abwechselnd geht potentielle Energie vollständig in kinetische Energie über, und umgekehrt. Die Mechanik starrer Körper kann Vorgänge erfolgreich als reversibel behandeln, weil Systeme, die aus einer nur geringen Zahl unabhängig beweglicher Massen bestehen, keine Zustände wesentlich größerer oder kleinerer Wahrscheinlichkeit einnehmen können.

Bei der Irreversibilität (Einseitigkeit) setzen nun die tiefsten Gedanken Boltzmanns an. „Niemand, auch nicht MAXWELL und GIBBS, hat so tief über die Einseitigkeit der Naturvorgänge und ihre wahrscheinlichkeits-theoretische Begründung nachgedacht wie Boltzmann.“¹⁾ Boltzmann fand schon im Alter von 22 Jahren die Verbindung zwischen der Einseitigkeit der Naturvorgänge, die sich aus der Molekular-Statistik ergibt, und der Einseitigkeit gewisser thermischer Vorgänge, die man zwar schon lange beobachtet, deren Wesen man aber nicht wirklich verstanden hatte. „Indem Boltzmann die Abzählmethoden der physikalischen Statistik entwickelte und mit ihrer Hilfe den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ganz allgemein begründen konnte, hatte er der Physik neue Grundlagen von ganz ungeahnter Tragweite gegeben.“¹³⁾

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist eine gegenseitige Umwandlung von Arbeit (Bewegungsenergie von Makro-Körpern) und Wärme möglich, wenn eine der geleisteten Arbeit entsprechende Wärmemenge entsteht, und umgekehrt. Dabei sind, um gebräuchliche Maßsysteme zu wählen, jeweils 427 Meter-Kilogramm einer Kilogramm-Kalorie gleichwertig. Bei der Betrachtung der in

der Natur auftretenden Vorgänge bemerken wir jedoch, daß man zwar unbeschränkt Arbeit in Wärme umwandeln kann, daß aber eine Umwandlung von Wärme in Arbeit nur beschränkt erfolgt. Derartige Prozesse sind also nur teilweise reversibel, in vielen Fällen sogar völlig irreversibel. Beim Bremsen eines Kraftwagens geht Arbeit in Wärme über, d. h. die Bremse wird heiß. Aber niemals kann man durch eine heiße Bremse einen Kraftwagen in Betrieb setzen, also den Vorgang umkehren. Ein Schiff erwärmt durch die mechanische Energie der Schraube den Ozean; aber man kann kein Schiff durch Meereswärme antreiben.

Derartige Maschinen würden zwar offenbar den ersten Hauptsatz der Thermodynamik nicht verletzen, daher kein sogenanntes „Perpetuum mobile erster Art“ darstellen. Sie könnten aber doch (z. B. im System Schiff plus Ozean) unbegrenzt laufen, würden also praktisch die Dienste eines Perpetuum mobile leisten. Eine solche Maschine wird daher als Perpetuum mobile zweiter Art bezeichnet, und ihre Unmöglichkeit bildet den Gegenstand des von CLAUSIUS und THOMSON aufgestellten zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Der zweite Hauptsatz ist ebenso wie der erste Hauptsatz „bloß“ der Erfahrung entnommen. „Der sicherste aller Erfahrungssätze, die wir kennen, sicherer als der Tod, denn der Tod ist nur ein Spezialfall des zweiten Hauptsatzes“¹⁰⁾.

Ein wichtiges Beispiel eines Systems, in dem Wärme zur Arbeitsleistung herangezogen wird, besteht aus zwei „Bädern“ von verschiedener Temperatur. Z. B. in der Dampfmaschine sind diese Bäder einerseits die Feuerung, andererseits das Kühlwasser. Der Ausgleich der Temperatur kann der Arbeitsleistung dienen, wenn er — wie dies in der Dampfmaschine in bestimmter Annäherung geschieht — „reversibel“ geführt wird. Dann wandelt sich ein Teil der Wärme in Arbeit um. Nachdem aber die Temperatur ausgeglichen ist, ist das System derart verändert, daß es seine Arbeitsfähigkeit verloren hat. Die (volle) Reversibilität drückt sich darin aus, daß die gewonnene Arbeit genau hinreicht, um mit Hilfe einer — ebenfalls

ideal arbeitenden — Kältemaschine oder Wärmepumpe die ursprünglichen beiden Wärmebäder wiederherzustellen, also einen Kreisprozeß durchzuführen. In der Wirklichkeit verläuft die Umwandlung von Wärme in Arbeit niemals streng reversibel.

Aus dem zweiten Hauptsatz folgt nun natürlich, daß aus einem einheitlichen Wärmebad nicht von selbst zwei Bäder verschiedener Temperatur entstehen können, deren Temperaturdifferenz man dann zur Arbeitsleistung heranziehen könnte. Im Gegenteil, Temperaturdifferenzen gleichen sich (durch Wärmeleitung und -strahlung) auch dann von selbst aus, wenn dabei überhaupt keine Arbeit geleistet wird, der Vorgang also arbeitslos oder, wie man auch sagt, „vollständig irreversibel“ verläuft. Ein Beispiel eines irreversiblen Vorganges ist die direkte Mischung zweier Bäder verschiedener Temperatur.

Um die Aussagen des zweiten Hauptsatzes zahlenmäßig fassen zu können, hatte CLAUSIUS eine von ihm als Entropie (S) bezeichnete Funktion ersonnen. Die Entropievermehrung ΔS eines Körpers bei konstanter Temperatur ist für reversible Veränderungen in einfacher Weise durch den Bruch definiert, in dessen Zähler die zugeführte Wärmemenge ΔQ und in dessen Nenner die Kelvin-

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Temperatur T steht, bei der die Zufuhr erfolgt. Nach CLAUSIUS kann nun in abgeschlossenen Systemen die Entropie bestenfalls konstant bleiben, nämlich dann, wenn in ihnen ausschließlich reversible Vorgänge ablaufen, das System also z. B. aus einer idealen Wärmekraftmaschine besteht. In einer solchen Maschine wird die Entropiezunahme eines Teils des Systems genau durch die Entropieabnahme eines anderen Teils kompensiert. Die gesamte Entropie nimmt jedoch zu, wenn in dem System wenigstens teilweise irreversible Vorgänge vor sich gehen; sie kann keinesfalls von selbst ab-

nehmen. Die Entropie ist also offenbar eine Größe, die in dem Maß anwächst, als das System durch irreversible Vorgänge seine Arbeitsfähigkeit verliert. Sie verhält sich beim Ablauf der Zeit einseitig.

Natürlich sind auch die Lebensvorgänge von der Fähigkeit der Materie zur Arbeitsleistung abhängig. So sagte Boltzmann in seinem Vortrag über den *Zweiten Hauptsatz der Mechanischen Wärmetheorie* (1886): „Der allgemeine Lebenskampf der Lebewesen ist daher nicht ein Kampf um die Grundstoffe — die Grundstoffe aller Organismen sind in Luft, Wasser und Erdboden im Überfluß vorhanden —, auch nicht um Energie, welche in Form von Wärme, leider unverwandelbar, in jedem Körper reichlich vorhanden ist, sondern ein Kampf um die Entropie (genauer: negative Entropie, E. B.), welche durch den Übergang der Energie von der heißen Sonne zur kalten Erde disponibel wird. Diesen Übergang möglichst auszunutzen, breiten die Pflanzen die unermeßlichen Flächen ihrer Blätter aus und zwingen die Sonnenenergie in noch unerforschter Weise, ehe sie auf das Temperaturniveau der Erdoberfläche herabsinkt, chemische Synthesen auszuführen, von denen man in unseren Laboratorien noch keine Ahnung hat. Die Produkte dieser chemischen Küche bilden das Kampfobjekt für die Tierwelt.“⁽¹⁶⁾

„Unter allen Physikern der damaligen Zeit war Ludwig Boltzmann derjenige, der den Sinn der Entropie am tiefsten erfaßt hatte.“^(2,17) Boltzmann hat nun durch den berühmtesten seiner Lehrsätze, das sogenannte H-Theorem, die logische und quantitative Verbindung zwischen der Einseitigkeit der Thermodynamik und der Einseitigkeit der statistischen Mechanik hergestellt. Er fand eine eindeutige Beziehung zwischen der Entropie, die die Einseitigkeit der Makro-Welt kennzeichnet, und der Wahrscheinlichkeit, die die Einseitigkeit der Mikro-Welt kennzeichnet. Diese Beziehung kann nach PLANCK^(1,18) in die einfache Gleichung gefaßt werden, die wir, wie erwähnt, auf Boltzmanns Grabmal finden:

$$S = k \log W.$$

S bedeutet den Zahlenwert der Entropie, W den der Wahrscheinlichkeit und k eine universelle Konstante, deren Zahlenwert bestimmt wurde. Diese Konstante ist als Boltzmannsche Konstante bekannt.

Daß gerade eine logarithmische Funktion Entropie und Wahrscheinlichkeit verbindet, läßt sich qualitativ verständlich machen. Die Entropie ist eine additive Funktion, insofern als man z. B. zwei gleichen Körpern, deren Entropie man durch Wärmezufuhr bei bestimmter Temperatur im gleichen Maß steigern will, einfach doppelt soviel Wärme zuführen muß als einem einzigen Körper. Dagegen ist die Wahrscheinlichkeit eine multiplikative Funktion. Wenn beispielsweise für den Sechserwurf eines Würfels eine bestimmte Wahrscheinlichkeit ($1/6$) besteht, so besteht für den gleichzeitigen Sechserwurf zweier Würfel bekanntlich eine Gesamtwahrscheinlichkeit, die dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten gleich ist, in unserem Falle also $(1/6) \times (1/6) = (1/36)$. Der sich aus der Theorie Boltzmanns ergebenden Anforderung, daß die gesuchte Funktion der Wahrscheinlichkeit im gleichen Maß wie die Entropie zunehmen muß, genügt die Logarithmus-Funktion; durch Logarithmieren werden ja Produkte in Summen verwandelt.

Oft war früher gegen die mechanische Wärmetheorie der Einwand erhoben worden, daß die Gesetze der analytischen Mechanik, denen doch die einzelnen Atome gehorchen sollen, die Einseitigkeit nicht kennen, die für die Thermodynamik so bezeichnend ist. Durch die Zurückführung der Entropiezunahme auf den Übergang von Unwahrscheinlichkeit in Wahrscheinlichkeit hat Boltzmann den „Widerspruch zwischen Thermodynamik und Mechanik gemeistert“⁽¹⁾. Die Bedeutung der Boltzmannschen Erkenntnis erschöpft sich aber nicht in der nachträglichen Erklärung der Entropiezunahme, sondern mit Hilfe des neuen Verständnisses des Verhältnisses von Thermodynamik und Atomistik lassen sich die wichtigsten Vorhersagen machen.

Die neue, statistische Definition der Entropie ist schon vom praktischen Standpunkt aus insofern wertvoller als die ursprüngliche

thermodynamische Definition, die nur den Makro-Zustand berücksichtigt, als nun auch Systemen, die das innere Gleichgewicht nicht erreicht haben, die sich also nicht im stationären Zustand befinden, der jeweils richtige Entropiewert zugeschrieben werden kann. Ganz allgemein geht die atomistische Erkenntnis tiefer als die thermodynamische, phänomenologische Erkenntnis. In vieler Hinsicht erinnert übrigens der Gegensatz zwischen statistischer und thermodynamischer Betrachtungsweise an jenen zwischen „deduktiver“ und „induktiver“ Betrachtung, der bei der Diskussion der analytischen Mechanik geschildert wurde.

Nicht alle Zeitgenossen würdigten Boltzmanns Leistung. Im *Wort der Mathematik an die Energetik* (1896) war Boltzmann zu der Polemik gezwungen: „Herr OSTWALD schließt aus dem Umstand, daß man in den mechanischen Differentialgleichungen, ohne sie sonst zu ändern, das Vorzeichen der Zeit umkehren kann, daß die mechanische Weltauffassung nicht erklären könne, warum in der Natur die Vorgänge sich immer mit Vorliebe in einem bestimmten Sinne abspielen. Dabei scheint mir übersehen zu sein, daß die mechanischen Vorgänge nicht bloß durch die Differentialgleichungen, sondern auch durch die Anfangsbedingungen bestimmt sind. Im direkten Gegensatz zu Herrn OSTWALD habe ich es als eine der glänzendsten Bestätigungen der mechanischen Naturanschauung bezeichnet, daß dieselbe ein außerordentlich gutes Bild von der Dissipation der Energie liefert, sobald man annimmt, daß die Welt von einem Anfangszustand ausging, der bestimmte Bedingungen erfüllt, und den ich dort als einen unwahrscheinlichen Zustand bezeichnete.“

Ein anderer Gegner war ERNST MACH, der dem Urteil WALDS zustimmte, „wenn es gelang, Molekularhypothese und Entropie in Einklang zu bringen, so ist das ein Glück für die Hypothese, aber nicht für den Entropiesatz“. ¹⁰⁾ Wir pflichten heute gewiß lieber dem entgegengesetzten Urteil eines der bedeutendsten Schüler Boltzmanns bei: „Das Ergebnis dieser Untersuchung, der Satz, daß die Entropie dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit proportional ist,

ist einer der allertiefgehendsten, schönsten Sätze der theoretischen Physik, ja der gesamten Naturwissenschaften.“¹⁹⁾

SCHWANKUNGSERSCHEINUNGEN UND „WÄRMETOD“

Die ständig sich vor unseren Augen abspielende Zunahme der Entropie, also Entwertung der Energie, hatte CLAUSIUS auf den Gedanken des „Wärmetodes“ geführt. Es wurde angenommen, daß die arbeitsfähigen Energieformen unerbittlich in die Wärmeform, also in die Form der ungeordneten Molekularbewegung übergehen, wobei die Temperaturdifferenzen sich ausgleichen. Selbst die Bewegungsenergie der Sterne verwandelt sich — äußert langsam — durch Reibung an interstellarer Materie und durch Gezeiten in Wärme. Das Naturgeschehen wird, wie Boltzmann sagt, immer matter. Die Welt soll sich gewissermaßen dem Zustand eines lauen Bades nähern, in dem Arbeitsleistung nicht mehr möglich ist. Die Welt versinkt damit in einen ewig unveränderlichen ereignislosen Zustand, eben den Zustand des Wärmetodes. In statistischer Betrachtung entspricht der Wärmetod dem Zustand maximaler Wahrscheinlichkeit der ganzen Welt.

Auch Boltzmann hat ebenso wie andere große Forscher der Frage des Wärmetodes seine Gedanken gewidmet. Vor allem drängt sich die Frage auf, warum der Wärmetod, wenn ihm die Welt wirklich unaufhaltsam zusteuert, nicht schon längst erreicht wurde, warum also in unserer Welt Arbeitsleistungen und daher auch Lebenserscheinungen überhaupt noch möglich sind.

Verschiedene Versuche wurden gemacht, Licht auf dieses dunkle Problem zu werfen. So wird heute betont, daß die gesicherte Tatsache der Bildung neuer Sterne mit riesigem Gehalt an arbeitsfähiger Energie (woher?) darauf hinweist, daß selbst im Rahmen der Milchstraße physikalische Vorgänge größten Ausmaßes ablaufen, die wir durch die bekannten Gesetze der Physik bisher gar nicht deuten

können. Übrigens war offenbar auch Boltzmann, da er im Nachruf auf KIRCHHOFF von „jugendlichen Sternen“ spricht, davon überzeugt, daß die Fixsterne verschiedenes Alter besitzen, also wohl selbst noch „vor unseren Augen“ entstehen können. Außerdem dürfen wir weder unsere Milchstraße noch auch die Gesamtheit aller mit den besten Fernrohren sichtbaren Spiralnebel als ein abgeschlossenes System betrachten; wie die Materie „außerhalb“ beschaffen ist und welche Gesetze dort gelten, wissen wir nicht.

Boltzmann suchte die Lösung des Problems allerdings in anderer Richtung. Wahrscheinlichkeit ist selbst bei sehr großen Zahlen beteiligter Materieteilchen noch keine Sicherheit. So unwahrscheinlich der Übergang vom Gleichgewicht zum Ungleichgewicht ist, so sicher ist gerade nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit, daß ein solcher Übergang von Zeit zu Zeit stattfindet, daß also die Entwicklung von Zeit zu Zeit rückläufig erfolgen muß. Natürlich werden sich die von selbst auftretenden Ungleichgewichte in der überwältigenden Mehrzahl der Fälle nur wenig von den Gleichgewichten unterscheiden.

Das Prinzip des Auftretens von Ungleichgewichten wurde von Boltzmann seit 1878 vorhergesagt. „Freilich, sobald man Körper von so kleinen Dimensionen beobachtet, daß dieselben nur mehr wenige Moleküle enthalten, muß die Gültigkeit dieses Satzes (des zweiten Hauptsatzes. E. B.) aufhören.“²⁰) Über die Diskussion der Ungleichgewichte, auch in bezug auf ihr Auftreten im größten Maßstab, meint Boltzmann: „Man belächelt dies, gut; aber man muß zugeben, daß das hier entwickelte Weltbild ein mögliches, von inneren Widersprüchen freies und auch ein nützliches ist, da es uns manche neue Gesichtspunkte eröffnet und uns vielfach nicht nur zur Spekulation, sondern auch zu Experimenten (z. B. über die Grenze der Teilbarkeit, die Größe der Wirkungssphäre und dadurch bedingte Abweichungen von den hydrodynamischen, den Diffusions-, Wärmeleitungsgleichungen usw.) anregt, zu denen keine andere Theorie die Anregung zu geben vermag.“ (*Vorlesungen über Gastheorie.*)

Den Nachweis der in der Mikro-Welt auftretenden Abweichungen vom zweiten Hauptsatz hat Boltzmann leider nicht mehr bewußt erlebt. Es handelt sich um die Erklärung der von dem Botaniker BROWN 1827 entdeckten Zitterbewegung kleiner Teilchen, etwa von Staub, in Suspensionen. EINSTEIN (1905) und SMOLUCHOWSKI (1906) zeigten unabhängig voneinander, daß diese nie zum Stillstand kommende Bewegung dadurch bewirkt wird, daß Moleküle des Lösungsmittels immer wieder an die suspendierten Teilchen anstoßen. Zwar müssen sich nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit die Wirkungen der Stöße im großen Mittel gegenseitig aufheben, da sie ja aus allen Richtungen erfolgen; dennoch müssen — ebenfalls mit berechenbarer Wahrscheinlichkeit — innerhalb kurzer Zeiträume Unregelmäßigkeiten auftreten, indem augenblicklich zufällig gerade die Stöße aus einer bestimmten Richtung überwiegen, und das Teilchen daher in Bewegung gesetzt wird. Die BROWNSche Bewegung war das erste Beispiel einer „Fluktuation“ oder „Schwankungserscheinung“, wo also das Auftreten unwahrscheinlicher Ereignisse (hier: resultierende Bewegung der suspendierten Teilchen in einheitlichem Wärmebad) tatsächlich beobachtet werden konnte.

In diesem Beispiel erfolgt die Fluktuation vor unseren Augen, weil das betrachtete System sehr klein ist. Die Stöße der Moleküle gegen das suspendierte Teilchen sind zwar nach den üblichen Maßstäben häufig, aber doch — etwa im Vergleich zur Gesamtzahl aller Stöße der Moleküle gegeneinander in einem Kubikzentimeter Wasser — relativ selten. Da also die Zahlen der Einzelereignisse nicht sehr groß sind, kommen zufällige Abweichungen von der vollständigen Kompensation der Wirkungen verhältnismäßig oft vor. Gaskinetisch verhalten sich suspendierte Teilchen genau wie enorme Moleküle, wie von Boltzmann, SMOLUCHOWSKI und JÄGER gezeigt wurde.

Boltzmann hat nun den unglaublich kühnen Gedanken gefaßt, auch der vom Wärmetod so stark abweichende Zustand unseres Weltalls könne einer riesenhaften Fluktuation zu verdanken sein. Zwar ist die Zahl der Atome des beobachtbaren Teiles der Welt un-

vorstellbar groß, aber die Zeit ist auch unvorstellbar groß (unendlich?), die zur Erreichung von Gleichgewichten wie auch andererseits zum Auftreten von Ungleichgewichten zur Verfügung steht. Freilich gibt es neben dem sichtbaren Bereich des Weltalls andere Bereiche, und während in unserem eigenen Bereich jetzt Arbeitsleistung und Leben möglich sind, herrsche vielleicht in anderen, unvergleichlich mächtigeren Bereichen gleichzeitig der absolute Tod.

In seiner Vorlesung in St. Louis (1904) sagt Boltzmann, indem er Gedanken ausführt, die er schon 1897 in einer Polemik gegen ZERMELO dargelegt hatte: „Die Lehrsätze der statistischen Mechanik sind strenge Folgen der gemachten Annahmen und werden immer wahr bleiben, wie alle wohlbegründeten mathematischen Lehrsätze. Ihre Anwendung auf das Naturgeschehen aber ist das Prototyp einer physikalischen Hypothese. Gehen wir nämlich von den einfachsten Grundannahmen über die gleiche Wahrscheinlichkeit aus, so finden wir für das Verhalten von Aggregaten sehr vieler Individuen ganz analoge Gesetze, wie sie die Erfahrung für das Verhalten der materiellen Welt zeigt. Progressive oder sich drehende Bewegung muß immer mehr in unsichtbare Bewegung der kleinsten Teilchen, in Wärmebewegung übergehen, wie HELMHOLTZ charakteristisch sagt: Geordnete Bewegung geht immer mehr in ungeordnete über. Die Mischung der verschiedenen Stoffe sowie der verschiedenen Temperaturen, der Stellen mehr oder minder lebhafter Molekularbewegung, muß eine immer gleichförmigere werden. Daß diese Mischung nicht von Anfang eine vollständige war, daß die Welt vielmehr von einem sehr unwahrscheinlichen Anfangszustand ausging, das kann man zu den fundamentalen Hypothesen der ganzen Theorie zählen, und man kann sagen, daß der Grund dafür ebenso wenig bekannt ist wie überhaupt der Grund, warum die Welt gerade so und nicht anders ist. Aber man kann auch noch einen anderen Standpunkt einnehmen. Zustände großer Entmischung, respektive großer Temperaturunterschiede, sind nach der Theorie nicht absolut unmöglich, sondern nur äußerst unwahrscheinlich, allerdings in einem geradezu unfaßbar

hohen Grade. Wenn wir uns daher nur die Welt als groß genug denken, so werden nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung daselbst bald da, bald dort Stellen von den Dimensionen des Fixsternhimmels mit ganz unwahrscheinlicher Zustandsverteilung auftreten. Sowohl bei ihrer Bildung als auch bei ihrer Auflösung wird der zeitliche Verlauf ein einseitiger sein, wenn sich also denkende Wesen an einer solchen Stelle befinden, so müssen sie von der Zeit genau denselben Eindruck gewinnen, den wir haben, obwohl der zeitliche Verlauf für das Universum als Ganzes kein einseitiger ist. Die hier entwickelte Theorie geht zwar kühn über die Erfahrung hinaus, aber sie hat gerade die Eigenschaft, welche jede derartige Theorie haben soll, indem sie uns die Erfahrungstatsachen in ganz neuartiger Beleuchtung zeigt und zu weiterem Nachdenken und Forschen anregt.“

In bezug auf die zweite Möglichkeit hatte Boltzmann an der genannten Stelle 1897 geschrieben: „Für das Universum sind also beide Richtungen der Zeit ununterscheidbar, wie es im Raum kein Oben und Unten gibt. Aber wie wir an einer bestimmten Stelle der Erdoberfläche die Richtung gegen den Erdmittelpunkt als nach unten bezeichnen, so wird ein Lebewesen, das sich in einer bestimmten Zeitphase einer solchen Einzelwelt befindet, die Zeitrichtung gegen die unwahrscheinlicheren Zustände anders als die entgegengesetzte (erstere als die Vergangenheit, letztere als die Zukunft, das Ende) bezeichnen, und vermöge dieser Benennung werden sich für dasselbe kleine Gebiete, die es aus dem Universum isoliert, ‚anfangs‘ immer in einem unwahrscheinlichen Zustande befinden. Diese Methode scheint mir die einzige, wonach man den zweiten Hauptsatz, den Wärmetod jeder Einzelwelt ohne eine einseitige Änderung des ganzen Universums von einem bestimmten Anfangs- gegen einen schließlichen Endzustand denken kann. Die Einwendung, daß ein Gedankenbild, welches so viele tote Teile des Universums zur Erklärung von so wenig belebten braucht, unökonomisch und daher unzweckmäßig sei, lasse ich nicht gelten. Ich erinnere mich noch zu gut einer Person, welche absolut nicht glaubte, daß die Sonne 20 Mil-

lionen Meilen von der Erde entfernt sei, denn die Annahme von so viel nur Lichtäther enthaltenden Raum neben so wenig mit Leben erfülltem sei einfach einfältig.“

Ähnliche Gedanken werden auch im Jahre 1897 in einem Vortrag auf der Braunschweiger Naturforscherversammlung ausgesprochen, doch wird hier wesentlich deutlicher gegen die Vorstellung eines endlichen Weltbeginns und daher auch eines Wärmetods Stellung genommen: „Mir schiene es (zwar; E. B.) nicht unwissenschaftlich, die Tatsache, daß die Welt anfangs in einem noch unwahrscheinlicheren Zustand war als gegenwärtig und heute noch immer zu wahrscheinlicheren übergeht, einfach der Theorie als Annahme voranzustellen, wie die KANT-LAPLACESche Theorie für die ursprüngliche Drehung des Weltnebels keine Ursache angibt . . . Doch wer dem Reiz, sich in Phantasien über das Weltall zu ergehen, nachgeben will, der könnte sich die ganze Welt in Ewigkeit im Wärmegleichgewicht denken . . . so scheint mir dies der einzige Weg, den zweiten Hauptsatz ohne die abgeschmackte Annahme eines Wärmetodes der Gesamtwelt zu erklären.“

Auch in den *Vorlesungen über Gastheorie* (1898) schreibt Boltzmann: „Man kann sich die Welt als ein mechanisches System von einer enorm großen Anzahl von Bestandteilen und von enorm langer Dauer denken, so daß die Dimensionen unseres Fixsternhimmels (jedenfalls mit Einschluß aller Spiralnebel unseres Beobachtungsraumes. E. B.) winzig gegen die Ausdehnung des Universums, und Zeiten, die wir Äonen nennen, winzig gegen dessen Dauer sind. Es müssen dann im Universum, das sonst überall im Wärmegleichgewicht, also tot ist, hier und da solche verhältnismäßig kleine Bezirke von der Ausdehnung unseres Sternenraumes (nennen wir sie Einzelwelten) vorkommen, die während der verhältnismäßig kurzen Zeit von Äonen erheblich vom Wärmegleichgewicht abweichen, und zwar ebenso häufig solche, in denen die Zustandswahrscheinlichkeit gerade zu- als abnimmt . . . Diese Methode scheint mir die einzige, wonach man den zweiten Hauptsatz, den Wärmetod jeder Einzelwelt, ohne

eine einseitige Änderung des gesamten Universums von einem bestimmten Anfangs- gegen einen schließlichen Endzustand denken kann ... Im ganzen Universum, dem Inbegriff aller Einzelwelten, aber kommen in der Tat Vorgänge in der umgekehrten Reihenfolge vor. Nur zählen die sie etwa beobachtenden Wesen die Zeit wieder von den unwahrscheinlicheren zu den wahrscheinlicheren Zuständen fortschreitend, und es kann nie entdeckt werden, ob sie die Zeit entgegengesetzt wie wir zählen, da sie in der Zeit durch Äonen, im Raume durch 10^{100} Siriusfernen von uns getrennt sind, und obendrein ihre Sprache keine Beziehung zu der unserigen hat.“

(Der Gedanke, daß eine Welt ebenso gut denkbar wäre, in welcher alle Naturvorgänge in verkehrter Zeitfolge ablaufen, findet sich auch in der Abhandlung *Über die sogenannte H-Kurve*: „Jedoch hätte ein Mensch, der in dieser verkehrten Welt leben würde, keineswegs eine andere Empfindung als wir. Er würde eben das, was wir Zukunft nennen, als Vergangenheit, und umgekehrt bezeichnen.“)

„Ist nun die erfahrungsmäßig gegebene Irreversibilität des Verlaufes aller uns bekannten Naturvorgänge mit dem Gedanken einer Unbeschränktheit des Naturgeschehens, die uns gegebene Einseitigkeit der Zeitfolge mit der Unendlichkeit oder ringförmigen Geschlossenheit derselben vereinbar? Wer diese Frage in bejahendem Sinne beantworten wollte (wie Boltzmann offenbar will. E. B.), müßte als Weltbild ein System benutzen, dessen zeitliche Veränderungen durch Gleichungen gegeben werden, in denen die positive und negative Zeitrichtung gleichberechtigt sind und mittels dessen doch durch eine besondere spezielle Annahme der Schein der Irreversibilität in langen Zeiträumen erklärbar ist. Dies trifft aber gerade bei der atomistischen Weltanschauung zu.“

In dem englisch geschriebenen Artikel *Fragen der Gastheorie* (1895), in dem übrigens Boltzmann den Gedankengang seinem Assistenten SCHÜTZ zuschreibt, heißt es: „Es mag eingewendet werden, daß die Welt so weit vom thermischen Gleichgewicht entfernt ist, daß wir die Wahrscheinlichkeit eines solchen Zustandes gar nicht vorstellen

können. Aber können wir andererseits vorstellen, welch kleiner Teil des ganzen Weltalls (universe) diese Welt (world) ist? Wenn wir das Weltall groß genug annehmen, ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein so kleiner Teil davon wie unsere Welt in seinem gegenwärtigen Zustand ist, nicht mehr klein.“

Dagegen lehnt Boltzmann — wieder in der Polemik gegen ZERMELO — lebhaft den Gedanken ab, den „Wiederkehrsatz“ von POINCARÉ, demzufolge ein dem Ausgangszustand sehr naher Zustand nach einer — wenn auch sehr langen — Zeit immer wiederkehren muß, auf das Universum als Ganzes anzuwenden. Zwar steht der Satz von POINCARÉ, wie Boltzmann betont, in bezug auf eine endliche Teilwelt, die als abgeschlossen betrachtet werde, im Einklang mit seinen eigenen Lehrsätzen, denn jeder mögliche Zustand eines solchen Systems hat eine — wenn auch unter Umständen überaus kleine — endliche Wahrscheinlichkeit der Verwirklichung. „Man könnte sagen, daß nach dem POINCARÉschen Satz auch das ganze Universum nach genügend langer Zeit in seinen Anfangszustand zurückkehren müßte und daher Zeiten kommen müßten, wo sich alle Vorgänge im entgegengesetzten Sinne wie jetzt abspielen. Allein derartige Schlüsse scheinen mir jeder Berechtigung zu entbehren. Wie sollen wir, sobald wir die Sphäre des Beobachtbaren verlassen, entscheiden, ob die Existenzdauer des Universums oder die Anzahl der Kraftzentren (Materieteilchen im allgemeinsten Sinn. E. B.), welche es enthält, unendlich groß höherer Ordnung ist? Auch wird dann die Annahme, daß der Bewegungsraum und der gesamte Energieinhalt endlich sind, fraglich.“

(Zu ZERMELOS Überlegungen verhielt Boltzmann sich derart ablehnend, daß er ihm einmal riet, seine Finger von der statistischen Mechanik zu lassen. Als F. KLEIN ihm einen Artikel für die *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften* auftrag und drohte, ihn andernfalls ZERMELO zu übergeben, antwortete Boltzmann²¹): „Ehe der Pestalutz es macht, mache ich's!“, wie er in der *Reise ins Eldorado* fröhlich erzählt.)

In bezug auf den Wert seiner Überlegungen über den Zustand des Universums äußert sich Boltzmann mit der ihm eigenen Bescheidenheit in den *Vorlesungen über Gastheorie*: „Gewiß wird niemand derartige Spekulationen für wichtige Entdeckungen oder gar, wie es wohl die alten Philosophen taten, für das höchste Ziel der Wissenschaft halten. Ob es aber gerechtfertigt ist, sie als etwas völlig Müßiges zu bespötteln, könnte noch fraglich sein. Wer weiß, ob sie nicht doch den Horizont unseres Ideenkreises erweitern und durch Erhöhung der Beweglichkeit der Gedanken auch die Erkenntnis des erfahrungsmäßig Gegebenen fördern?“

ANMERKUNGEN ZUM II. TEIL

- 1) A. SOMMERFELD, a. a. O.
- 2) M. PLANCK, Vorträge und Erinnerungen, Stuttgart 1949.
- 3) A. HÖFLER, a. a. O.
- 4) Siehe L. BOLTZMANN, Antrittsvortrag zur Naturphilosophie (1903).
- 5) WILLIAM THOMSON, später Lord KELVIN.
- 6) Für diesen Hinweis bin ich Herrn Prof. E. SCHRÖDINGER zu Dank verpflichtet. E. B.
- 7) F. EXNER, Neue Freie Presse, 8. September 1906.
- 8) H. A. LORENTZ, a. a. O.
- 9) J. G. CROWTHER, British Scientists of the 19th Century, London (1935).
- 10) TH. DES COUDRES, a. a. O.
- 11) Dieses Gesetz sagt aus, daß die Schwingungszahl, bei der das Maximum der Strahlungsemission eines schwarzen Körpers liegt, der absoluten Temperatur proportional, die entsprechende Wellenlänge also der Temperatur verkehrt proportional ist.
- 12) Hier ist nur von der äußeren Energie der Atome die Rede; von ihrer inneren Energie (Energie der Elektronen und Kernbausteine) wird abgesehen.
- 13) L. FLAMM, a. a. O.
- 14) E. SCHRÖDINGER, Briefliche Mitteilung. Ich danke Herrn Prof. SCHRÖDINGER auch für den Hinweis auf die eben wiedergegebenen Ausführungen BOLTZMANNs. E. B.
- 15) Im Original verwendet SCHRÖDINGER einen drastischeren Ausdruck.
- 16) Im Nachruf auf LOSCHMIDT erzählt BOLTZMANN, daß er im alten Laboratorium in Wien-Erdberg einmal in der Diskussion mit Jenem betont hatte, „daß, wenn alle Temperaturungleichheiten aufgehört hätten, sich auch keine intelligenten Wesen mehr bilden könnten“, und fährt fort: „In einem Keller von durchaus gleichförmiger Temperatur, sagte ich, kann keine Intelligenz bestehen.

Als wäre es heute, so sehe ich STEFAN vor mir, der unserem lebhaften Streite schweigend zugehört hatte und nun lakonisch bemerkte: „Nun weiß ich, warum Ihre (vorher beschriebenen. E. B.) Versuche mit den großen Glasröhren im Keller so kläglich gescheitert sind.“

¹⁷⁾ Im Scherz meinte BOLTZMANN in einer Vorlesung mit Hinweis auf OSTWALDS „Villa Energie“, „nach berühmtem Muster könnte ich mein Haus ‚Villa Entropie‘ nennen“ (TH. DES COUDRES, a. a. O.).

¹⁸⁾ Siehe A. EUCKEN, Lehrbuch der Chemischen Physik, Leipzig 1943.

¹⁹⁾ F. HASENÖHRL, a. a. O.

²⁰⁾ Entgegnung an ZERMELO (1896).

²¹⁾ Nach SCHILLER. Siehe „Die Räuber“.

²²⁾ Auf Gespräche mit BOLTZMANN über diesen Gegenstand nimmt auch F. EXNER Bezug (Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften, Wien-Leipzig, Seite 670).

²³⁾ Über die spätere „Bekehrung“ ERNST MACHS zur Atomistik berichtet STEFAN MEYER in der Festschrift zum 40jährigen Bestand des Wiener Instituts für Radiumforschung (Wien 1950): „Er (MACH) war damals schon krank und teilweise gelähmt, aber von vollster geistiger Frische. Bekanntlich hatte er sich geradezu fanatisch gegen die Einführung von ‚Bildern‘ als Realitäten in der Physik gewehrt. Wenn jemand von den Atomistern, die damals in Wien in Ludwig Boltzmann ihren Führer hatten, vor ihm von Atomen sprach, fuhr er meistens mit der Frage dazwischen: ‚Hab'n S' ein's g'sehn?‘ Bis dahin mußte man schweigen. Nun (nach der Sichtbarmachung der Lichtblitze, die beim Auftreffen von Alpha-Teilchen auf Leuchtschirme entstehen) war es mit einem Male anders geworden. Es bleibt mir eine der ergreifendsten Erinnerungen, als MACH nach der Vorführung des Spinthariskops nicht etwa kleine starrköpfige Einwendungen machte, sondern schlicht erklärte: ‚Nun glaube ich an die Existenz der Atome.‘ Ein ganzes Weltbild hatte sich im in wenigen Minuten verändert.“ Übrigens hat auch OSTWALD sich schließlich zur Atomlehre bekehrt.

Der Philosoph

STELLUNG ZUR PHILOSOPHIE

Boltzmanns scharf ausgeprägte Ansichten und Leistungen auf philosophischem Gebiet verdienen größte Aufmerksamkeit. Boltzmann kam als Physiker zur Philosophie. Dies ist einer der Gründe des besonderen Wertes der Anschauungen Boltzmanns für Mit- und Nachwelt. Boltzmann betrachtete die Lehren der Philosophen gewissermaßen nicht nur vom Katheder, sondern vom Arbeitstisch des praktisch — theoretisch oder experimentell — arbeitenden, überaus produktiven und erfolgreichen Wissenschafters aus. Für ihn mußten sich die Lehren der Philosophie praktisch bewähren. Natürlich konnten Boltzmanns philosophische Anschauungen nicht Jeden befriedigen. So meinte einer seiner Schüler, der auch über Boltzmanns Atomistik ein kritisches Urteil gefällt hat, „daß Boltzmanns Philosophie in den Annalen der Wissenschaft nicht ebenso unsterblich sein wird, wie seine Mathematik und Physik“¹⁾.

Boltzmann hatte ursprünglich die Schulphilosophie nicht systematisch studiert und er begegnete ihr mit Mißtrauen. Später befaßte er sich gründlicher mit ihr, und schließlich hielt er sogar Vorlesungen über Philosophie, wie im biographischen Teil erwähnt wurde. In den Vorlesungen behandelte er zuerst Lehren SCHOPENHAUERS, später allgemeine Probleme der Naturphilosophie²⁾. Boltzmanns Werdegang als Philosoph ist von ihm selbst in seiner philosophischen Antrittsvorlesung im Jahre 1903 in packender Weise dargelegt worden:

„... Nicht bloß bei Verfassung meiner einzigen Abhandlung,

auch sonst grübelte ich oft über das enorme Wissensgebiet der Philosophie. Unendlich scheint es mir, und meine Kraft schwach. Ein Menschenleben wäre nur wenig, um einige Erfolge auf demselben zu erringen; die unermüdete Tätigkeit eines Lehrers von der Jugend bis zum Alter unzureichend, sie der Nachwelt zu übermitteln, und mir soll dies Nebenbeschäftigung neben einem andern, allein die ganze Kraft erfordernden Lehrgegenstand sein?“

„... Vielleicht wählte man auch mich, nicht weil ich über Logik schrieb, sondern weil ich einer Wissenschaft angehöre, bei der man zur täglichen Praxis in der schärfsten Logik die beste Gelegenheit hat.“

„Bin ich nur zögernd dem Rufe gefolgt, mich in die Philosophie hineinzumischen, so mischten sich desto öfter Philosophen in die Naturwissenschaft hinein. Bereits vor langer Zeit kamen sie mir ins Gehege. Ich verstand nicht einmal, was sie meinten, und wollte mich daher über die Grundlehre aller Philosophie besser informieren.“

„Um gleich aus den tiefsten Tiefen zu schöpfen, griff ich nach HEGEL; aber welch unklaren, gedankenlosen Wortschwall sollte ich da finden! Mein Unstern führte von HEGEL zu SCHOPENHAUER.“

(Den Lehren SCHOPENHAUERS wird an anderer Stelle, nämlich in dem ursprünglich *Beweis, daß SCHOPENHAUER ein geistloser, unwissender, Unsinn schmierender, die Köpfe durch hohlen Wortkram von Grund aus und auf immer degenerierender Philosophaster sei* betitelten Vortrag vor der Philosophischen Gesellschaft in Wien [1905], überhaupt jeder bleibende Wahrheitsgehalt abgesprochen.)

Nachdem Boltzmann seiner lebhaften Abneigung gegen die philosophischen Systeme HEGELS, SCHOPENHAUERS und HERBARTS Ausdruck gegeben und sich über KANT mit den Worten ausgedrückt hat: „Ja, selbst bei KANT konnte ich verschiedenes so wenig begreifen, daß ich bei dessen sonstigem Scharfsinn fast vermutete, daß er den Leser zum besten haben wolle oder gar heuchle“, fährt er fort: „So entwickelte sich damals in mir ein Widerwille, ja Haß gegen die Philosophie ... Mein Widerwille gegen die Philosophie wurde übrigens

damals fast von allen Naturforschern geteilt. Man verfolgte jede metaphysische Richtung und suchte sie mit Stumpf und Stiel auszurotten; doch diese Gesinnung dauerte nicht an. Die Metaphysik scheint einen unwiderstehlichen Zauber auf den Menscheng Geist auszuüben, der durch alle mißlungenen Versuche, ihren Schleier zu heben, nicht an Macht einbüßt. Der Trieb, zu philosophieren, scheint uns unausrottbar angeboren zu sein. Nicht bloß ROBERT MAYER, der ja durch und durch Philosoph war, auch MAXWELL, HELMHOLTZ, KIRCHHOFF, OSTWALD und viele andere opferten ihr willig und erkannten ihre Fragen als die höchsten an, so daß sie heute wieder als die Königin der Wissenschaften dasteht.“

„Schon ein Mann, der an der Wiege der induktiven Wissenschaft steht, ROGER BACON VON VERULAM, nennt sie eine gottgeweihte Jungfrau; freilich fügt er dann gleich wieder malitiös bei, daß sie gerade dieser hohen Eigenschaft wegen ewig unfruchtbar bleiben müsse. Unfruchtbar sind freilich viele Untersuchungen auf metaphysischem Gebiet geblieben, aber wir wollen doch die Probe machen, ob jede Spekulation auch wirklich unfruchtbar sein müsse.“ (Der Verfasser ist Herrn Prof. K. PRZIBRAM für den Hinweis dankbar, daß FRANCIS BACON — nicht ROGER BACON, der „doctor mirabilis“ — LORD VERULAM war.)

Vorwürfe gegen die Schulphilosophie werden auch an anderer Stelle, nämlich im Vortrag *Über statistische Mechanik* (1904) erhoben: „(Die Fragen nach dem Wesen des Kausalgesetzes, der Materie, der Kraft usw.) sind es, von denen man damals zu sagen pflegte, sie kümmern den Naturforscher nicht, sie seien ganz der Philosophie zu überweisen. Heutzutage ist das wesentlich anders geworden; es zeigt sich bei den Naturforschern sogar eine große Vorliebe, philosophische Gegenstände zu behandeln, und wohl mit Recht. Eine der ersten Regeln der Naturforschung ist es ja, niemals blindlings dem Instrumente, mit dem man arbeitet, zu trauen; sondern es nach allen Seiten zu prüfen. Wie sollten wir da den uns angeborenen oder historisch entwickelten Begriffen und Meinungen

blindlings vertrauen, umso mehr, als schon Beispiele genug vorliegen, wo sie uns in die Irre führten? Wenn wir aber einmal die einfachsten Elemente prüfen, wo wäre da die Grenze zwischen Naturforschung und Philosophie, an der wir haltmachen sollten?“

„Ich hoffe, daß es mir keiner der etwa anwesenden Philosophen übelnehmen oder darin einen Vorwurf erblicken wird, wenn ich freimütig sage, daß man mit der Zuweisung dieser Fragen an die Philosophie vielleicht auch schlechte Erfahrungen gemacht hat. Die Philosophie hat die Klärung dieser Fragen auffallend wenig gefördert, und sie konnte es allein und von ihrem einseitigen Standpunkt aus so wenig, als die Naturwissenschaft es allein vermag. Wenn wirkliche Fortschritte möglich sind, so sind sie nur vom Zusammenwirken beider Wissenschaften zu erwarten.“

Nachdem Boltzmann anschließend wieder gegen KANT polemisiert hat, der in seinen Antinomien ebensowohl die grenzenlose Teilbarkeit wie auch die Unteilbarkeit der Materie, ebensowohl die Endlichkeit wie auch die Unendlichkeit von Zeit und Raum bewiesen hat, schreibt er: „Dies ist keineswegs die einzige Gelegenheit, wo das philosophische Denken sich in Widersprüche verwickelt, vielmehr begegnet man solchen Schritt für Schritt. Die landläufigsten Dinge sind der Philosophie eine Quelle unauflösbarer Rätsel. Zur Erklärung unserer Wahrnehmungen konstruiert sie den Begriff der Materie, und findet diese dann vollkommen untauglich, selbst Wahrnehmungen zu haben, oder in einem Geist Wahrnehmungen zu erzeugen. Mit unendlichem Scharfsinn konstruiert sie einen Begriff des Raumes oder der Zeit, und findet es dann absolut unmöglich, daß in diesem Raum sich Dinge befinden, daß in dieser Zeit sich Vorgänge abspielen. Sie findet unübersteigliche Schwierigkeiten in dem Verhältnis von Ursache und Wirkung, von Leib und Seele, in der Möglichkeit eines Bewußtseins, kurz, in allem und jedem. Ja, zum Schluß findet sie es vollkommen unerklärlich und sieht darin einen Widerspruch in sich selbst, daß überhaupt etwas existiert, daß etwas entstanden ist und sich verändern kann.“

Zum Abschluß einer vernichtenden Entgegnung auf einen von WILHELM OSTWALD gehaltenen Vortrag über das ‚Glück‘ kommt Boltzmann wieder auf den Gegenstand zu sprechen: „Warum erscheint mir nun ein scheinbar so harmloser Aufsatz wie der besprochene OSTWALDSche für die Wissenschaft so gefährlich? Weil er einen Rückfall in das Wohlgefallen am rein Formalen bedeutet, in die für den Fortschritt so verderbliche Methode der sogenannten Philosophen, Lehrgebäude aus bloßen Worten und Phrasen zu konstruieren und bloß auf eine hübsche formale Verflechtung derselben Gewicht zu legen, was man rein logische oder gar aprioristische Begründung nannte, ohne darauf zu achten, ob diese Verflechtung auch genau der Wirklichkeit entspricht und in den Tatsachen genügend begründet ist; einen Rückfall in die Methode, sich von vorgefaßten Meinungen beherrschen zu lassen, alles unter dieselben Einteilungsprinzipie zu beugen, in dasselbe System künstlich hineinzwängen zu wollen, die wahre Mathematik vor lauter algebraischen Formeln, die wahre Logik vor lauter anscheinend schulgerecht gebauten Syllogismen, die wahre Philosophie vor lauter philosophisch sich herausputzendem Krimskrams, den Wald vor lauter Bäumen nicht sehen zu wollen . . .“

Was nun die Metaphysik betrifft, die für Boltzmann den Inbegriff der schlechten Traditionen der von der echten Wissenschaft losgelösten Schulphilosophie darstellt, so sagt er im Vortrag über SCHOPENHAUER geradezu, daß erst dann, wenn die Menschen die Denkgesetze im Einklang mit der Erfahrung, der Praxis eingerichtet haben werden, die „Menschheit von der geistigen Migräne, welche man Metaphysik nennt, befreit werden wird“.

Diese scharfe Kritik an der Mehrzahl der bisherigen Philosophen hindert nun Boltzmann nicht an der Anerkennung des Aufgabebereichs und der positiven Rolle einer echten, fortschrittlichen Philosophie. Diese Anerkennung ist schon in seinem Hinweis auf den unwiderstehlichen Drang der Menschheit zum Philosophieren und in seinem Wunsch nach Zusammenarbeit von Philosophie und Natur-

wissenschaft zum Ausdruck gekommen. Besonders nachdrücklich wird der Gedanke am Schluß des Vortrags *Über statistische Mechanik* (1904) ausgesprochen: „Ich bin hier philosophischen Fragen nicht aus dem Wege gegangen in der festen Hoffnung, daß ein einmütiges Zusammenwirken der Philosophie und Naturwissenschaft jeder dieser Wissenschaften neue Nahrung zuführen wird, ja daß man nur auf diesem Weg zu einem wahrhaft konsequenten Gedankenaustausch gelangen kann. Wenn SCHILLER zu den Naturforschern und Philosophen seiner Zeit sagte: ‚Feindschaft sei zwischen Euch, noch kommt das Bündnis zu frühe‘, so stehe ich nicht mit ihm im Widerspruch, ich glaube eben, daß jetzt die Zeit für das Bündnis gekommen ist.“

Nachdem er im SCHOPENHAUER-Vortrag auf die „Unhaltbarkeit“ der Gedanken bestimmter Philosophen hingewiesen hat, stellt Boltzmann die Frage: „War die Arbeit dieser großen Geister wirklich eine vergebene?“ und beantwortet sie: „Diese Frage muß ich verneinen, denn diese Philosophen haben noch viel naiveren Anschauungen ein Ende gemacht. Sie haben dadurch Nützlichendes geleistet, daß sie schlechte Ansichten wegräumten, deren Fehler aufdeckten und so einen Übergang zu klareren Ansichten verbreiteten . . . Von diesem Standpunkt muß ich innigen Dank denen sagen, welche mich empfohlen haben zum Lehrauftrag für Philosophie, indem ich hierdurch Gelegenheit hatte, in die Literatur derselben tiefer einzudringen. Wie viele bisher wahren Nutzen aus meinen Vorlesungen geschöpft haben, kann ich nicht beurteilen. Aber ich habe den Trost, daß Einer dabei viel gelernt hat, und das — bin ich selbst.“

„Eine andere Frage ist die, ob diejenigen, welche mich dazu empfohlen haben, auch mit mir zufrieden sind. Nun, wenn sie erwartet haben, daß ich in das alte Geleise eintreten und darin mitlaufen werde, haben sie sich freilich getäuscht. Vielleicht wäre dies nicht einmal wünschenswert. Es könnte doch sein, daß ein Hecht im Karpfenteich größeren Nutzen hat als noch ein Karpfen mehr.“

„Nach meiner Ansicht ist alles Heil für die Philosophie zu erwarten von der Lehre DARWINS. So lange man an einen besonderen Geist

glaubt, der ohne mechanische Mittel imstande ist, die Objekte zu erkennen, an einen besonderen Willen, der wieder ohne mechanische Mittel geeignet ist, das für uns Zuträgliche zu wollen, kann man die einfachsten psychologischen Erscheinungen nicht erklären.“

„Erst wenn man einsieht, daß Geist und Wille nicht ein Etwas außer dem Körper, daß sie vielmehr komplizierte Wirkungen von Teilen der Materie sind, deren Wirkungsfähigkeit durch Entwicklung immer vollkommener wird, erst wenn man einsieht, daß Vorstellung, Wille und Selbstbewußtsein nur die höchsten Entwicklungsstufen derjenigen physikalisch-chemischen Kräfte der Materie sind, durch welche Protoplasmabläschen zunächst befähigt wurden, solche Regionen aufzusuchen, die für sie günstiger sind, solche zu vermeiden, die ihnen ungünstig sind, wird einem in der Psychologie alles klar.“

Nach dieser Grundsatzklärung wird das Programm gestellt: „Aufgabe der Philosophie der Zukunft aber ist nach meiner Ansicht, die Grundbegriffe so zu formulieren, daß man in allen Fällen möglichst präzise Anweisungen zu zweckentsprechendem Eingreifen in die Ereigniswelt erhält.“

Gegen Ende seines Lebens besuchte Boltzmann die Sitzungen der Philosophischen Gesellschaft häufiger als die physikalischen Fachveranstaltungen³⁾.

ROLLE DER THEORIE

Das Interesse, das Boltzmann der Philosophie abgewann, steht mit seiner Begeisterung für die Theorie (siehe S. 13) im Einklang. In seinem Vortrag *Über die Bedeutung von Theorien* (1890) heißt es geradezu: „... die Idee, welche mein Sinnen und Wirken erfüllt, den Ausbau der Theorie. Ihr zum Preise ist mir kein Opfer zu groß, sie, die den Inhalt meines ganzen Lebens ausmacht ...“. Gleich

anschließend wird die Frage gestellt: „Ich wäre kein echter Theoretiker, wenn ich nicht zuerst fragen würde: Was ist die Theorie?“ und auch beantwortet: „Dem Laien fällt daran zunächst auf, daß sie schwer verständlich, mit einem Wust von Formeln umgeben ist, die für den Uneingeweihten keine Sprache haben. Allein diese sind nicht ihr Wesen, der wahre Theoretiker spart damit, soviel er kann; was sich in Worten sagen läßt, drückt er in Worten aus, während gerade in den Büchern der Praktiker Formeln zum bloßen Schmuck nur allzu häufig figurieren . . . Ich bin der Meinung, daß die Aufgabe der Theorie in der Konstruktion eines rein in uns existierenden Abbildes der Außenwelt besteht, das in allen unseren Gedanken und Experimenten als Leitstern zu dienen hat, also gewissermaßen in der Vollendung des Denkprozesses, der Ausführung dessen im Großen, was sich bei Bildung jeder Vorstellung im Kleinen in uns vollzieht.“

„Es ist ein eigentümlicher Trieb des menschlichen Geistes, sich ein solches Abbild zu schaffen und es der Außenwelt immer mehr und mehr anzupassen . . . Die stete Vervollkommnung dieses Abbildes ist nun die Hauptaufgabe der Theorie. Die Phantasie ist immer ihre Wiege, der beobachtende Verstand ihr Erzieher . . . Wie kindlich waren die ersten Theorien des Universums . . . Kein Wunder, daß diese Theorien zum Gespötte der Empiriker und Praktiker wurden, und doch enthielten sie bereits die Keime aller späteren großen Theorien . . . Heute kann man sagen, daß die Theorie die Welt erobert hat.“

Nachdem die Leistungsfähigkeit der Theorie für die Wissenschaft gepriesen wird, wo sich „die Gestirne sklavisch den Gesetzen beugen, die ihnen der Menscheng Geist zwar nicht gegeben, aber doch abgelauscht hat“, wird auf den überragenden Einfluß der Theorie auf die menschliche Praxis verwiesen. Die Formeln der Theorie leiten die Schiffe, gestatten den Bau der Brooklyner Brücke und des Eiffelturms, theoretische Chemiker seien durch praktische Anwendungen ihrer Synthesen zu reichen Männern geworden, und auch die Elektrotechnik sei angewandte Theorie. Prophetisch ist das Wort: „Viel-

leicht ist die Zeit nicht mehr ferne, in der jede Haushaltsrechnung jene großen Elektriker (OHM, AMPÈRE usw.) verherrlichen wird, und im künftigen Jahrhundert weiß vielleicht jede Köchin, mit wieviel Volt-Ampère (= Watt) das Fleisch zu braten ist und wieviel Ohm ihre Lampe hat. Gerade der praktische Techniker behandelt die verwickelten Formeln der Elektrizitätslehre in der Regel mit größerer Sicherheit als so mancher angehende Gelehrte, da er jeden Irrtum nicht bloß mit der Rüge seines Lehrers, sondern mit barem Gelde büßen muß . . .“

„Fast wäre man versucht, zu behaupten, daß, ganz abgesehen von ihrer geistigen Mission, die Theorie auch noch das denkbar Praktischeste, gewissermaßen die Quintessenz der Praxis sei, da die Präzision ihrer Schlüsse durch keine Routine im Schätzen oder Probieren zu erreichen ist, freilich bei der Verborgenheit ihrer Wege nur für Den, der diese ganz sicher wandelt. Ein einziger Zeichenfehler kann das Resultat vertausendfachen, während der Empiriker nie soweit irrt.“

An diese enthusiastischen Worte schließt sich eine berechtigte Warnung: „Ich nannte die Theorie ein rein geistiges inneres Abbild, und wir sahen, welch hoher Vollendung dasselbe fähig ist. Wie sollte es da nicht kommen, daß man bei fortdauernder Vertiefung in die Theorie das Bild für das eigentlich Existierende hielte? . . . So kann es dem Mathematiker geschehen, daß er, fortwährend beschäftigt mit seinen Formeln und geblendet durch ihre innere Vollkommenheit, die Wechselbeziehungen derselben zu einander für das eigentlich Existierende nimmt und von der realen Welt sich abwendet. Was der Dichter klagt, das gilt dann auch für ihn, daß seine Werke mit seinem Herzblut geschrieben sind und die höchste Weisheit an den höchsten Wahn grenzt.“

Die Art Boltzmanns, den Wert der Theorie zu rühmen, ergibt sich aus folgendem kleinen Begebnis: Als sich im Jahre 1899 der junge EMIL ABEL, später Professor der physikalischen Chemie in Wien, bei NERNST an dessen Göttinger Institut vorstellte, wurde er mit

den Worten begrüßt: „Sie kommen ja aus Wien, der Stadt Boltzmanns! Denken Sie stets an sein weises Wort: ‚Nichts ist praktischer als Theorie!‘ Das sehen Sie an dem Augenspiegel HELMHOLTZ’, an dem Gaslicht AUERS, an den Strahlen RÖNTGENS, an meiner Lampe.“⁽⁸⁾

Was wird als die Theorie betrachtet? Im Nachruf auf KIRCHHOFF heißt es: „Sucht die Experimentalphysik neue Erscheinungen zu finden, so geht das Bestreben der theoretischen dahin, die gegebenen Erscheinungen qualitativ und quantitativ in ihrem ganzen Verlaufe zu erfassen.“ Und im Nachruf auf STEFAN: „Die theoretische Physik hat, wie man früher sagte, die Grundursachen der Erscheinungen aufzusuchen, oder, wie man heute lieber sagt, sie hat die gewonnenen experimentellen Resultate unter einheitlichen Gesichtspunkten zusammenzufassen, übersichtlich zu ordnen und möglichst klar und einfach zu beschreiben, wodurch die Erfassung derselben in ihrer ganzen Mannigfaltigkeit erleichtert, ja eigentlich erst ermöglicht wird.“

Freilich kann man sich auf die Theorien im Gegensatz zum Experiment nicht mit völliger Sicherheit stützen. Im Vortrag *Über statistische Mechanik* wird festgestellt: „Der Kampf der Theorien dagegen (im Gegensatz zum Experiment. E. B.) ist ein unendlich langwieriger, ja fast scheint es, als ob gewisse Streitfragen, die so alt sind wie die Wissenschaft, auch so lange fortleben sollten wie diese.“

„Jede sicher festgestellte Tatsache bleibt für immer unabänderlich; sie kann höchstens erweitert, ergänzt werden, es können neue hinzukommen; aber sie kann nicht vollkommen umgestoßen werden. Daher erklärt es sich, daß die Entwicklung der experimentellen Physik kontinuierlich fortschreitet, niemals allzu große Sprünge macht, daß sie niemals von großen Umwälzungen und Erschütterungen heimgesucht wird . . . Es wird freilich mit großem Nachdruck betont, daß auch jede erschlossene und logisch als notwendig erkannte Wahrheit unumstößlich fortbestehen bleiben muß. Allein, wenn dies auch kaum angezweifelt werden kann, so lehrt doch die Erfahrung, daß das Gebäude unserer Theorien keineswegs aus lauter solchen logisch unumstößlich begründeten Wahrheiten aufgebaut ist. Dieses

setzt sich vielmehr aus vielfach willkürlichen Bildern des Zusammenhangs der Erscheinungen, aus sogenannten Hypothesen zusammen.“

„Ohne ein wenn auch geringes Hinausgehen über das direkt Wahrgenommene gibt es keine Theorie, ja nicht einmal eine übersichtlich zusammenfassende, zur Vorhersagung künftiger Erscheinungen taugliche Beschreibung der Naturtatsachen. Es gilt dies ebensowohl von den alten Theorien, denen jetzt vielfach der Boden streitig gemacht wird, als auch von den modernsten, welche sich einer großen Illusion hingeben, wenn sie sich hypothesenfrei dünken . . .“

„Hypothesen, welche der Phantasie einigen Spielraum lassen und kühner über das vorliegende Material hinausgehen, werden stete Anregung zu neuartigen Versuchen geben und so Pfadfinder zu völlig ungeahnten Entdeckungen werden. Freilich wird eine solche Theorie naturgemäß dem Wandel unterworfen sein, und es wird vorkommen, daß ein kompliziertes Lehrgebäude zusammenstürzt und durch ein neues ersetzt wird, welches mehr leistet, wobei freilich dann die alte Theorie als Bild für ein beschränktes Erscheinungsgebiet im Rahmen der neuen in der Regel noch Platz findet.“

Ein dramatisches Bild des Kampfes der Theorien wird im Nachruf auf STEFAN entworfen: „Der Laie stellt sich da vielleicht die Sache so vor, daß man zu den aufgefundenen Grundvorstellungen und Grundursachen der Erscheinungen immer neue hinzufügt und so in kontinuierlicher Entwicklung die Natur immer mehr und mehr erkennt. Diese Vorstellung ist aber eine irrige, die Entwicklung der theoretischen Physik war vielmehr stets eine sprunghafte. Oft hat man eine Theorie durch Jahrzehnte, ja durch mehr als ein Jahrhundert immer mehr entwickelt, so daß sie ein ziemlich übersichtliches Bild einer bestimmten Klasse von Erscheinungen bot. Da wurden neue Erscheinungen bekannt, die mit dieser Theorie im Widerspruch standen; vergeblich suchte man sie diesen anzupassen. Es entstand ein Kampf zwischen den Anhängern der alten und denen einer ganz neuen Auffassungsweise, bis endlich letztere allgemein durchdrang. Man sagte da früher, die alte Vorstellungsweise wurde als falsch er-

kannt. Es klingt dies so, als ob die neue absolut richtig sein müsse, und andererseits, als ob die alte (weil falsch) völlig nutzlos gewesen wäre. Um den Schein dieser beiden Behauptungen zu vermeiden, sagt man heutzutage bloß: Die neue Vorstellungsweise ist ein besseres, ein vollkommeneres Abbild, eine zweckmäßigere Beschreibung der Tatsachen. Damit ist klar ausgedrückt, daß auch die alte Theorie von Nutzen war, indem auch sie teilweise ein Bild der Tatsachen gab; sowie, daß die Möglichkeit nicht ausgeschlossen ist, daß die neue wiederum durch eine noch zweckmäßigere verdrängt werden kann. Zur Erläuterung hiervon dürfte wohl kein Beispiel geeigneter sein als die Entwicklung der Theorie der Elektrizität.“

Diese wichtige Vorstellung von einem gewissermaßen in Widersprüchen verlaufenden, im Sinne des von Boltzmann freilich nicht geschätzten HEGEL als dialektisch zu bezeichnenden Fortschrittes der Theorie findet sich auch im Vortrag *Über die Entwicklung der Methoden der Physik* (1899) ausgeführt: „Betrachten wir den Entwicklungsgang der Theorie näher, so fällt zunächst auf, daß derselbe keineswegs so stetig erfolgt, als man wohl erwarten würde, daß er vielmehr voll von Diskontinuitäten ist und wenigstens scheinbar nicht auf dem einfachsten, logisch gegebenen Weg erfolgt. Gewisse Methoden ergaben oft noch soeben die schönsten Resultate, und Mancher glaubte wohl, daß die Entwicklung der Wissenschaft bis ins Unendliche in nichts anderem als ihrer stetigen Anwendung bestehen würde. Im Gegensatz hierzu zeigen sie sich plötzlich erschöpft, und man ist bestrebt, ganz neue, disparate, aufzusuchen. Es entwickelt sich dann wohl ein Kampf zwischen den Anhängern der alten Methoden und den Neuerern. Der Standpunkt der ersteren wird von ihren Gegnern als ein veralteter, überwundener bezeichnet, während sie selbst wieder die Neuerer als Verderber der echten klassischen Wissenschaft schmäh.“

„Es ist dies übrigens ein Prozeß, der keineswegs auf die theoretische Physik beschränkt ist, vielmehr in der Entwicklungsgeschichte aller Zweige menschlicher Geistestätigkeit wiederzukehren scheint ...

Wir werden uns daher nicht mehr wundern, daß die theoretische Physik keine Ausnahme von diesem allgemeinen Entwicklungsgesetze ist.“

Aus derartigen Überlegungen wird eine interessante Konsequenz gezogen: „Daraus folgt, daß es nicht unsere Aufgabe sein kann, eine absolut richtige Theorie, sondern vielmehr ein möglichst einfaches, die Erscheinung möglichst gut darstellendes Abbild zu finden. Es ist sogar die Möglichkeit zweier verschiedener Theorien denkbar, die beide gleich einfach sind und mit den Erscheinungen gleich gut stimmen, die also, obwohl total verschieden, beide gleich richtig sind. Die Behauptung, eine Theorie sei die einzig richtige, kann nur der Ausdruck unserer subjektiven Überzeugung sein, daß es kein anderes, gleich einfaches und gleich gut stimmendes Bild geben könne.“ Damit ist abermals die Unabhängigkeit der realen Außenwelt von ihrem Abbild im Menschengest betont.

ANSCHAULICHKEIT

Die Wertschätzung, die Boltzmann für Hypothesen, und zwar besonders für anschauliche Hypothesen (Bilder) als Hilfsmittel der Theorie hegte, ist schon kurz zur Sprache gekommen. Boltzmann betonte den Wert solcher Bilder immer wieder. In seiner Arbeit *Über die Methoden der theoretischen Physik* schrieb er (1892): „Das Bedürfnis nach der äußersten Ausnützung der Mittel unserer Auffassungskraft existiert, und da wir mit dem Auge die größte Fülle von Tatsachen auf einmal erfassen (wir sagen charakteristisch genug übersehen) können, so folgt hieraus das Bedürfnis, die Resultate des Kalküls anschaulich zu machen, und zwar nicht bloß für die Phantasie, sondern auch sichtbar für das Auge, greifbar für die Hand, mit Gips und Pappe.“ So wurde gelegentlich auch in den Vorlesungen die

Bildhaftigkeit bis zum Äußersten getrieben. Beispielsweise wurde die Verbindung von Körpern in der Elastizitätslehre durch Aufmalen von Dutzenden Häkchen, durch die sie aneinander hängen, recht eindringlich gemacht⁴⁾.

Auch die Verwendung von Maschinen aller Art in der Physik wird in lebhafter Weise befürwortet, teils um Theorien zu veranschaulichen, teils um durch mechanische und graphische Operationen Ergebnisse zu gewinnen. Mit Begeisterung wird die Idee LORD KELVINS (WILLIAM THOMSONS) aufgenommen, „sogar“ ein mathematisches Institut für solche Rechnungen zu gründen. (Wie hätte Boltzmann die elektronischen Recheninstitute unserer Zeit geschätzt!) Im Vortrag über den *Zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie* sagt er: „Nicht bloß Vorrichtungen, um die Naturkräfte in neuer Weise dienstbar zu machen, sehe ich in jenen (wissenschaftlichen) Apparaten, nein, mit weit größerer Ehrfurcht betrachte ich sie, ich wage zu sagen, daß ich darin die wahren Vorrichtungen erblicke, um das Wesen der Dinge zu entschleiern.“

Die Anschaulichkeit ihrer Vorstellungen erscheint Boltzmann als ein Moment, das zum großartigen Erfolg der Elektrizitätstheorien FARADAYS und MAXWELLS wesentlich beitrug. „FARADAY sah“, so heißt es, „deutlich das Weben und Wirken der elektrischen Kräfte von Punkt zu Punkt im Zwischenraum“, während MAXWELL gar aus Flüssigkeitswirbeln und Friktionsrollen, die sich innerhalb Zellen mit elastischen Wänden bewegen, ein bewunderungswürdiges Modell des Elektromagnetismus konstruierte. MAXWELL begründet diese „dynamischen Illustrationen“, die „mechanischen Analogien, welche im gegenwärtigen Augenblick die Gesamtheit der Erscheinungen am einheitlichsten zusammenzufassen gestatten“, dadurch, daß „durch derartige mechanische Fiktionen weitere Forschungen auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre mehr gefördert als gehindert sein würden.“ Mit Wohlgefallen vergleicht Boltzmann auch die derb realistische Theorie nicht des idealen elastischen Körpers, sondern des Stahls, Kautschuks, Leims, die LORD KELVIN gab, mit der „fast

ätherisch fein ausgearbeiteten, kristallklaren, aber farblosen“ Elastizitätstheorie KIRCHHOFFS.

Überhaupt wird die „Phänomenologie“, die reine — positivistische — Beschreibung, die auf Bilder und Hypothesen weitgehend verzichtet und sich mit einer Behandlung der unmittelbar meßbaren Größen begnügen will, von Boltzmann mit Kühle behandelt, wenn er auch dem Geist Mancher ihrer Vertreter, wie KIRCHHOFFS oder HEINRICH HERTZ', bereitwillig höchstes Lob zollt (siehe S. 131). In der *Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit* wird festgestellt: „Er (HERTZ) fällt daher das salomonische Urteil, es sei das beste, nachdem man diese Gleichungen (die Grundgleichungen der Mechanik und Elektrodynamik) einmal habe, sie ohne jede Ableitung hinzuschreiben, dann mit den Erscheinungen zu vergleichen und in ihrer steten Übereinstimmung mit denselben den besten Beweis ihrer Richtigkeit zu erblicken.“

„Die Ansicht, deren Extrem hiermit ausgesprochen ist, fand die verschiedenste Aufnahme. Während die Einen fast geneigt waren, sie für einen schlechten Witz zu halten, schien es Andern von nun an als einziges Ziel der Physik, ohne jede Hypothese, ohne jede Veranschaulichung oder mechanische Erläuterung für jede Reihe von Vorgängen Gleichungen aufzuschreiben, aus denen ihr Verlauf quantitativ berechnet werden kann, so daß die alleinige Aufgabe der Physik darin bestünde, durch Probieren möglichst einfache Gleichungen zu finden, welche gewisse notwendige formale Bedingungen . . . erfüllen, und sie dann mit der Erfahrung zu vergleichen . . . Die allgemeine Phänomenologie ist charakterisiert durch den von MACH zitierten Ausspruch, daß die Elektrizität nichts anderes ist als die Summe aller Erfahrungen, welche wir auf diesem Gebiet schon gemacht haben und noch zu machen hoffen . . . Es muß zugegeben werden, daß der Zweck jeder Wissenschaft, daher auch der Physik, in der vollkommensten Weise erreicht wäre, wenn man Formeln gefunden hätte, mittels derer man die zu erwartenden Erscheinungen in jedem speziellen Fall eindeutig, sicher und vollkommen genau voraus be-

rechnen könnte; allein dies ist ebenso ein unerfüllbares Ideal wie die Kenntnis des Wirkungsgesetzes und des Anfangszustandes aller Atome.“

„Wenn die Phänomenologie glaubte, die Natur darstellen zu können, ohne irgendwie über die Erfahrung hinauszugehen, so halte ich das für eine Illusion. Keine Gleichung stellt irgendwelche Vorgänge absolut genau dar, jede idealisiert sie, hebt Gemeinsames heraus und sieht von Verschiedenem ab, geht also über die Erfahrung hinaus. Daß dies notwendig ist, wenn wir irgendeine Vorstellung haben wollen, die uns etwas Künftiges voraussagen erlaubt, folgt aus der Natur des Denkprozesses selbst, der darin besteht, daß wir zur Erfahrung etwas hinzufügen und ein geistiges Bild schaffen, welches nicht die Erfahrung ist und darum viele Erfahrungen darstellen kann.“

„Die Erfahrung, sagt GOETHE, ist immer nur zur Hälfte Erfahrung. Je kühner man über die Erfahrung hinausgeht, desto allgemeinere Überblicke kann man gewinnen, desto überraschendere Tatsachen entdecken, aber desto leichter kann man auch irren. Die Phänomenologie sollte daher nicht prahlen, daß sie die Erfahrung nicht überschreitet, nur warnen, dies in zu hohem Maß zu tun. Auch, wenn sie kein Bild für die Natur zu setzen glaubt, irrt sie . . . Es wird daher wohl der beste Erfolg erzielt werden, wenn man stets alle Abbildungsmittel je nach Bedürfnis verwendet, aber nicht versäumt, die Bilder auf jedem Schritt an neuen Erfahrungen zu prüfen.“ So ist begreiflich, daß Boltzmann in den *Vorlesungen über Gastheorie* die Mahnung ausspricht, „das Dogma von der allein seligmachenden Phänomenologie zu vermeiden.“

In der Polemik gegen die Energetiker (1896) heißt es: „Neben dieser allgemeinen (beschreibenden) theoretischen Physik sind die Bilder der mechanischen Physik, sowohl um Neues zu finden, als auch um die Ideen zu ordnen, übersichtlich darzustellen und im Gedächtnis zu halten, äußerst nützlich und noch heute fortzupflegen. Die Möglichkeit einer mechanischen Erklärung der ganzen Natur ist nicht bewiesen, ja, daß wir dieses Ziel vollkommen erreichen werden,

kaum denkbar. Doch ist ebensowenig bewiesen, daß wir darin nicht noch vielleicht große Fortschritte machen werden und daraus noch vielfachen neuen Nutzen ziehen können. Niemand kann weiter davon entfernt sein als die Vertreter der heutigen theoretischen Physik, zu behaupten, daß man sicher wisse, daß die in derselben herausgebildeten Denkformen sich ewig als die passendsten erweisen werden. Niemand kann weiter davon entfernt sein, Versuchen, andere Denkformen auszubilden, etwas in den Weg zu stellen, oder sie von vornherein als verfehlt erklären zu wollen. Doch dürfen dieselben auch nicht, bevor sie wirkliche Erfolge erreicht haben, polemisch gegen die altbewährten Denkformen auftreten oder diese gar als nur wenig verschieden vom völligen Unsinn bezeichnen. Die Ausdrucksweise der allgemeinen theoretischen Physik ist vielmehr heute noch die zweckmäßigste und praktischste, die uralten Bilder der mechanischen Physik sind noch keineswegs überflüssig.“

Und in der *Unentbehrlichkeit der Atomistik*: „Natürlich ist die Forderung berechtigt, daß man dem Bilde nicht mehr Willkürliches ... hinzufüge, als zur Beschreibung größerer Erscheinungsbereiche unumgänglich notwendig ist, daß man stets bereit sei, das Bild abzuändern, ja die Möglichkeit im Auge behalte, einmal zu erkennen, daß an Stelle des Bildes besser ein ganz neues, grundverschiedenes treten müsse ... Zum Schlusse möchte ich noch weitergehend mich fast zur Behauptung versteigen, daß es in der Natur des Bildes liege, daß dasselbe gewisse willkürliche Züge behufs der Abbildung beifügen muß, und daß man, strenge genommen, jedesmal über die Erfahrung hinausgehe, sobald man aus einem gewissen Tatsachen angepaßten Bilde auch nur auf eine einzige neue Tatsache schließt.“

Schließlich wird die Folgerung gezogen: „Ganz verfehlt erscheint es mir daher, wenn man mit Entschiedenheit behauptet, daß Bilder, wie die spezielle mechanische Wärmetheorie oder die Atomtheorie des Chemismus und der Kristallisation, einmal aus der Wissenschaft verschwinden müßten. Es kann nur gefragt werden,

ob die Übereilung, welche in der Kultivierung solcher Bilder liegt, oder die zu große Vorsicht, welche empfiehlt, sich derselben zu enthalten, für die Wissenschaft unvorteilhafter wäre.“

DENKGESETZE

„Wenn Sie mich nach meiner innersten Überzeugung fragen, ob man unser Jahrhundert einmal das eiserne Jahrhundert oder das Jahrhundert des Dampfes oder der Elektrizität nennen wird, so antworte ich ohne Bedenken, das Jahrhundert der mechanischen Naturauffassung, das Jahrhundert DARWINS wird es heißen,“ sagte Boltzmann in seinem Vortrag über den *Zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie* (1886). In späteren Jahren, als Boltzmann die Rolle der Mechanik im Rahmen der Naturgesetzlichkeit weniger weit faßte (siehe S. 45), hätte er allerdings wohl einen anderen Ausdruck statt „mechanische Naturauffassung“ vorgezogen.

Das sehr nachdrücklich betonte Bekenntnis Boltzmanns zu DARWIN entsprang nicht nur seiner Überzeugung, daß die Abstammungslehre den Schlüssel zum Verständnis der Entwicklung des Lebens bis zum Menschen bietet, sondern Boltzmann betrachtete auch die Gesamtheit der geistigen Prozesse, die „Theorie“ in dem weiten Sinne, in dem er diesen Begriff faßte, vom Standpunkt der Lehre DARWINS. Nur jene psychischen und Denkprozesse, die im Laufe der Zeiten während der Entwicklung der lebenden Materie vom Eiweißklümpchen bis zum Menschen ihre Bewährungsprobe ablegten, indem sie das richtige Verständnis der Natur ermöglichten, wie sie wirklich ist, konnten sich behaupten und bei der Entwicklung der Lebewesen auf die Nachkommen vererbt werden.

Über die zentrale Frage der Entstehung des Bewußtseins äußert Boltzmann an der gleichen Stelle viele Jahre vor OPARIN, der die

Lehre DARWINS auf das Problem der Lebensentstehung anwendete, und vor PAWLOW, der eine experimentelle Basis für die entwicklungsgeschichtliche Analyse der psychischen Vorgänge schuf: „Wir machen die Hypothese, es hätten sich Atomkomplexe entwickelt, die imstande waren, sich durch Bildung gleichartiger um sich herum zu vermehren. Von den so entstandenen größeren Massen waren jene am lebensfähigsten, die sich durch Teilung zu vervielfältigen vermochten, dann jene, denen eine Tendenz innewohnte, sich nach Stellen günstiger Lebensbedingungen hin zu bewegen.“

„Dies wurde sehr gefördert durch Empfänglichkeit für äußere Eindrücke, chemische Beschaffenheit und Bewegung des umgebenden Mediums, Licht und Schatten usw. Die Empfänglichkeit führte zur Entwicklung von Empfindungsnerve, die Beweglichkeit zu Bewegungsnerve; Empfindungen, an welche sich durch Vererbung die fortwährend mächtig zwingende Meldung an die Zentralstelle knüpft, sie zu fliehen, nennen wir Schmerzen. Ganz rohe Zeichen für äußere Gegenstände blieben im Individuum zurück, sie entwickelten sich zu komplizierten Zeichen für verwickelte Verhältnisse, nach Bedürfnis wohl auch zu ganz rohen wirklichen inneren Nachahmungen des Äußeren, wie der Algebraiker die Größen mit beliebigen Buchstaben bezeichnen kann, aber mit Vorliebe die Anfangsbuchstaben entsprechender Worte wählt. Ist für das Individuum selbst ein entwickeltes derartiges Erinnerungsvermögen vorhanden, so definieren wir dies als Bewußtsein. Dabei ist von den eng damit verknüpften klar bewußten Vorstellungen bis zu den im Gedächtnis aufgespeicherten, bis zu den unbewußten Reflexbewegungen eine kontinuierliche Brücke. Sagt uns unser Gefühl da nicht wieder, daß das Bewußtsein noch etwas ganz anderes ist? Aber ich habe dem Gefühl das Wort entzogen. Erklärt die Hypothese alle betreffenden Erscheinungen, so wird es sich fügen müssen, wie es in der Frage der Achsendrehung der Erde geschah (d. h. beim Umsturz der Astronomie durch KOPERNIKUS. E. B.).“

Die Betrachtung wird im Artikel *Objektive Existenz der Vorgänge*

in der unbelebten Natur elf Jahre später konkreter gefaßt: „Die innige Verknüpfung des Psychischen mit dem Physischen endlich ist uns erfahrungsmäßig gegeben. Vermöge derselben ist es höchstwahrscheinlich, daß jedem psychischen Vorgang ein materieller Vorgang im Gehirn entspricht, d. h. eindeutig zugeordnet ist, und daß die letzteren insgesamt echte materielle Vorgänge, d. h. durch dieselben Bilder und Gesetze darstellbar sind, wie die Vorgänge in der unbelebten Natur. Dann müßten aber aus den zur Darstellung der Gehirnvorgänge dienenden Bildern auch alle psychischen Vorgänge vorhergesagt werden können. Es müßten also alle psychischen Vorgänge aus den Bildern, welche zur Darstellung der unbelebten Natur dienen, ohne Änderung der dort geltenden Gesetze vorausgesagt werden können . . .“

„Das Gehirn betrachten wir als den Apparat, das Organ zur Herstellung der Weltbilder, welches sich wegen der großen Nützlichkeit dieser Weltbilder für die Erhaltung der Art entsprechend der DARWINSchen Theorie beim Menschen geradeso zur besonderen Vollkommenheit herausbildete wie bei der Giraffe der Hals, beim Storch der Schnabel zu ungewöhnlicher Länge . . .“

„Sobald wir uns dieser Ansicht anschließen, müssen wir annehmen, daß die Bilder und Gesetze, die zur Darstellung der Vorgänge in der unbelebten Natur dienen, ausreichen, um auch alle psychischen Vorgänge eindeutig darzustellen, wir sagen kurz: Die psychischen Vorgänge sind mit gewissen materiellen Vorgängen im Gehirn identisch (Realismus).“

Die Gesetze seines Denkens verdankt der Mensch, wie im Vortrag gegen SCHOPENHAUER (1905) betont wird, der Entwicklung. „Wie wird es jetzt um das stehen, was man in der Logik Denkgesetze nennt? Nun, diese Denkgesetze werden im Sinne DARWINS nichts anderes sein als ererbte Denkgewohnheiten. Die Menschen haben sich allmählich gewöhnt, die Worte, mit denen sie sich verständigen und die sie beim Denken still vor sich hin sagen, deren Gedächtnisbilder, und alles, was an inneren Vorstellungen zur Bezeichnung der Dinge

verwendet wird, so festzustellen und zu verbinden, daß sie dadurch befähigt wurden, jedesmal in die Erscheinungswelt in der beabsichtigten Weise einzugreifen, d. h. sich mit ihnen zu verständigen. Diese Eingriffe werden durch das Aufbewahren und zweckmäßige Ordnen der Erinnerungsbilder und das Erlernen und die Einübung des Sprechens sehr gefördert, welche Förderung das Kriterium der Wahrheit ist.“

„Diese Methode, die Vorstellungsbilder und die still und laut gesprochenen Worte zusammenzustellen, hat sich immer mehr und mehr vervollkommnet und sich so vererbt, daß sich feste Gesetze des Denkens entwickelt haben. Es ist ganz richtig, daß, wenn wir diese Denkgesetze nicht mitbringen würden, jedes Erkennen aufhören würde und die Wahrnehmungen ohne jeden Zusammenhang wären.“

„... Man kann diese Denkgesetze aprioristisch nennen, weil sie durch die vieltausendjährige Erfahrung der Gattung dem Individuum angeboren sind. Jedoch scheint es nur ein logischer Schnitzer von KANT zu sein, daß er daraus auch auf ihre Unfehlbarkeit in allen Fällen schließt.“

„Nach der DARWINSchen Theorie ist dieser Schnitzer vollkommen erklärlich. Nur das, was sicher war, hat sich vererbt. Was unrichtig war, ist abgestoßen worden. So erhielten diese Denkgesetze einen derartigen Anschein von Unfehlbarkeit, daß man sogar die Erfahrung vor ihrem Richterstuhl stellen zu dürfen glaubte. Da sie nun aprioristisch genannt wurden, schloß man, daß alles aprioristische unfehlbar, vollkommen sei. Ebenso hat man früher angenommen, daß unser Ohr, unser Auge auch absolut vollkommen seien, weil sie wirklich sich zu staunenswerter Vollkommenheit entwickelt haben. Heute weiß man, daß es ein Irrtum ist, daß sie nicht vollkommen sind.“

„Analog möchte ich bestreiten, daß unsere Denkgesetze absolut vollkommen sind ... Sie verhalten sich dann nicht anders als alle vererbten Gewohnheiten.“ Die Gesetze des euklidischen Raums und das Gesetz der Erhaltung der Energie werden als Beispiele von Denk-

gesetzen genannt, die der Bestätigung durch die Erfahrung bedürfen, wenn sie auf die Natur angewendet werden sollen.

(Es kann natürlich nicht überraschen, daß diese Auffassungen Boltzmanns vielfach auf Ablehnung stießen. So meinte HÖFLER, daß „die Haltung Boltzmanns zum Psychischen von vornherein als unmöglich zu bezeichnen“ sei¹.)

In seiner Diskussion mit HEINRICH HERTZ (1899), der in einem berühmten Buch über die Prinzipien der Mechanik die Forderung aufgestellt hatte, daß die Bilder, die wir uns konstruieren, den Denkgesetzen entsprechen müssen, schreibt Boltzmann: „Gegen diese Forderung möchte ich gewisse Bedenken erheben oder wenigstens sie etwas näher erläutern. Gewiß müssen wir einen reichen Schatz von Denkgesetzen mitbringen. Ohne sie wäre die Erfahrung vollkommen nutzlos; wir könnten sie gar nicht durch innere Bilder fixieren. Diese Denkgesetze sind uns fast ausnahmslos angeboren, aber sie erleiden doch durch Erziehung, Belehrung und eigene Erfahrung Modifikationen. Sie sind nicht vollkommen gleich beim Kinde, beim einfachen ungebildeten Mann oder beim Gelehrten. Wir werden dies auch einsehen, wenn wir die Denkrichtung eines naiven Volkes wie der Griechen mit der der Scholastiker des Mittelalters, und diese wieder mit der heutigen vergleichen. Gewiß gibt es Denkgesetze, welche sich so ausnahmslos bewährt haben, daß wir ihnen unbedingt vertrauen, sie für aprioristische unabänderliche Denkprinzipien halten. Aber ich glaube doch, daß sie sich erst langsam entwickelten. Ihre erste Quelle waren primitive Erfahrungen der Menschheit im Urzustande, allmählich erstarkten sie und verdeutlichten sich durch komplizierte Erfahrungen, bis sie endlich ihre jetzige scharfe Formulierung annehmen; aber als unbedingt oberste Richter möchte ich die Denkgesetze nicht anerkennen. Wir können doch nicht wissen, ob sie nicht doch noch die eine oder andere Modifikation erfahren werden. Man erinnere sich doch, mit welcher Sicherheit Kinder oder Ungebildete überzeugt sind, daß man durch das bloße Gefühl die Richtung nach oben von der nach unten an allen

Orten des Weltraums müsse unterscheiden können, und wie sie daraus die Unmöglichkeit der Antipoden deduzieren zu können glauben. Würden solche Leute Logik schreiben, so würden sie das sicher für ein a priori evidenten Denkgesetz halten. Ebenso wurden anfangs gegen die kopernikanische Theorie vielfach aprioristische Bedenken erhoben und die Geschichte der Wissenschaft weist zahlreiche Fälle auf, wo man Sätze bald begründete, bald widerlegte mittels Beweisgründen, die man damals für evidente Denkgesetze hielt, während wir jetzt von ihrer Nichtigkeit überzeugt sind. Ich möchte daher die HERTZsche Forderung dahin modifizieren, daß, insoweit wir Denkgesetze besitzen, welche wir durch stete Bewahrheitung in der Erfahrung als zweifellos richtig erkannt haben, wir die Richtigkeit unserer Bilder zunächst an diesen erproben können, daß aber die letzte und alleinige Entscheidung über die Zweckmäßigkeit der Bilder in dem Umstand liegt, daß sie die Erfahrung möglichst einfach und durchaus treffend darstellen, und daß gerade hierin wieder die Probe für die Richtigkeit der Denkgesetze liegt.“

Auch im Vortrag *Über statistische Mechanik* (1904) spricht Boltzmann von „übermäßigem Vertrauen in die sogenannten Denkgesetze.“ „Wohl ist es sicher, daß wir keine Erfahrungen machen könnten, wenn uns nicht gewisse Formen des Verknüpfens der Wahrnehmung, also des Denkens angeboren wären. Wenn wir dies Denkgesetze nennen wollen, so sind sie freilich insofern aprioristisch, als sie vor jeder Erfahrung in unserer Seele, oder, wenn wir lieber wollen, in unserem Gehirn vorhanden sind. Allein nichts scheint mir weniger motiviert, als ein Schluß von der Apriorität in diesem Sinne auf absolute Sicherheit, auf Unfehlbarkeit. Diese Denkgesetze haben sich nach den gleichen Gesetzen der Evolution gebildet wie der optische Apparat des Auges, der akustische des Ohres, die Pumpvorrichtung des Herzens. Im Verlauf der Entwicklung der Menschheit wurde alles Unzweckmäßige abgestreift, und so entstand jene Einheitlichkeit und Vollendung, welche leicht Unfehlbarkeit vortäuschen kann. So erregt ja auch die Vollkommenheit des Auges, des Ohres, der Ein-

richtung des Herzens unsere Bewunderung, ohne daß jedoch die absolute Vollkommenheit dieser Organe behauptet werden kann. Ebensovienig dürfen die Denkgesetze als absolut unfehlbar betrachtet werden. Ja gerade sie haben sich behufs Erfassung des zum Lebensunterhalt Notwendigen, des praktisch Nützlichen herausgebildet . . . Sobald daher Widersprüche scheinbar nicht zu beseitigen sind, müssen wir sofort das, was wir unsere Denkgesetze nennen, was aber nichts anderes als ererbte und angewöhnte, zur Bezeichnung der praktischen Erfordernisse durch Äonen bewährte Vorstellungen sind, zu prüfen, zu erweitern und abzuändern suchen. Geradeso wie zu den ererbten Erfindungen der Walze, des Karrens, des Pfluges schon längst unzählige künstliche, mit klarem Bewußtsein geschaffene, getreten sind, so müssen wir hier ebenfalls die ererbten Vorstellungen künstlich und mit Bewußtsein besser ordnen. Unsere Aufgabe kann nicht sein, das Gegebene vor den Richterstuhl unserer Denkgesetze zu zitieren, sondern vielmehr unsere Gedanken, Vorstellungen und Begriffe dem Gegebenen anzupassen . . .“

„Unsere angeborenen Denkgesetze sind zwar die Vorbedingung unserer komplizierten Erfahrung, aber sie waren es nicht bei den einfachsten Lebewesen. Bei diesen entstanden sie langsam auch durch deren einfache Erfahrungen und vererbten sich auf die höher organisierten Wesen fort. Dadurch erklärt es sich, daß darin synthetische Urteile vorkommen, welche von unseren Ahnen erworben, für uns angeboren, also aprioristisch sind. Es folgt daraus ihre zwingende Gewalt, aber nicht ihre Unfehlbarkeit.“

Das wissenschaftliche Denken, in dem die Denkgesetze ihre schärfste Anwendung finden, entstammt letzten Endes ebenso wie jedes andere Denken den Bedürfnissen des Lebens. „Mag sich die Wissenschaft auch noch so sehr der Idealität ihrer Ziele rühmen und auf die Technik und Praxis mit einer gewissen Geringschätzung herabschauen, es läßt sich doch nicht leugnen, daß sie ihren Ursprung in dem Streben nach der Befriedigung rein praktischer Bedürfnisse nahm. Andererseits wäre der Siegeszug der heutigen Naturwissen-

schaft niemals ein so beispiellos glänzender gewesen, wenn dieselbe nicht an den Technikern so tüchtige Pioniere besäße.“ (*Prinzipien der Mechanik.*)

INHALTSLOSE FRAGESTELLUNGEN

Da sich die belebte Materie im Laufe der Entwicklung in Beziehung zur Umwelt bewähren mußte, neigt auch das Denken zu Fragestellungen, die die Beherrschung der Umwelt erleichtern, also zu produktiven Fragestellungen, zum Aufwerfen von Problemen, die einer Lösung überhaupt fähig sind. Boltzmann wendet sich gegen das bei den Metaphysikern auftretende Bestreben, Fragestellungen über das natürliche Ziel hinauszutreiben, wobei dann die Antworten nur aus leeren Worten bestehen können, aber keine neuen Erkenntnisse mehr bringen. So meint er im Vortrag über den zweiten Hauptsatz: „Wenn man Bewegungen aus Kräften, Kräfte aus dem Wesen der Dinge, Erscheinungen aus Dingen an sich erklären will, so scheint man da immer von der Auffassung auszugehen, als ob die Erklärung erfordere, daß das zu Erklärende auf ein ganz neues, außer ihm liegendes Prinzip zurückgeführt werde. Diese Auffassung ist der Naturwissenschaft fremd. Diese löst bloß Komplexe in einfachere, aber gleichartige Bestandteile auf, führt kompliziertere Gesetze auf fundamentalere zurück. Wenn nun dieser Prozeß oft gelingt, so wird er uns so zur Gewohnheit, daß wir auch dort nicht stillstehen wollen, wo er naturgemäß zu Ende ist. Man pflegt wohl gar darin eine Beschränkung unseres Intellekts zu erblicken, daß, wenn es uns gelungen wäre, die einfachsten Grundgesetze zu finden, wir diese dann doch nicht mehr erklären oder begründen, d. h. weiter in einfachere zerlegen könnten; daß wir die Existenz der elementarsten Wesen doch nicht begreifen, d. h. auf noch elementarere zurückführen können.“

Boltzmann vergleicht das Bestreben, hinter den beobachteten Naturgesetzen immer weitere zu suchen, mit dem Bemühen, hinter einem gemalten Vorhang das „wirkliche“ Bild zu suchen.

Auch in der Diskussion mit HERTZ (1899) gibt Boltzmann seiner Abneigung Ausdruck, nach dem „Wesen“ der physikalischen Grundbegriffe zu fragen: „Was die eigentliche Ursache sei, daß die Erscheinungswelt sich gerade so abspielt, was gewissermaßen hinter der Erscheinungswelt verborgen ist und sie treibt, das zu erforschen, betrachten wir nicht als Aufgabe der Naturwissenschaft. Ob es Aufgabe einer anderen Wissenschaft sei und sein könne, ob wir da nicht vielleicht bloß nach Analogie mit anderen vernünftigen Wortzusammenstellungen hier Worte aneinandergesetzt haben, welche in diesen Verbindungen keinen klaren Gedanken ausdrücken, das kann hier vollständig dahingestellt bleiben.“

Woher stammt nun die immer wieder beobachtete, oft mächtige Neigung zur Stellung unfruchtbarer Scheinfragen? Boltzmann meint, daß der Mensch bei seinem Denken, das ihm in der Regel so wohl dient, dann auch übers Ziel hinausschießt und die vertrauten Denkgesetze über ihren natürlichen Anwendungsbereich hinaus anzuwenden trachtet. Er sagt im Vortrag *Über Statistische Mechanik*: „Viel Unzweckmäßiges in den Gewohnheiten und dem Verhalten der Lebewesen wird dadurch hervorgerufen, daß eine Handlungsweise, welche in den meisten Fällen zweckmäßig ist, so zur Gewohnheit, zur zweiten Natur wird, daß man nicht mehr davon lassen kann, wenn irgendwo ihre Zweckmäßigkeit aufhört. Ich sage da, die Anpassung schießt über das Ziel hinaus. Dies trifft besonders häufig bei den Denkgewohnheiten zu und wird die Quelle scheinbarer Widersprüche zwischen den Denkgesetzen und der Welt, sowie zwischen den Denkgesetzen untereinander.“

„So ist die Gesetzmäßigkeit alles Naturgeschehens die Grundbedingung aller Erkennbarkeit; daher wird die Gewohnheit, bei allem nach der Ursache zu fragen, zum unwiderstehlichen Zwange, und wir fragen auch nach der Ursache, warum alles eine Ursache hat. In der

Tat zerbrach man sich den Kopf, ob Ursache und Wirkung ein notwendiges Band, oder bloß eine zufällige Aufeinanderfolge darstellen, während es doch nur einen Sinn hat, zu fragen, ob eine spezielle Erscheinung immer mit einer bestimmten Gruppe anderer verbunden, deren notwendige Folge ist, oder ob sie unter Umständen auch fehlt.“

„Ebenso heißt etwas nützlich, wertvoll, wenn es die Lebensbedingungen des Einzelnen oder der Menschheit fördert; aber wir schießen über das Ziel hinaus, wenn wir nach dem Wert des Lebens selbst fragen, wenn uns dieses etwa als wertlos erscheint, weil es keinen außer sich liegenden Zweck hat. Ähnlich geht es auch, wenn wir uns vergeblich bemühen, die einfachsten Begriffe, aus denen alles aufgebaut ist, selbst wieder aus einfacheren aufzubauen, die einfachsten Grundgesetze selbst wieder zu erklären.“

„Wir dürfen nicht die Natur aus unseren Begriffen ableiten, sondern müssen die letzteren der ersteren anpassen. Wir dürfen nicht glauben, daß sich alles nach unseren Kategorien einteilen läßt und es eine vollkommenste Einteilung gäbe.“

In diesem Sinne nimmt Boltzmann im SCHOPENHAUER-Vortrag Stellung: „So hat das kleine Kind den Saugtrieb, sonst wäre es unmöglich, daß es am Leben bleibe, und dieser Saugtrieb wird ihm so zur Gewohnheit, daß es später am leeren Kautschuk saugt. So schießen auch die Denkgesetze oft über das Ziel hinaus und der Philosoph sucht aus dem Begriff des Nichts eine ganze Theorie der Welt herauszusaugen. Ebenso schießt die altbewährte und, wie schon das ewige Warumfragen kleiner Kinder zeigt, vererbte Gewohnheit, stets nach der Ursache zu fragen, über das Ziel hinaus, wenn wir nach der Ursache fragen, warum das Gesetz der Ursache und Wirkung gilt; ebenso, wenn wir fragen, warum die Welt überhaupt existiert, warum sie gerade so ist, wie sie ist, warum wir überhaupt, warum wir gerade jetzt existieren usw.“

Von ganz besonderer Bedeutung ist, daß Boltzmann keineswegs meint, daß die von ihm aus dem Bereich der Wissenschaft ausgeschlossenen Fragen dann etwa Gegenstand geistiger Tätigkeit anderer

Art, etwa metaphysischer Spekulationen oder gefühlsmäßiger, mystischer Erfassung sein oder gar nur von einem außer- und übermenschlichen Geist beantwortet werden können. Vielmehr werden diese außerwissenschaftlichen Fragen im Vortrag *Über statistische Mechanik* überhaupt und gänzlich abgelehnt: „Meine gegenwärtige Lehre ist total verschieden von der, daß gewisse Fragen außerhalb der Grenzen menschlicher Erkenntnis fallen. Denn nach letzterer Lehre liegt darin ein Mangel, eine Unvollkommenheit des menschlichen Erkenntnisvermögens, während ich die Existenz dieser Fragen, dieser Probleme selbst für eine Sinnestäuschung halte.“ Eine Sinnestäuschung freilich, an der wir mit großer Hartnäckigkeit festhalten — oftmals auch, nachdem wir ihre Ursache erkannt haben.

REALITÄT DER AUSSENWELT

Tiefe Gedanken sind von Boltzmann in seiner immer wieder aufgenommenen Polemik gegen die Schulen der idealistischen Philosophie über die Frage des Verhältnisses von Sein und Bewußtsein und damit auch über die Frage der Realität der Außenwelt ausgesprochen worden. Die Polemik ist gegen die Philosophen des 18. Jahrhunderts HUME und BERKELEY wie auch gegen seinen Zeitgenossen und Kollegen ERNST MACH gerichtet.

Boltzmann will die wichtigste Frage der Erkenntnislehre, die Frage des Verhältnisses von Sein und Bewußtsein, nicht vom einseitigen Standpunkt des denkenden Subjekts stellen. Zwar ist bekanntlich nach Auffassung Mancher der Standpunkt abstrakt logisch nicht anzugreifen, daß nichts anderes existiert als der jeweilige Sinneseindruck des individuellen denkenden Philosophen. Boltzmann verweist jedoch darauf, daß dieser Standpunkt, wenn konsequent durchgeführt, zur „alten Verirrung“, zur „Schrulle“ des

Solipsismus führt. „Der Name BERKELEY ist der eines hochangesehenen englischen Philosophen, dem man sogar nachrühmt, der Erfinder der größten Narrheit zu sein, die je ein Menschenhirn ausgebrütet hat, des philosophischen Idealismus, der die Existenz der materiellen Welt leugnet“, schreibt er an der Universität Berkeley in Kalifornien.

In der Argumentation gegen OSTWALDS Vortrag gegen den Materialismus (1896) wird näher ausgeführt: „Überhaupt hat das Mißtrauen zu den aus den direkten Sinneswahrnehmungen erst abgeleiteten Vorstellungen zu dem dem früheren naiven Glauben entgegengesetzten Extrem geführt. Nur die Sinneswahrnehmungen sind uns gegeben, daher — heißt es — darf man keinen Schritt darüber hinausgehen. Aber wäre man konsequent, so müßte man weiter fragen: Sind uns auch unsere gestrigen Sinneswahrnehmungen gegeben? Unmittelbar gegeben ist uns doch nur die eine Sinneswahrnehmung oder der eine Gedanke, den wir jetzt im Moment denken. Wäre man konsequent, so müßte man nicht nur alle anderen Wesen außer dem eigenen Ich, sondern sogar alle Vorstellungen, die man zu allen früheren Zeiten hatte, leugnen. Woher weiß ich denn davon? Durch Erinnerung; aber woher weiß ich, daß nicht bloß die Erinnerung vorhanden ist, die Wahrnehmung aber, auf die ich mich erinnere, niemals vorhanden war, wie das bei Irren fortwährend, und hier und da auch bei Nichtirren vorkommt. Will man also nicht zum Schlusse kommen, daß überhaupt nur die Vorstellung, die ich momentan habe, und sonst gar nichts existiert, was schon durch den Nutzen des Wissens für die Handlungsweise widerlegt wird, so muß man schließlich bei aller dabei nötigen Vorsicht doch unsere Fähigkeit, aus den Wahrnehmungen auf etwas, was wir nicht wahrnehmen, Schlüsse zu ziehen, zugeben, die wir freilich immer zu korrigieren haben, sobald sie mit Wahrnehmungen in Widerspruch kommen.“

Die Polemik gegen den philosophischen Idealismus wird in der Abhandlung *Über die Frage nach der objektiven Existenz der Vorgänge in der unbelebten Natur* (1897) konsequent weitergeführt.

Es wird betont, daß die Mitmenschen sich äußeren Einflüssen gegenüber, beispielsweise bei Berührung mit dem Feuer, ebenso verhalten wie wir selbst, und daß es daher keine Komplizierung, sondern eine Vereinfachung unseres Weltbildes darstellt, wenn wir ihnen die gleichen Empfindungen wie uns selbst zuschreiben, damit aber das Monopol durchbrechen, das das denkende Subjekt nach Ansicht des subjektiven Idealismus haben soll. Wenn wir aber den Menschen außerhalb des eigenen Ich die gleiche Existenz zuschreiben wie uns selbst, so ist es bis zur Bejahung der objektiven Existenz der unbelebten Materie nur ein weiterer — und notwendiger — Schritt.

„Wir bezeichnen daher diese fremden Empfindungen mit analogen Gedankenzeichen und Worten wie die eigenen (wir stellen sie vor), weil uns dies ein gutes Bild des Verlaufs vieler Empfindungskomplexe liefert, unser Weltbild vereinfacht. Um auszudrücken, daß dies vorgestellte Empfindungen sind, sagen wir, es sind nicht unsere eigenen, sondern die fremder Menschen . . . Analog wie die Empfindungen fremder Menschen existieren auch die Vorgänge in der unbelebten Natur für uns bloß in unserer Vorstellung, d. h. wir markieren sie durch gewisse Gedanken und Wortzeichen, weil uns dies die Konstruktion eines zur Vorherverkündigung unserer künftigen Empfindungen tauglichen Weltbildes erleichtert. Die Vorgänge in der unbelebten Natur stehen also in dieser Beziehung den Empfindungen der fremden Menschen, die unbelebten Dinge selbst den fremden Menschen vollkommen gleich, nur daß die Zeichen und die Gesetze ihrer Verbindung jetzt von den bei Darstellung unserer Empfindungen angewandten viel verschiedener sind. ‚Ein unbelebtes Ding existiert oder nicht‘ hat dieselbe Bedeutung wie ‚ein Mensch existiert oder nicht‘. Es wäre also ein vollständiger Irrtum, wenn man glauben würde, man hätte auf diesem Wege bewiesen, daß die Materie mehr ein Gedankending ist als ein fremder Mensch.“

Nachdem auf die große Bedeutung des Umstandes verwiesen wird, daß wir uns mit anderen Menschen durch die Sprache verständigen können und sich dabei die Gleichartigkeit unseres Eindruckes von

der Welt ergibt, wird geschlossen, daß man sich, wie man sagt, „auf den objektiven Standpunkt stellen muß. Es zeigt sich da, daß die Begriffe, welche wir mit ‚Existieren‘ und ‚Nichtexistieren‘ verbanden, größtenteils unverändert anwendbar bleiben. Diejenigen Menschen oder unbelebten Dinge, welche ich mir nur einbilde, d. h. vorstelle, ohne daß es durch Regelmäßigkeiten von Empfindungskomplexen gefordert wurde, existieren auch für andere Menschen nicht, sie existieren ‚objektiv‘ nicht.“

Da die Existenz psychischer Vorgänge in fremden Menschen nur auf dem ungeru beschrifteten Weg des reinen Solipsismus geleugnet werden kann, suchen die meisten Schulen der idealistischen Philosophie einen Ausweg, durch den nur den Vorstellungen, Gedanken oder Empfindungskomplexen der Gesamtheit der Menschen, dennoch aber nicht der unbelebten Materie objektive Existenz zugesprochen wird. Auch gegen diese Auffassung richtet Boltzmann das Feuer seiner vernichtenden Kritik. „Der Grund, warum wir die Empfindungen der übrigen Menschen, außer dem Denkenden, als objektiv existierend bezeichneten, war allein deren vollkommene Analogie mit den in erster Linie als objektiv existierend zu bezeichnenden Empfindungen des Denkenden. Es wird sich also noch darum handeln, zu prüfen, ob die Vorgänge in der unbelebten Natur so viel Analogie mit den psychischen haben, daß es sich empfiehlt, sie ebenfalls als objektiv existierend zu betrachten, oder ob sich zwischen beiden eine so scharfe Grenze ziehen läßt, daß erstere als objektiv nicht existierend betrachtet werden können.“

„Den Empfindungen der Menschen sind zunächst die der höchststehenden Tiere so vollkommen analog, daß wir notwendig auch den letzteren objektive Existenz zuschreiben müssen; wo aber ist die Grenze? Man hört allerdings manches Mal Zweifel aussprechen, ob Insekten, ob teilbare Tiere, wie gewisse Würmer, empfinden. Doch ist eine scharfe Grenze, wo das Empfinden aufhört, unangebar. Wir kommen schließlich zu so einfachen Organismen, daß ihre Weltbilder und Gedanken null sind. Wollen wir nicht, was ganz unzweck-

mäßig wäre, den Empfindungen der unterhalb einer gewissen Stufe stehenden Tiere das Prädikat der Existenz plötzlich verweigern, so müssen wir auch dieser gedankenlosen organisierten Materie, in der Empfindungen kaum nachzuweisen sind, welche sich aber wieder zu den Pflanzen hinauf kontinuierlich abstuft, Existenz zuschreiben. Dann schiene es mir aber wieder als ein nicht gerechtfertigter unzweckmäßiger Sprung, dieses Prädikat der unorganisierten Materie zu verweigern ...“

„Wir sehen ferner, daß jene Reihen von Empfindungen und Willensakten, welche wir einzelne Menschen nennen, immer wieder bald abbrechen, daß die einzelnen Menschen sterben, wogegen die Materie, an welche jene Geistesäußerungen gebunden waren, bleibt. Das subjektive Weltbild, welches die Materie als den bloßen Ausdruck von Gleichungen zwischen den Empfindungskomplexen der Menschen auffaßt, sucht also zunächst das Flüchtige, Komplizierte durch Bezeichnungen nachzubilden und diese Bilder erst später zur Darstellung der Einfacheren, Beständigeren (der Materie) zu verwenden. Es faßt die ägyptischen Pyramiden, die Akropolis von Athen als bloße Gleichungen auf, welche zwischen den Empfindungen der Generationen von Jahrtausenden bestehen. Daneben muß doch ein einfacheres (objektives) Weltbild möglich sein, welches vom Beständigeren ausgeht und das Vergängliche durch die Gesetze darstellt, welche im Beständigeren herrschen. Verfolgen wir unsere Gedankenbilder konsequent, d. h. nach den Regeln, die immer zur Bestätigung durch die Erfahrung führten, so kommen wir zum Resultat, daß der Planet Mars von ähnlicher Größe wie die Erde ist, daß darauf Festlande, Meere, Schneefelder usw. existieren, ja es scheint uns nicht unmöglich, daß es auf Planeten anderer Sonnen die großartigsten Landschaften gibt, ohne daß diese je auf ein lebendes Wesen Sinneseindrücke machen.“ Boltzmann stellt übrigens bei Gelegenheit (Nachruf auf LOSCHMIDT) fest, daß die ältere Ausdrucksweise „Die Moleküle existieren“ und die neuere „Phrase“ „Unsere betreffenden Vorstellungsbilder sind ein einfaches und zweckmäßiges

Bild der beobachteten Erscheinungen“ im Wesen genau dasselbe besagen.

Zu dem in diesem Sinne zu verstehenden „Realismus“ bekennt sich Boltzmann auch zum Schluß der zitierten Arbeit: „Der Idealist vergleicht die Behauptung, daß die Materie ebenso wie unsere Empfindungen existiere, mit der Meinung des Kindes, daß der geschlagene Stein Schmerz empfinde, der Realist die, daß man sich nie vorstellen könne, wie Psychisches durch Materielles oder gar durch ein Spiel von Atomen dargestellt werden könne, mit der eines Ungebildeten, welcher behauptet, die Sonne könne nicht 20 Millionen Meilen von der Erde entfernt sein, denn das könne er sich nicht vorstellen. Wie die Ideologie (gemeint ist der Idealismus. E. B.) nur ein Weltbild für einen Menschen, nicht für die Menschheit ist, so scheint mir, wenn wir auch die Tiere, ja das Universum einbegreifen wollen, die Ausdrucksweise des Realismus zweckmäßiger als die des Idealismus.“

Übrigens wird im Vortrag vor der Philosophischen Gesellschaft in Wien im Jahre 1905, also kurz vor dem Tode Boltzmanns, die Anschauung, zu der sich der Autor bekannte, direkt statt als Realismus als Materialismus bezeichnet: „Der Idealismus behauptet nur die Existenz des Ich, die Existenz der verschiedenen Vorstellungen, und sucht daraus die Materie zu erklären. Der Materialismus geht von der Existenz der Materie aus und sucht daraus die Empfindungen zu erklären.“

Aus der Stellung Boltzmanns zur Frage der objektiven Existenz der Außenwelt ergibt sich seine Einstellung zu den Lehren von ERNST MACH, seinem Wiener Kollegen auf den Gebieten der Physik und der Philosophie. Boltzmann zollt dem Geist und den Verdiensten MACHS mehrfach Achtung; aber er läßt niemals Zweifel darüber bestehen, daß er in den entscheidenden Punkten MACHS Ansichten nicht teilen kann. Insbesondere konnte Boltzmann sich natürlich in keiner Weise mit der Meinung MACHS befreunden, die er z. B. in seiner (Boltzmanns) Polemik gegen OSTWALD erwähnt, daß Atome und Moleküle „bloße Begriffe zur ökonomischen Darstellung und Ver-

anschaulichung dieser gesetzmäßigen Beziehungen unserer Sinneswahrnehmungen und Vorstellungen sind“, nicht aber Bestandteile einer objektiv existierenden Außenwelt (siehe S. 37). Natürlich muß vom Standpunkt der konsequent durchgeführten Philosophie MACHS (wenn eine solche Durchführung überhaupt möglich ist) anderen Bestandteilen der Außenwelt im gleichen Sinne die Existenz abgesprochen werden wie den Atomen.

Eine zentrale Rolle in der Philosophie MACHS spielte bekanntlich der Begriff der Denkökonomie. Als Zweck der Wissenschaft mußte ja, weil nach MACH eine unabhängig vom Menschen existierende Außenwelt nicht Gegenstand der Wissenschaft sein kann, die bloße ökonomische, arbeitsparende Ordnung unserer subjektiven Empfindungen angesehen werden. Während nun Boltzmann selbstverständlich die Bedeutung der Denkökonomie bei der begrifflichen Ordnung der wissenschaftlichen Ergebnisse durchaus würdigte, konnte er in der Denkökonomie keineswegs einen Selbstzweck sehen. Dieser Standpunkt Boltzmanns wird in treffender Weise in seiner Arbeit *Über die Methoden der theoretischen Physik* zum Ausdruck gebracht: „In der Mathematik und Geometrie war es zunächst unzweifelhaft das Bedürfnis nach Arbeitersparnis, welches von den rein analytischen wieder zu den konstruktiven Methoden sowie zur Veranschaulichung durch Modelle führte. Scheint dieses Bedürfnis auch ein rein praktisches, selbstverständliches, so befinden wir uns doch gerade hier schon auf einem Boden, wo eine ganze Gattung moderner methodologischer Spekulationen emporwuchs, die in der präzisesten, geistreichsten Weise von MACH zum Ausdruck gebracht wurden. Dieser behauptet geradezu, der Zweck der Wissenschaft sei nur Arbeitersparnis.“

„Fast mit gleichem Rechte könnte man, bemerkend, daß bei Geschäften die größte Ersparnis wünschenswert ist, diese einfach für den Zweck der Verkaufsbuden und des Geldes erklären, was ja in gewissem Sinne in der Tat richtig wäre. Doch wird man nur ungerne, wenn die Distanzen und Bewegungen, die Größe, physikalische und

chemische Beschaffenheit der Fixsterne ergründet, wenn Mikroskope erfunden und damit die Urheber unserer Krankheiten entdeckt werden, dies als bloße Sparsamkeit bezeichnen.“

ETHIK

Die so äußerst fruchtbare entwicklungsgeschichtliche Methode wird von Boltzmann in konsequenter Weise auch bei der Behandlung der Ethik angewendet. Boltzmanns Grundkonzeption besteht darin, daß jene Handlungen sich im Laufe der Entwicklung der lebenden Materie als richtig und gut qualifiziert haben, die der Fortentwicklung förderlich waren. Eine entgegengesetzte Moral hätte sich weder unter den Tieren noch unter den Menschen behaupten können, und die betroffenen Gattungen wären ausgestorben. Es werden also die ursprünglichen Wurzeln der menschlichen Ethik nicht in bewußtem Denken des Menschen und natürlich noch viel weniger außerhalb des Menschen gesucht. Allerdings muß im Laufe der Entwicklung der Menschheit in der Ethik ebenso wie in der von Boltzmann so oft diskutierten Naturerkenntnis das bewußte und zielgerichtete Denken an Stelle unbewußter und instinktiver Stellungnahme treten.

In der Auseinandersetzung mit SCHOPENHAUER wird Boltzmanns Grundthese in knappster Form aufgestellt: „Die Ethik hat daher zu fragen, wann der Einzelne seinen Willen behaupten darf, wann er ihn dem der anderen unterordnen muß, damit die Existenz der Familie, des Volksstamms, der ganzen Menschheit und dadurch die aller Einzelnen zusammen möglichst gefördert werde. Diese angeborene Fragelust aber schießt über das Ziel hinaus, wenn man fragt, ob das Leben überhaupt zu fördern oder zu hemmen sei. Wenn irgendeine Ethik bewirken würde, daß der ihr anhängende Volks-

stamm herabkommt, ist sie dadurch widerlegt. Nicht die Logik, nicht die Philosophie, nicht die Metaphysik entscheidet in letzter Instanz, ob etwas wahr oder falsch ist, sondern die Tat. „Im Anfang war die Tat.“ Was uns zu richtigen Taten leitet, ist wahr.“

Der von OSTWALD über das *Glück* gehaltene Vortrag, dessen Gesamteindruck auf Boltzmann wir schon erwähnt haben, gibt zu einer ausführlichen Darstellung der Ansichten Boltzmanns über die Entwicklung der Ethik Gelegenheit: „Was den Begriff des Glücks betrifft, so leite ich ihn aus der DARWINSCHEN Theorie ab. Ob sich während der Jahrtausenden in der enormen Wassermasse auf der Erde das erste Protoplasma ‚durch Zufall‘ im feuchten Schlamm entwickelte, ob Eizellen, Sporen oder sonstige Keime in Staubform oder in Meteoriten eingebettet einmal aus dem Weltraum auf die Erde gelangt sind, kann uns hier gleich gelten. Höher entwickelte Individuen sind kaum vom Himmel gefallen. Es waren zunächst also nur ganz einfache Individuen, einfache Zellen oder Protoplasma-Klumpchen vorhanden. Stete Bewegung, die sogenannte BROWNSCHE Molekularbewegung, ist ja, wie man weiß, allen kleinen Klumpchen eigen; auch ein Anwachsen durch Aufsaugen ähnlicher Bestandteile und eine nachherige Vermehrung durch Teilung ist auf rein mechanischem Wege vollkommen begreiflich. Ebenso begreiflich ist es, daß die raschen Bewegungen durch die Umgebung beeinflußt und modifiziert wurden. Solche Klumpchen, bei denen diese Modifikation in dem Sinne erfolgte, daß sie sich durchschnittlich (mit Vorliebe) dorthin bewegten, wo es besser zum Aufsaugen geeignete Stoffe (bessere Nahrung) gab, gelangten besser zum Wachstum und häufiger zur Fortpflanzung und überwucherten daher bald alle anderen.“

„In diesem einfachen und mechanisch leicht begreiflichen Vorgang haben wir Vererbung, Zuchtwahl, Sinneswahrnehmung, Verstand, Willen, Lust und Schmerz alles in nuce beisammen. Es bedarf nur einer quantitativen Steigerung unter Anwendung desselben Prinzips, um durch das ganze Pflanzen- und Tierreich zur Menschheit mit all

ihrem Denken und Empfinden, Wollen und Handeln, ihrer Lust und ihrem Schmerz, ihrem künstlerischen Schaffen und wissenschaftlichen Forschen, ihrem Edelmut und ihren Lastern zu gelangen⁵).“

„Zellen, welche sich zu größeren Gesellschaften, unter denen Arbeitsteilung Platz griff, assoziiert hatten und durch Teilung wieder Zellen mit ähnlichen Tendenzen abschieden, hatten größere Chancen im Kampf ums Dasein, besonders wenn gewisse Zellen bei schädlichen Einflüssen nicht ruhten, bis die Arbeitszellen diese nach Möglichkeit entfernt hatten (Schmerz). Die Tätigkeit dieser Zellen war besonders wirksam, wenn sie, sobald ja einmal die Entfernung der schädlichen Einflüsse nicht vollständig gelungen war, andauerte und eine nur sehr langsam nachlassende Spannung hinterließ, welche die Erinnerungszellen belastete und bei Wiederkehr ähnlicher Umstände die Bewegungszellen zu noch energischerem und umsichtigerem Zusammenwirken anstachelte. Dieser Zustand heißt andauernde Unlust, Gefühl des Unglücks. Das Gegenteil, die vollkommene Freiheit von solcher bohrender Nachwirkung, die Mahnung an die Erinnerungszellen, daß die Bewegungszellen in ähnlichen Fällen künftig gerade so wirken sollen, heißt dauernde Lust, Gefühl des Glückes.“

„Damit sind freilich alle Abstufungen dieser Gefühle in hochorganisierten Wesen nicht im entferntesten erschöpft. Zu einer Physiologie des Glückes ist nicht einmal der Anfang gemacht; aber es ist doch der Gesichtspunkt fixiert, unter dem man die betreffenden Erscheinungen betrachten muß, wenn man nicht bloß schönklingende, erhebende, poetische, begeisternde Phrasen darüber machen, sondern sie naturwissenschaftlich erklären will.“

„Natürlich ist dabei bloß eine, die naturwissenschaftlich begreifliche Seite der Gefühlserscheinungen ins Auge gefaßt. Man sieht ein, warum uns die Vorgänge eines Organismus, der dem unsrigen ganz ähnlich gebaut ist, viel direkter berühren und in einem ganz anderen Lichte erscheinen, als die eines vollkommen heterogenen, so daß wir eine von Menschenhand aus Stangen und Rädern fabrizierte Maschine nie glücklich oder unglücklich nennen würden, selbst wenn sie ebenso

kompliziert gebaut und zentralistisch organisiert wäre wie unser Organismus, und analog durch äußere Einflüsse zu zweckmäßiger Tätigkeit angeregt würde, eine Idee, in die wir uns freilich auch viel schwerer hineinversetzen können, als es die Anhänger der Hypothese besonderer von den Gehirnvorgängen getrennt existierender psychischer Erscheinungen glauben.“

In dem Vortrag gegen SCHOPENHAUER kommt Boltzmann wieder auf die Frage des Wertes des Lebens zu sprechen: „Wir sind gewohnt, alles nach seinem Wert zu taxieren. Je nachdem es die Lebensbedingungen fördert oder hemmt, ist es wertvoll oder wertlos. Das wird uns so zur Gewohnheit, daß wir uns fragen zu müssen glauben, ob das Leben selbst einen Wert hat. Das ist eine solche Frage, die vollkommen widersinnig ist. Das Leben selbst müssen wir als dasjenige annehmen, was Wert hat, und ob etwas einen Wert hat, können wir nur relativ gegen das Leben beurteilen, nämlich, ob es geeignet ist, das Leben zu fördern oder nicht. Dabei reden wir natürlich dem Einzelnen ein, nicht dasjenige habe für ihn Wert, was sein individuelles, sondern vielmehr das, was das Leben seiner Familie, seines Volksstammes, ja sogar der ganzen Menschheit fördere. Da nun Diejenigen, die das glauben (die Edlen), von der Gesamtheit in jeder Weise gefördert und belohnt werden, so haben sie mehr Chancen im Kampf ums Dasein, und es vererbt sich der Edelmut wie leider auch der Eigennutz, der wieder in entgegengesetzter Weise Chancen bietet⁶).“

„Wenn wir aber fragen, ob das Leben an sich einen Wert hat, heißt das: ‚Ob das Leben geeignet ist, das Leben zu fördern.‘ Es ist das also eine Frage, die keinen Sinn hat. Gemäß der Definition können wir nur fragen: ‚Wie kann das Leben gefördert werden?‘ Das Wertvolle ist eben das, was das Leben fördert. Die Frage nach dem Wert des Lebens selbst hat keinen Sinn; daß sie sich uns aufdrängt, ist aber nach der DARWINSchen Theorie leicht erklärlich. Es ist wieder ein Über-das-Ziel-Hinausschießen einer Denkgewohnheit.“

Da Wert und Unwert nach der Rolle beurteilt werden, die Gegen-

stände oder ihre Beziehungen in bezug auf das sich entwickelnde Leben spielen, und ein anderer Maßstab als willkürlich und daher unbegründet abgelehnt wird, ist natürlich gar nicht einzusehen, warum die natürliche Erklärung ethischer Werte eine Herabsetzung darstellen oder Enttäuschung bringen könnte: „Wir glauben daher“, führt Boltzmann im Vortrag *Über die objektive Existenz der Vorgänge in der unbelebten Natur* aus, „daß wir, wenn unsere seelischen Prozesse durch die Bilder materieller Vorgänge im Gehirn erschöpfend darstellbar wären, ebenso tot und teilnahmslos wie diese Maschinen (Uhren oder Dynamomaschinen. E. B.) sein müßten. Dies ist offenbar der Grund, warum diese Ansicht Manchen öde und trostlos erscheint. Doch, wie ich glaube, ohne jede Berechtigung; denn gerade die Entstehung heftiger Schmerz- und Lustgefühle erklärt sich aus der DARWINSchen Theorie, weil diese behufs Erzielung der zur Erhaltung der Art notwendigen Energie der Reaktionen erforderlich sind. Die ganze Intensität, Mannigfaltigkeit und Reichhaltigkeit des Geistes- und Gemütslebens kann ja nicht dadurch bedingt sein, daß die betreffenden Vorgänge qualitativ edler und erhabener wären als die in toten Maschinen, sondern bloß dadurch, daß sie reicher und mannigfaltiger sind sowie daß unser eigenes Ich derselben Gattung von Wesen angehört. Da man doch nicht bezweifeln wird, daß auch die geistigen Funktionen nach ganz bestimmten Gesetzen erfolgen, so könnte ich darin nichts Entmutigendes finden, wenn diese mit den Gesetzen identisch wären, nach denen sich gleich komplizierte materielle Vorgänge abspielen. Für unser subjektives Gefühl ist eben dasjenige edel und erhaben, was unsere Gattung fördert und erhebt, objektiv existieren diese Begriffe nicht. Wenn daher materielle Vorgänge ebenso mannigfaltig und kompliziert sein können wie unsere geistigen, woran zu zweifeln kein Grund ist, so sehe ich nicht ein, wie durch die Behauptung, daß sich durch das Gedankenbild materieller Vorgänge im Gehirn unsere psychischen Tätigkeiten erschöpfend darstellen ließen, der edle, erhabene Charakter der letzteren oder unser leidenschaft-

liches Interesse für dieselben irgendwie tangiert werden könnte. Wir wissen, daß eine Uhr nicht empfinden kann, d. h. daß sich durch einen so einfachen Mechanismus nicht den Empfindungen einigermaßen Ähnliches darstellen läßt. Aber was will man damit ausdrücken, wenn man sagt, aus der qualitativen Verschiedenheit unserer Empfindungen und der materiellen Vorgänge folge, daß der Ablauf der ersteren überhaupt nie durch eine noch so komplizierte Zusammenstellung derjenigen Vorstellungsbilder dargestellt werden könnte, welche uns zugleich die Vorgänge in der unbelebten Natur darstellen . . .“

„Wir wollen uns eine Maschine als möglich denken, die so wie unser Körper aussieht und sich auch so verhält und bewegt. In ihrem Inneren soll ein Bestandteil sein, welcher durch die Wirkung des Lichtes, des Schalls usw. mittels Organen, die genau wie unsere Sinnesorgane und die damit verknüpften Nerven gebaut sind, Eindrücke empfängt. Dieser Bestandteil soll die weitere Fähigkeit haben, Bilder dieser Eindrücke zu bewahren und durch Vermittlung dieser Bilder Nervenfasern so anzuregen, daß sie Bewegungen erzeugen, die ganz den Bewegungen unseres Körpers gleichen. Unbewußte Reflexbewegungen wären dann natürlich solche, deren Innervationen nicht so tief ins Zentralorgan eindringen, daß daselbst Erinnerungsbilder entstehen. Man sagt, es sei a priori klar, daß sich diese Maschine zwar äußerlich wie ein Mensch verhält, aber nichts empfinden würde. Sie würde die verbrannte Hand zwar ebenso rasch zurückziehen wie wir, aber dabei keinen Schmerz empfinden. Ich glaube, man sagt dies bloß, weil man sich doch nur eine Uhr, nicht eine so komplizierte Maschine denkt . . .“

„Es wäre also durch unsere Maschine alles realisiert, was uns erfahrungsgemäß vom Psychischen gegeben ist. Alles übrige denken wir uns, wie mir scheint, willkürlich selbst dazu. Unsere Maschine würde gerade so gut wie jeder Mensch sagen, sie sei sich jeder Existenz bewußt (d. h. sie habe Gedankenbilder für die Tatsache ihrer Existenz). Niemand könnte beweisen, daß sie sich ihrer selbst weniger

bewußt wäre als ein Mensch. Ja, man könnte das Bewußtsein gar nicht irgendwie so definieren, daß es dieser Maschine weniger zukäme als dem Menschen.“

Sehr bemerkenswerte Gedanken zur Entstehung der Moral und auch des Schönheitssinnes finden sich, wie dies für seine Neigung zum Auffinden allgemeiner Zusammenhänge bezeichnend ist, in Boltzmanns Antrittsvorlesung über die *Prinzipien der Mechanik*: „Wir haben noch der wunderbarsten mechanischen Theorie (siehe S. 45) auf dem Gebiet der biologischen Wissenschaften zu gedenken, nämlich der Lehre DARWINS. Diese unternimmt es, aus dem rein mechanischen Prinzip der Vererbung, welches an sich freilich wie alle mechanischen Urprinzipie dunkel ist, die ganze Mannigfaltigkeit der Pflanzen und Tierwelt zu erklären.“

„Die Erklärung der wunderbaren Schönheit der Blumen, des Formenreichtums der Insektenwelt, der Zweckmäßigkeit des Baues der Organe des menschlichen und tierischen Körpers, das alles wird hiermit zur Domäne der Mechanik. Wir begreifen, wieso es für unsere Gattung nützlich und wichtig war, daß gewisse Sinneseindrücke uns schmeichelten und von uns gesucht wurden, andere uns abstießen; wir ersehen, wie vorteilhaft es war, möglichst genaue Bilder der Umgebung in unserem Geiste zu konstruieren und das, was von diesen mit der Erfahrung stimmte, als wahr, streng auseinander zu halten von dem Nichtstimmenden, dem Falschen. Wir können also die Entstehung des Begriffes der Schönheit ebensowohl als der Wahrheit mechanisch erklären.“

„Wir verstehen aber auch, warum nur solche Individuen fortexistieren konnten, welche gewisse höchst verderbliche Einwirkungen mit der ganzen Intensität ihrer Nervenkraft verabscheuten und hintanzuhalten suchten, andere für ihre oder für die Erhaltung der Gattung notwendige aber mit gleicher Nervenkraft anstrebten. Wir begreifen so, wie sich die ganze Intensität und Macht unseres Gefühlslebens entwickelte, Lust und Schmerz, Haß und Liebe, Wunsch und Furcht, Seligkeit und Verzweiflung. Geradeso wie unsere körper-

lichen Krankheiten können wir auch die ganze Stufenleiter unserer Leidenschaften nicht loswerden, aber wir lernen sie wiederum begreifen und ertragen.“

„In erster Linie wird es nun ohne Frage für jedes Individuum von Wichtigkeit sein, daß sein Streben auf die eigene Erhaltung gerichtet ist, und es erscheint der Egoismus nicht als Fehler, sondern als Notwendigkeit. Aber für die Erhaltung der Gattung ist es von größtem Nutzen, wenn die verschiedenen Individuen sich unterstützen, und beim Zusammenwirken der Einzelne sich dem Ganzen unterordnet. So verstehen wir die Notwendigkeit von Eigensinn und Trotz schon beim Kinde, aber auch von Zusammenhalten und Geselligkeit im gemeinsamen Spiel; wir verstehen an unserem Geschlechte Eigennutz und Mitgefühl, Scham und Begierde, Freiheitsliebe und Knechtsinn, Tugend und Laster, Todesfurcht und Todesverachtung. Welchen Vorteil gewährt es für einmütiges Wirken in Frieden und Kriege, wenn sich der Jüngling für Großes und Edles, Freundschaft und Liebe, Freiheit und Vaterland begeistert, aber wie leicht artet wieder dieser Trieb zum Phrasentum, zur tatenlosen Schwärmerei aus. Die Empfänglichkeit für Erhebung des Herzens und Begeisterung mußte sich daher ebenso notwendig in unserem Geschlechte bilden wie Nüchternheit und Egoismus, als deren notwendiges Gegengewicht. So begreifen wir aus mechanischen Ursachen, daß der Jüngling für die Poesie SCHILLERS erglüht und daß so viele die Dichtungen HEINES verurteilen, welche doch wieder auf andere so mächtig und unwiderstehlich wirken. Es muß ja auch das Wasser des aufsteigenden Springbrunnens eine lebendige Kraft besitzen, welche für sich allein imstande wäre, es in den unendlichen Raum hinauszuschleudern; aber ebenso mechanisch notwendig ist die Gegenwirkung der Schwere und des Druckes unzähliger Luftteilchen, die es wieder rechtzeitig zur mütterlichen Erde zurückführen. Wollte man sich pikant ausdrücken, so könnte man sich zur Behauptung versteigen, daß nicht nur das abscheulichste Laster, sondern auch die höchste Tugend gewissermaßen eine Verirrung ist, darin begründet, daß unsere angeborenen Triebe

übers Ziel hinausschießen. Denn allzu großer Idealismus trübt den praktischen Sinn und ist daher das der banausischen Gesinnung entgegengesetzte auch wieder schädliche Extrem.“

PERSÖNLICHES BEKENNTNIS

Die Überlegungen Boltzmanns über die Moral und das Wesen des Glücks führen ihn schließlich — zum Ende der zweiten Antrittsvorlesung über die *Prinzipien der Mechanik* — zu der wichtigen Frage: „Ist die Menschheit durch alle Fortschritte der Kultur und Technik glücklicher geworden?“

„In der Tat, eine heikle Frage. Gewiß, ein Mechanismus, die Menschen glücklich zu machen, ist noch nicht erfunden worden. Das Glück muß jeder in der eigenen Brust suchen und finden. Aber schädliche, das Glück störende Einflüsse hinwegzuschaffen, gelang der Wissenschaft und Zivilisation, indem sie Blitzgefahr, Seuchen der Völker und Krankheiten der Einzelnen in vielen Fällen erfolgreich zu bekämpfen wußte. Sie vermehrte ferner die Möglichkeit, unseren schönen Erdball leichter zu durchschweifen und kennen zu lernen, den Aufbau des Sternenhimmels uns lebhaft vorzustellen und die ewigen Gesetze des Naturganzen wenigstens dunkel zu ahnen. So ermöglicht sie der Menschheit eine immer weitergehende Entfaltung ihrer Körper- und Geisteskräfte, eine immer wachsende Herrschaft über die gesamte übrige Natur und befähigt Den, der den inneren Frieden gefunden hat, diesen in erhöhter Lebensentfaltung und größerer Vollkommenheit zu genießen.“

In diesen Worten liegt schon ein gutes Stück persönliches Bekenntnis zu einem besonderen Lebensziel: Das Glück in der Erkenntnis zu suchen. Freilich konnte sich die kämpferische Natur Boltzmanns nicht mit der Kontemplation begnügen, sondern für

ihn hing die Betrachtung der Natur untrennbar mit der aktiven Vertiefung und Verbreitung der Naturerkenntnis, mit dem Dienst an der Theorie zusammen, zu deren Lob er so beredete Worte gefunden hat (siehe S. 93). „Der Theorie zum Preis ist mir kein Opfer zu groß, sie, die den Inhalt meines ganzen Lebens ausmacht...“ Die Theorie wieder ist nach Boltzmann untrennbar mit dem Experiment und darüber hinaus mit der praktischen Anwendung der Erkenntnis verbunden. Das lebhafteste Interesse Boltzmanns an der menschlichen Praxis ließ ihn die großzügige Anwendung der Ergebnisse der Theorie auf das menschliche Leben und seine komplizierten Probleme wünschen, wenn er auch sein eigenes Feld im Ausbau der Theorie sah.

Mit intensiver Freude beteiligte sich Boltzmann daher am Kampf um die Erkenntnis: „Bis heute aber herrscht noch der lebhafteste Kampf der Meinungen; jeder hält seine für die echte, und er möge es, wenn es in der Absicht geschieht, ihre Kraft den andern gegenüber zu erproben. Der rapide Fortschritt hat die Erwartungen auf das höchste gespannt, was wird das Ende sein? ... In der Tat interessante Fragen! Man bedauert fast, sterben zu müssen lange vor ihrer Entscheidung. O unbescheidener Sterblicher! Dein Los ist die Freude am Anblick des wogenden Kampfes!“

„Übrigens möge man lieber das Naheliegende bearbeiten als sich um so Fernes den Kopf zu zerbrechen. Hat doch das Jahrhundert genug geleistet! Eine unerwartete Fülle positiver Tatsachen und eine köstliche Sichtung und Läuterung der Forschungsmethoden vermacht es dem kommenden. Ein spartanischer Kriegerchor rief den Jünglingen zu: Werdet noch tapferer als wir! Wenn wir, einer alten Gepflogenheit folgend, das neue Jahrhundert mit einem Segenswunsche begrüßen wollen, so können wir ihm fürwahr, an Stolz jenen Spartanern gleich, wünschen, es möge noch größer und bedeutungsvoller werden als das scheidende!“

Für seine Auffassungen und Ziele die Menschen zu begeistern, an sich und Andere moralische Anforderungen zu stellen, war Boltz-

manns Bemühen. Freilich, nicht immer war der gesellschaftliche Standort Boltzmanns geeignet, Zusammenhänge bis zum letzten Ende zu verfolgen oder gar praktisch kompromißlos zu handeln. Leise, auf Selbstanalyse beruhende Ironie klingt mit, wenn Boltzmann im *Antrittsvortrag zur Naturphilosophie* davon spricht, daß „man einen alten Demokraten zum Hofrat ernennt, damit er vollends aus einem SAULUS zum PAULUS werde“; oder wenn er etwa in der Leipziger Antrittsvorlesung *Über die Prinzipien der Mechanik* resigniert feststellt: „Die begeisterte Freiheitsliebe eines CATO, BRUTUS und VERRINA entstammt Gefühlen, die durch rein mechanische Ursachen in ihrer Brust keimten, und es erklärt sich wiederum mechanisch, daß wir mit Behagen in einem wohlgeordneten monarchischen Staat leben und doch gerne sehen, wenn unsere Söhne den PLUTARCH und SCHILLER lesen und sich an den Reden und Taten schwärmerischer Republikaner begeistern. Auch hieran können wir nichts ändern; aber wir lernen es begreifen und ertragen. Der Gott, von dessen Gnade die Könige regieren, ist das Grundgesetz der Mechanik.“

Aber wenn Boltzmann auch dem Kaiser von Österreich gegenüber nicht den BRUTUS spielen wollte, so kannte Boltzmanns kämpferischer Geist keinen Kompromiß, wenn es galt, in der Wissenschaft den Kampf für die Wahrheit und den Fortschritt zu führen. Wer wäre von den wahrhaft leidenschaftlichen Worten nicht aufs tiefste gerührt und erschüttert, mit denen Boltzmann seinen Nachruf auf KIRCHHOFF an der Alma mater Graecensis (Grazer Universität) abschließt:

„Fürwahr, die späteste Nachwelt wird den großen Männern, die unser Jahrhundert zeugte, die Bewunderung nicht versagen. Wenn etwas ihr gleichen könnte, so wäre es höchstens die Verwunderung, daß dasselbe Jahrhundert so viel lächerliches Zopftum, so viel überkommenen Unsinn und törichten Aberglauben nicht loswerden konnte. Erlauben Sie mir, daß ich Sie da an ein Sonett erinnere, das von einem Dichter stammt, der auch Naturforscher war, und

dessen altmodische Derbheit in unserer Zeit der Glacéhandschuhe freilich etwas wunderlich klingt. Es lautet:

Die Wahrheit, sie besteht in Ewigkeit,
Wenn erst die blöde Welt ihr Licht erkannt,
Der Lehrsatz, nach Pythagoras benannt
Gilt heute, wie er galt zu seiner Zeit.

Ein Opfer hat Pythagoras geweiht
Den Göttern, die den Lichtstrahl ihm gesandt;
Es taten kund, geschlachtet und verbrannt,
Einhundert Ochsen seine Dankbarkeit.

Die Ochsen seit dem Tage, wenn sie wittern,
Daß eine neue Wahrheit sich enthülle,
Erheben ein unmenschliches Gebrülle.

Pythagoras erfüllt sie mit Entsetzen,
Und machtlos, sich dem Licht zu widersetzen
Verschließen sie die Augen und erzittern.

„Fast scheint es, als ob dieses Gedichtchen gerade so ewig wahr bleiben sollte wie der pythagoräische Lehrsatz, den es besingt⁹⁾.“

„Tönt es denn heute nicht lauter denn je, das Gebrülle aller Dunkel-
männer, aller Feinde der freien Meinungsäußerung und Forschung
wider den neuen pythagoräischen Lehrsatz, die Lehre DARWINS?“

„Aber wohl uns; es ist der Sturm, der das Nahen des Frühlings verkündet. Doch bis dahin kommt der leichtfertige Spott zu früh, bis dahin rüstet den bitteren blutigen Kampf, der zwar nicht mit Pulver und Blei ausgefochten wird, aber doch Tausende dahinraffte, Tausende der Edelsten. Wer zählt die Gräber, auf die alle die Grabschrift

gesetzt werden könnte, die SCHILLER für ROUSSEAUS Grab dichtete?*)
Wann wird doch die alte Wunde narben?“

„In diesem Kampf der Geister nicht die letzte zu sein, das sei deine Aufgabe, Alma mater Graecensis im vierten Jahrhundert deines Lebens, und sollte dieses den Mauern unserer Stadt wieder einen KEPLER bringen, so sei nicht seine Gegnerin, sondern er sei dein?“

*) Monument von unsrer Zeiten Schande,
Ewge Schmachschrift deiner Mutterlande,
Rousseaus Grab, begrüßet seist du mir!
Fried und Ruh den Trümmern deines Lebens!
Fried und Ruhe suchtest du vergebens,
Fried und Ruhe fandst du hier.

Wann wird doch die alte Wunde narben?
Einst wars finster, und die Weisen starben,
Nun ists lichter, und der Weise stirbt.
Sokrates ging unter durch Sophisten,
Rousseau leidet, Rousseau fällt durch Christen,
Rousseau — der aus Christen Menschen wirbt.

ANMERKUNGEN ZUM III. TEIL

1) A. HÖFLER, a. a. O.

2) L. FLAMM, Mündliche Mitteilung.

3) A. LAMPA, a. a. O.

4) K. PRZIBRAM, Mündliche Mitteilung.

5) Der letzte Vortrag BOLTZMANNs in der Philosophischen Gesellschaft (Jahreshauptversammlung am 28. Oktober 1905) trug den Titel „Erklärung des Entropiesatzes und der Liebe aus den Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung“. Offenbar wurde die Beziehung des zweiten Hauptsatzes zu den Lebenserscheinungen besprochen (Siehe auch S. 71).

6) Wie man sieht, untersucht BOLTZMANN nicht, wieso im Lauf der menschlichen Geschichte konkrete moralische Normen verschiedener Art entstehen und vergehen.

7) KEPLER mußte nach der Aufhebung der Religionsfreiheit in Steiermark (1598) das Land verlassen. Später wurde er als Protestant auch aus Oberösterreich vertrieben. Übrigens mußte KEPLER auch sonst unter den größten Schwierigkeiten wirken. Seine Mutter war in einen Hexenprozeß verwickelt. Er selbst lebte in drückender Not, weil der Kaiser seinen finanziellen Verpflichtungen nicht nachkam. WALLENSTEIN, an den ihn der Kaiser mit seinen Forderungen verwies, wollte ihn nur als Astrologen gebrauchen. KEPLER erlag schließlich den Anstrengungen einer Reise zum Reichstag in Regensburg, wo er seine Forderungen vorbringen wollte.

8) E. ABEL, Österr. Chem.-Ztg. 55, 151 (1954).

9) Der Verfasser dieses Gedichtes ist ADALBERT VON CHAMISSO (1835). Der Gedanke stammt von LUDWIG BÖRNE, der in seinen „Fragmenten und Aphorismen“ schreibt: „Als PYTHAGORAS seinen bekannten Lehrsatz entdeckte, brachte er den Göttern eine Hekatombe dar. Seitdem zittern die Ochsen, so oft eine neue Wahrheit an das Licht kommt.“

Nachwort

Zum Abschluß sei der Versuch unternommen, Boltzmanns Rolle in der Geschichte der Wissenschaft kurz zu präzisieren.

Boltzmann war zwar ein Riese des Gedankens, der Denkmäler über die Meere hinaus die Hand reichte und dessen Werk Generationen beeinflußt hat und noch beeinflussen wird. Er war aber dabei natürlich durchaus ein Kind seines Landes und seiner Zeit. So wie der von ihm verehrte CLERK MAXWELL als Brite des 19. Jahrhunderts vorgestellt werden muß, so sind auch die Züge Boltzmanns durch das Österreich seiner Zeit geformt.

Boltzmann nahm seine Forschungstätigkeit um die Zeit auf, als Österreich aus dem Verband Deutschlands ausschied. Er schuf sein Werk in den Jahrzehnten oft stürmischer innerer Entfaltung des Kaiserreichs. Es war eine Zeit, in der Industrie und Verkehr rasch in immer weitere Gebiete des Staates vordrangen. Entlegene Landschaften wurden aus dem Schlafe gerissen, und mit den Fabriken, Bergwerken und Eisenbahnen wuchs ein Bürgertum, dessen Reichtum sich bald mit dem des Adels messen konnte.

Da die neue Technik durch tausend Fäden mit der Naturwissenschaft verbunden war, nahm das Interesse an deren Pflege zu. Auch ermöglichte die Steigerung des Nationaleinkommens die kräftigere Förderung der Wissenschaft. So wurde der Mittelschulunterricht in Physik ausgestaltet, und die alten Universitäten erhielten naturwissenschaftliche Lehrstühle. In Wien wurde nach der Revolution von 1848 durch DOPPLER das erste physikalische Hochschullaboratorium begründet, das durch STEFAN zu einer lebhaften Forschungsstätte wurde. Erst später (1871—1877) hat MAXWELL

das Cavendish-Laboratorium als erstes physikalisches Laboratorium einer britischen Hochschule geplant und errichtet.

Boltzmann hatte das Glück, schon auf wesentliche Errungenschaften seiner Vorgänger aufbauen zu können. Er konnte die ihm gebotenen Möglichkeiten um so besser ausnützen, als er — selbst bürgerlicher Herkunft — schon im Elternhaus Verständnis und finanziellen Rückhalt fand, so daß er sich von Jugend an gänzlich der Wissenschaft widmen konnte.

Zu den Errungenschaften der fortschrittlichen industriellen Zivilisation bekannte sich Boltzmann ebenso wie MAXWELL oft und gern. Es sei an seine Ausführungen in der *Bedeutung der Theorien* (S. 94) erinnert. Auch die Möglichkeit zu wahren Lebensglück werde durch die moderne Technik verbessert (S. 129). In den wissenschaftlichen Schriften Boltzmanns treffen wir immer wieder auf Vergleiche und Überlegungen, die dem Reiche der technischen Praxis entlehnt sind. Auch begrüßte er die Verwendung technischer Hilfsmittel für die theoretische ebenso wie für die experimentelle Physik. Andererseits betrachtete Boltzmann die Praxis, eingeschlossen die technische Praxis, als letztes Kriterium der Wahrheit.

Leider begegnete die Entwicklung der Physik in Österreich bald nach Boltzmanns Tod großen Schwierigkeiten. Sein unmittelbarer Nachfolger FRITZ HASENÖHRL und andere Physiker fielen dem Ersten Weltkrieg zum Opfer. Die Arbeits- und Lebensverhältnisse in den folgenden Zeiten waren nicht ermutigend. Daß österreichische Forscher dennoch oft große Leistungen vollbrachten, muß Bewunderung hervorrufen. Übrigens diente in diesem Zeitabschnitt ein Großteil der physikalischen Arbeiten der Erforschung der Radioaktivität; daß diese Arbeitsrichtung in Österreich mit Eifer gepflegt wurde, ist gewiß teilweise eine Folge der Wiener atomistischen Tradition.

Die Schwierigkeiten der Physik, ja der Wissenschaft überhaupt, bestanden in einer Ungunst der gesellschaftlichen Atmosphäre. Diese Ungunst führte zu einem Mangel an Interesse für die Forschung und zu einer Verringerung der für sie ausgeworfenen Mittel. Staat

und Industrie vernachlässigten die Wissenschaft. Zahllose jüngere Talente wanderten ab und wurden erst im Auslande produktiv. Den letzten Ursachen dieser Entwicklung kann an dieser Stelle nicht nachgegangen werden, doch dürfen sie nach Auffassung des Verfassers keineswegs nur im Verlust des Krieges gesucht werden. In manch anderem Land hat ein verlorener Krieg nationale Energien geweckt, und in kleinen Ländern wurde Großes geschaffen.

Wenn somit auch das Werk Boltzmanns in seinem Vaterlande nicht in dem Maß weiter entwickelt wurde, als zu hoffen gewesen wäre, so hat es doch die Wissenschaft der weiten Welt in entscheidender Weise beeinflusst. Boltzmanns Werk ist ein Hauptpfeiler der modernen Physik geworden. Unter den theoretischen Physikern des 19. Jahrhunderts kommt nur MAXWELL Boltzmann in bezug auf seine Bedeutung für unser Jahrhundert gleich.

Boltzmann war der Prophet der Lehre MAXWELLS vom Elektromagnetismus in Mitteleuropa. Alle deutschsprachigen Physiker, die um die Jahrhundertwende jung waren, lernten MAXWELLS Theorie mit Boltzmanns Augen durch dessen Schriften. Kein Zweifel, daß auch EINSTEIN, als er mit der Abhandlung *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* die Relativitätstheorie begründete, seine Kenntnisse eben der Elektrodynamik wesentlich Boltzmann verdankte. „Sein Wissen erlangte er (EINSTEIN) weniger durch den Besuch der Vorlesungen als durch Selbststudium, wobei vor allem die Werke von Boltzmann auf ihn Eindruck machten“¹⁾. Auch aus der Biographie des jungen EINSTEIN erkennt man die gewaltige Wirkung Boltzmanns auf ihn, die nur derjenigen MAXWELLS nachstand²⁾.

EINSTEIN hatte MACHS Kritik an der alten Mechanik mit Aufmerksamkeit und Nutzen studiert. Dennoch war der Einfluß der allgemeinen Auffassungen Boltzmanns, die zu denen MACHS im Gegensatz standen, offenbar tiefer. EINSTEIN selbst äußert sich: „...Für sie (die phänomenologische Physik. E. B.) ist es charakteristisch, daß sie sich möglichst erlebnisnaher Begriffe bedient, dafür aber auf Einheitlichkeit der Grundlagen weitgehend verzichtet. Wärme,

Elektrizität und Licht werden durch besondere Zustandsvariable und Materialkonstanten neben dem mechanischen Zustande beschrieben, und alle diese Variablen in ihrer gegenseitigen und zeitlichen Abhängigkeit zu bestimmen, war ein in der Hauptsache nur auf empirischem Wege lösbares Problem. Viele Zeitgenossen von MAXWELL sahen in einer solchen Darstellungsweise das Endziel der Physik, die sie wegen der relativen Erlebnisnähe der gebrauchten Begriffe für rein induktiv aus den Erlebnissen ableitbar hielten. ST. MILL und E. MACH vertraten erkenntnistheoretisch ungefähr diesen Standpunkt.“

„Es ist nach meiner Ansicht die größte Leistung der NEWTONSchen Mechanik, daß ihre konsequente Anwendung zur Überwindung dieses (phänomenologischen) Standpunktes führte, und zwar auf dem Gebiet der Wärmeerscheinungen. Dies geschah durch die kinetische Gastheorie und durch die statistische Mechanik überhaupt. Erstere verknüpfte die Zustandsgleichung der idealen Gase, Viskosität, Wärmeleitung und Diffusion der Gase, Radiometererscheinungen der Gase und lieferte die logische Verbindung von Phänomenen, welche vom Erlebnisstandpunkte nicht das geringste miteinander zu tun hatten. Letztere lieferte eine mechanische Deutung der thermodynamischen Begriffe und Gesetze sowie die Erkenntnis von der Grenze des Anwendungsbereiches der Begriffe und Gesetze der klassischen Wärmelehre. Diese kinetische Theorie, welche die phänomenologische Physik bezüglich der logischen Einheitlichkeit der Grundlagen weit übertraf, lieferte ferner für die wahre Größe der Atome und Moleküle bestimmte Werte, die sich durch mehrere voneinander unabhängige Methoden ergaben und so jedem vernünftigen Zweifel entrückt wurden. Diese entscheidenden Fortschritte wurden dadurch erkauft, daß den materiellen Punkten reale Gebilde (Atome bzw. Moleküle) zugeordnet wurden, deren konstruktiv-spekulativer Charakter offenkundig war; niemand konnte hoffen, ein Atom ‚unmittelbar wahrzunehmen‘. Gesetze über beobachtungsnahen Zustandsgrößen (zum Beispiel Temperatur, Druck, Geschwindigkeit

keit) aber wurden aus den Grundbegriffen durch komplizierte Rechnungen abgeleitet. So wurde die ursprünglich mehr ‚phänomenologisch‘ aufgebaute Physik (wenigstens ein Teil derselben) unter Zugrundelegung der NEWTONSchen Mechanik für die Atome bzw. Moleküle auf eine erlebnisfernere, aber einheitlichere Basis zurückgeführt.“ Man glaubt Boltzmann sprechen zu hören!

Entscheidend war natürlich der Einfluß Boltzmanns auf die weitere Entwicklung der Atomtheorie und auf die Quantentheorie. MAXWELL und Boltzmann hatten die Atomlehre nach deren jahrtausendelangem Kampf, währenddessen zeitweise sogar die Todesstrafe auf ihre Verkündung gesetzt war⁴⁾, auch in der Physik zum Siege geführt. Noch vor dem Tode Boltzmanns wurden die von Boltzmann und GIBBS geforderten, aus der Atomlehre folgenden Schwankungserscheinungen (S. 76) nachgewiesen.

Im besonderen hat die chemische Physik durch die Annahme der Atomistik durch Physiker wie Chemiker großen Vorteil gezogen. Eine große Rolle spielte dabei Boltzmanns Schüler NERNST. Die statistische Deutung der Entropie hat die chemische Gleichgewichtslehre und die Lehre vom Aufbau der festen Körper gewaltig gefördert. Sie hat das NERNSTSche Wärmetheorem, auch als Dritter Hauptsatz der Wärmelehre bekannt, verständlich gemacht. Die Fortschritte der chemischen Physik haben die chemische Technik entscheidend befruchtet. Sie wirken sich auch in der Biochemie und Biophysik aus. Schließlich konnte man (RUTHERFORD, BOHR, SOMMERFELD) nach dem Siege der Atomistik vertrauensvoll an die nähere Bestimmung des Baues der Atome gehen, und zwar der Elektronenhülle wie auch der Atomkerne — mit den bekannten Ergebnissen!

Die Quantenphysik hat durch PLANCK, als dieser die Gesetze der Strahlung erforschte, direkt von Boltzmanns Statistik ihren Ausgang genommen. Die Quantenphysik ist ihrem ganzen Wesen nach statistische Physik. Daher mußten auch die verschiedenen Richtungen, in die sie sich später aufspaltete, unter allen Umständen an

Boltzmann anknüpfen. Besonders ausgeprägt ist diese „Abstammung“ bei HASENÖHRLS Schüler SCHRÖDINGER. Die Quantentheorie hat aber nicht nur die Physik umwälzend, sondern auch die Chemie, ja sogar die Biologie tiefgreifend beeinflußt. Auf allen diesen Gebieten ist die quantenhafte Aufnahme und Abgabe von Energie durch Moleküle eine Tatsache allergrößter Bedeutung.

Natürlich haben alle Zweige der Wissenschaft, die von Boltzmann ausgegangen sind, sich auch von Boltzmann entfernt. Relativitätstheorie und Quantentheorie geben auf wichtige Fragen andere Antworten als die klassische Physik. Daher müssen bestimmte Auffassungen Boltzmanns heute überholt sein. Sie bleiben aber innerhalb jenes Bereichs richtig, in dem die klassische Physik auch heute noch gilt. Von seinen Beiträgen zur kinetischen Theorie der Materie und zur statistischen Mechanik hat der Zahn der Zeit nichts weggenagt.

Die besondere Beständigkeit von Boltzmanns physikalischem Gesamtwerk ist teilweise durch seinen Arbeitsstil bedingt. Er verfolgte während seines ganzen Lebens immer die gleichen Hauptgedanken, faßte sie immer tiefer, ging ihren Konsequenzen immer weiter nach und mußte kaum jemals zurücknehmen, was er einmal ausgesprochen hatte. Dieser Arbeitsstil ist wohl dem Umstand angepaßt, daß Boltzmann innerhalb des Rahmens der klassischen Physik blieb. Es ist dabei bezeichnend, daß Boltzmann, obwohl leidenschaftlicher Vorkämpfer der Atomlehre, selbst auf die Aufstellung von Hypothesen über den Bau der Atome verzichtete. Solche Hypothesen konnten ja wirklich erst mit Hilfe der Quantentheorie Erfolg bringen.

(Die Arbeitsweise Boltzmanns in der Wissenschaft drückt sich übrigens auch in seinem literarischen Stil aus. Durch Jahrzehnte erscheinen in Boltzmanns Schriften immer wieder eng verwandte Schlüsse, Ableitungen, Formulierungen, Vergleiche. Der Leser verzeihe daher auch dem gegenwärtigen Autor, wenn er bei der Darlegung der Gedanken Boltzmanns Wiederholungen nicht immer vermeiden konnte!)

Der Arbeitsstil Boltzmanns unterscheidet sich etwa von dem EINSTEINS, der in großartiger Intuition und zäher Durchführung entschlossen über den Bereich der klassischen Physik hinaustrat, die Relativitätstheorie begründete und auch zur Quantentheorie wesentliche Beiträge lieferte. Angesichts der Notwendigkeit zum Beschreiten unbekanntes Neulands darf es nicht wundern, daß EINSTEINS Gedanken sich in manchen Fällen nicht weiter verfolgen ließen und von ihrem Autor selbst aufgegeben wurden⁵). PLANCK nimmt wohl — nicht nur zeitlich — eine Mittelstellung ein. Seine wissenschaftliche Grundeinstellung war konservativ. Er war sich zwar der Tragweite der Quantenhypothese, die er zur Erklärung bestimmter Experimente, also unter dem Zwang besonderer Erfahrung, eronnen hatte und die auch anders gar nicht zu erhalten war, von Anfang an bewußt⁶). Dessenungeachtet hoffte er noch lange, die Quantentheorie in den Rahmen der klassischen Physik einordnen zu können⁷).

Während die physikalischen Theorien Boltzmanns allgemeine Anerkennung errungen haben, tobt der Kampf der philosophischen Auffassungen weiter. Zwar hat der Schiffbruch MACHS in der Frage der Atomlehre auch den Kredit seiner Philosophie beeinträchtigt. Beispielsweise von EINSTEIN wurde sie als „im wesentlichen unhaltbar“ bezeichnet⁸). Trotzdem hat sie auch heute noch unter den Wissenschaftlern großen Anhang. Dem Verfasser scheint jedoch, daß die Lehren Boltzmanns, so weit sie reichen, für Gegenwart und Zukunft Gültigkeit behalten werden.

Gewiß muß die zeitgenössische Philosophie sich mit den neuen Erkenntnissen der Physik, mit der Relativität von Raum und Zeit und mit der Unschärferelation auseinandersetzen. Gewiß auch müssen Ethik und Ästhetik sich um das Verständnis des geschichtlichen Wandels der Normen bemühen.

Doch wollen wir Boltzmanns Grundauffassung festhalten, daß die Probleme der Erkenntnistheorie, der Ethik und Ästhetik Probleme der realen Außenwelt und des Verhältnisses des Menschengestes zu dieser, nicht aber bloß Probleme des Verhältnisses der Ideen unter-

einander sind. Auch erscheint sein Gedanke, die Probleme der Philosophie mit den Mitteln einer — verallgemeinerten — Entwicklungslehre zu lösen, in jeder Hinsicht fruchtbar. Mag man auch über die philosophischen Anschauungen Boltzmanns hinausgehen, an ihnen vorbeigehen darf man keinesfalls.

ANMERKUNGEN ZUM NACHWORT

1) L. INFELD, Albert Einstein. Sein Werk und sein Einfluß auf unsere Welt. Wien 1953.

2) CARL SEELIG, Einstein und die Schweiz. Zürich-Stuttgart-Wien 1952.

3) A. EINSTEIN, Physik und Realität. Zeitschrift für freie deutsche Forschung. Paris 1939. Abgedruckt in *Out of My Later Years*. London 1950.

4) R. EHRENFELD, Grundriß einer Entwicklungsgeschichte der chemischen Atomistik. Heidelberg 1906.

5) EINSTEIN hat selbst, wie JAMES FRANCK erzählt, über seine Neigung zur versuchsweisen Aufstellung von Theorien gescherzt. WALTHER NERNST kam auf eine gewisse kausale Beziehung zu sprechen, worauf EINSTEIN bemerkte: „Ich glaube nicht, daß diese Beziehung Gültigkeit hat.“ Darauf NERNST: „Aber, Herr Kollege, es ist doch jene Beziehung, die Sie in Ihrer letzten Publikation selbst aufgestellt haben!“ Zu seiner Verblüffung erhielt er umgehend die Antwort: „Was kann ich dafür, daß der liebe Gott nicht mit dem rechnen will, was ich in meiner letzten Publikation behauptet habe?“ — Als FRANCK dies übrigens lachend H. A. LORENTZ erzählte, meinte Dieser nach einigen Sekunden Schweigens: „Ach ja, EINSTEIN kann sich wohl so etwas erlauben.“²⁾

6) Siehe z. B. E. N. Da C. ANDRADE, *Nature* 161, 284 (1948).

7) Siehe z. B. L. FLAMM, Nachruf auf PLANCK, Almanach der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (1948).

NACHWEIS DER SCHRIFTEN BOLTZMANNNS

Vorweg und besonders sei an dieser Stelle dem Verehrer BOLTZMANNNS und Meister aller Bibliothekare, Herrn ROBERT CHORHERR, herzlichst gedankt, dem alle Wiener Kollegen wohl stets verpflichtet sein werden und der auch in diesem Falle dem Autor die sonst so mühsame Literatursuche zur Freude machte.

Die kürzeren Originalarbeiten, 139 an der Zahl, wurden von F. HASENÖHRL gesammelt und 1909 im Verlag J. A. Barth, Leipzig, unter dem Titel *Wissenschaftliche Abhandlungen von Ludwig Boltzmann* in drei Bänden veröffentlicht.

Die 23 *Populären Schriften* erschienen 1905 im gleichen Verlag. Außerdem existieren die Bücher:

Vorlesungen über die Principe der Mechanik. 2 Bände, Leipzig: J. A. Barth, 1897 und 1904.

Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes. 2 Bände, Leipzig: J. A. Barth, 1891 und 1893.

Vorlesungen über Gastheorie. 2 Bände, Leipzig: J. A. Barth, 1896 und 1898.

Gemeinsam mit J. NABL wurde der Beitrag *Kinetische Theorie der Materie* in der *Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften*, Leipzig: Teubner, 1905, verfaßt.

SACHVERZEICHNIS

- | | |
|--|--|
| <p>Abbild, siehe Bilder</p> <p>Abstammungslehre 93, 98, 104
bis 109, 121 bis 128, 132, 144</p> <p>Akustik 9, 14, 45</p> <p>Analytische Mechanik, siehe Mechanik</p> <p>Anschaulichkeit 99 bis 104, 120</p> <p>Äonen 79, 80</p> <p>A priori 40 bis 42, 91, 107 bis 110, 126</p> <p>Arbeit 58, 68 bis 71, 74, 77</p> <p>Ästhetik 23, 127 bis 129, 143</p> <p>Äther 52, 79</p> <p>Atomlehre 26, 27, 35 bis 47, 57
bis 66, 72, 73, 80, 84, 87, 102
bis 105, 119, 120, 137 bis 143</p> <p>Außenwelt 94, 95, 99, 114 bis 121</p> <p>Beschreibung 96 bis 98</p> <p>Bewegung, absolute 48</p> <p>Bewußtsein 90, 93, 104, 105, 114, 121, 127</p> <p>Bilder 47, 49, 84, 94, 95, 98 bis 109, 118, 119, 125 bis 127</p> <p>Boltzmannsche Konstante 28, 72</p> <p>Biologie 25, 127, 141, 142</p> <p>Brechungsindex 54</p> | <p>Chemie 36 bis 39, 61, 94, 95, 103, 141, 142</p> <p>Dampfdruck 61</p> <p>Dampfmaschine 69, 70, 104</p> <p>Deduktion 47 bis 50, 73</p> <p>Denkgesetze 40, 91, 94, 102 bis 113</p> <p>Denkökonomie, siehe Ökonomie</p> <p>Dielektrizitätskonstante 53, 54</p> <p>Differenzierbarkeit 42, 43</p> <p>Diffusion 37, 62, 75, 140</p> <p>Ding an sich 111</p> <p>Druck 59, 61, 140</p> <p>Eiweiß, siehe Protoplasma</p> <p>Elastizität 9, 10, 14, 100, 101</p> <p>Elektrizität 9, 10, 14, 45, 51 bis 57, 98 bis 101, 104</p> <p>Elektromagnetismus 14, 34, 46, 53 bis 57, 100, 139</p> <p>Elektronen 33, 40, 41, 46, 56, 64, 83, 141</p> <p>Elektrotechnik 94</p> <p>Empfindungen 80, 90, 97, 115 bis 126</p> <p>Empirie 94, 95, 140</p> <p>Energetik 12, 27, 38, 39, 43, 45, 46, 50, 51, 102</p> |
|--|--|

- Ensemble 62, 63
 Entropie 28, 66, 70 bis 73, 84, 134, 141
 Entwicklungslehre, siehe Abstammungslehre
 Erfahrung 42, 43, 47 bis 49, 69, 77, 102, 103, 108 bis 110
 Erinnerung 105 bis 107, 115, 123, 126
 Erster Hauptsatz der Wärmelehre 59, 68, 69
 Ethik 121 bis 130, 134, 143
 Experiment 13, 14, 22, 33, 40, 47, 75, 94, 96, 130

 Fernwirkung 52, 53
 Festkörper 39, 54, 58 bis 63
 Fluida 52, 53
 Flüssigkeiten 58 bis 63, 100
 Flugzeug 14, 18

 Gastheorie 9, 10, 17, 26, 37 bis 43, 54, 58 bis 67, 76, 140
 Gedächtnis, siehe Erinnerung
 Gehirn 105 bis 109, 124, 125
 Geist 93, 98 bis 104, 118, 125, 127, 143
 Geräte, siehe Maschinen
 Gleichgewicht 59 bis 63, 66, 67, 73 bis 80
 Glück 91, 122, 123, 129
 Gravitation 53, 61

 H-Theorem 71, 80
 Hydrodynamik 9, 10, 17, 75
 Hypothesen 17, 37, 39, 41, 47, 77, 97, 99, 101, 105

 Idealismus 13, 114 bis 116, 119, 129

 Idealität 110
 Induktion 49, 50, 73, 89, 140

 Kapillarität 9
 Kausalität 89, 90, 112, 113
 Kinetische Theorie 57 bis 63, 140, 142
 Klassische Physik 33 bis 36, 43, 50, 64
 Kontinuum 41, 42
 Kraft 42, 46, 48, 89, 111
 Kreisprozeß 68, 70
 Kristallographie 38, 39, 103

 Leben 45, 69, 71, 74, 77 bis 79, 83, 104, 105, 110 bis 112, 121 bis 126, 134
 Licht 34, 53 bis 56
 Lichtäther, siehe Äther
 Logik 88, 91, 122
 Lust 122 bis 127

 Magnetismus 9, 10, 45, 52 bis 56
 Maschinen 100, 123 bis 127
 Masse 46, 48
 Massenpunkt 43 bis 49, 65
 Massenwirkungsgesetz 61
 Materialismus 50, 119
 Materie 40, 41, 48, 58, 75, 81, 89 bis 93, 106, 116 bis 121, 125, 126
 Mechanik 9, 10, 13, 38, 42 bis 56, 67 bis 73, 93, 100 bis 104, 121 bis 131, 139 bis 141
 Metaphysik 89, 91, 111, 114, 122
 Moleküle 37 bis 39, 58 bis 62, 76, 77, 118, 119, 140, 141
 Moral, siehe Ethik
 Musik 15, 17, 19

Ökonomie 78, 119 bis 121
Optik 9, 14, siehe auch Licht
Ordnung 58, 59, 67, 74, 77
Osmotischer Druck 61

Perpetuum mobile 69
Pflanzen 71, 118, 122, 127
Phänomenologie 39, 40, 46, 49,
73, 101, 102, 139 bis 141
Phantasie 94, 97, 99
Phasenraum 63
Philosophie 5, 9, 11, 12, 16, 38,
42, 82, 87 bis 93, 119 bis 122,
143, 144
Positivismus 101
Potentielle Energie 58, 68
Praxis 13, 14, 87, 91, 94 bis 96,
110, 130, 138
Protoplasma 93, 104, 122
Psychologie 93, 104, 106, 108,
117, 119, 124 bis 126

Quantentheorie 34 bis 36, 57, 64,
65, 141 bis 143

Radioaktivität 27, 34, 84
Raum 48, 78 bis 81, 90, 107, 109,
143
Reaktionsgeschwindigkeit 62, 63
Realismus 106, 119
Realität, siehe Außenwelt
Reflex 105, 126
Reibung 37, 59, 62, 67, 68, 74,
140
Relativitätstheorie 34, 44, 47,
53, 139, 142, 143
Reversibilität 67 bis 72, 75 bis
82
Röntgenstrahlen 16, 34
Rotation 34, 56 bis 59, 68, 77

Schmerz 105, 122 bis 127
Schwankungen 74 bis 82, 141
Schwefel 22, 54
Schwerkraft, siehe Gravitation
Schwingungen 14, 34, 54 bis 59,
83
Seele 90, 109, 125
Solipsismus 115
Spektralanalyse 21, 39
Spiralnebel 75, 79
Sprünge 97, 98
Statistik 35, 36, 60 bis 68, 72 bis
74, 141, 142
Statistische Mechanik 41, 51, 53,
62 bis 66, 71, 77, 81, 140, 142
Strahlung 34, 36, 56 bis 58, 70, 83

Technik 14, 18, 94, 95, 110, 111,
129, 137, 138, 141
Teilbarkeit 40, 41, 75, 90
Temperatur 56 bis 62, 69 bis 72,
74, 77, 83, 140
Theorie 13, 33, 47, 78, 79, 93 bis
104, 130
Thermodynamik, siehe Wärme-
lehre
Tiere 23, 71, 117 bis 122, 127
Tod, siehe Leben
Translation 58, 77
Transmutation 40

Unendlich 41, 42, 77, 80, 81, 90
Unschärferelation 143

Vererbung 122, 124, 127
Verschiebungssatz 57, 83
Verteilung 59 bis 67
Viskosität, siehe Reibung
Vorstellungen 93, 97, 105, 107,
110, 115 bis 122, 126

- | | |
|---|--|
| Wahrnehmungen, siehe Empfindungen | Weltall 74 bis 82, 94, 119 |
| Wahrscheinlichkeit 28, 66 bis 82, 134 | Wiedererkennbarkeit 64, 65 |
| Wärmelehre 9, 38, 45, 50, 51, 57 bis 59, 68 bis 73, 103, 140, 141 | Wiederkehrsatz 81 |
| Wärmeleitung 23, 37, 62, 70, 75, 140 | Wille 93, 118, 122, 123 |
| Wärmestrahlung, siehe Strahlung | Zahlentheorie 9 |
| Wärmemethode 74 bis 82 | Zeit 42, 43, 65, 71, 73, 76 bis 81, 90, 143 |
| | Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre 57, 68 bis 70, 75 bis 79, 134 |

NAMENVERZEICHNIS

- | | |
|-----------------------------|--|
| Abel 95 | Brown 76, 122 |
| Aigentler 15 | Bruckner 15 |
| Ambrosi 28 | Budde 24 |
| Ampère 52, 95 | Bunsen 4 |
| Andrade 143 | Cato 131 |
| Arrhenius 4 | Cauchy 17 |
| Auer 96 | Chamisso 132, 134 |
| Bacon, F. 89 | Chorherr 146 |
| Bacon, R. 89 | Clausius 58, 70, 74 |
| Badeni 8 | Crowther 51, 83 |
| Bartoli 57 | Curie 34 |
| Becquerel 34 | Dalton 36 |
| Beethoven 15, 16, 17 | Darwin 92, 104, 105, 106, 107, 122, 124, 125, 127, 132 |
| Berkeley 114, 115 | De Martin 5, 29 |
| Bernoulli 38 | Demokrit 38 |
| Blaserna 12, 29 | Des Coudres 13, 14, 15, 26, 27, 29, 30, 55, 69, 73, 83, 84 |
| Bohr 141 | Dirac 64 |
| Boltzmann, P. 6, 25, 26, 29 | Doppler 136 |
| Börne 132, 134 | |
| Bose 64 | |
| Brommer 22, 29 | |

Ebert 30
Ehrenfeld 145
Ehrenfest 10, 29
Ehrenhaft 28, 30
Einstein 34, 47, 64, 76, 139, 143,
145
Ettingshausen 4
Eucken 71, 84
Euler 17
Exner 43, 83, 84, 138

Faraday 52, 100
Fermi 64
Ficker 6, 29
Flamm, E. 15, 21, 26, 29
Flamm, L. 3, 9, 11, 23, 27, 29,
30, 64, 83, 87, 134, 145
Franck 145

Galilei 37
Gauß 17
Gibbs 62, 68, 141
Glan 6
Goethe 15, 16, 102
Gutenberg 18

Hahn 5, 21, 29
Hall 56
Hamilton 38, 44
Hasenöhrle 19, 29, 74, 84, 137,
142, 146
Hegel 38, 88, 98
Heine 128
Helm 12, 37
Helmholtz 4, 6, 17, 27, 30, 52, 58,
77, 89, 96
Herbart 88
Hertz 48, 51, 54, 55, 101, 108,
109, 112

Höfler 11, 24, 26, 29, 36, 83, 87,
108, 134
Homer 16
Hume 114

Infeld 145

Jacobi 17
Jaffe 5, 25, 26, 29
Jäger 3, 19, 29, 61, 76
Jodl 11

Kainz 16
Kant 79, 88, 90, 107
Kelvin, siehe Thomson, W.
Kepler 133, 134
Kienzl 6, 8, 14, 24, 25, 27, 29
Kirchhoff 4, 6, 16, 17, 28, 29, 57,
75, 89, 96, 101, 131
Klein 12, 81
Kolumbus 18, 19
Königsberger 4
Kopernikus 105
Kress 14

Lagrange 44, 51
Lampa 9, 26, 29, 93, 134
Laplace 44, 79
Lebedew 57
Lessing 22
Leverrier 38
Loeb 20
Lommel 29
Lorentz 12, 13, 29, 49, 56, 57, 83,
145
Loschmidt 3, 5, 6, 7, 8, 14, 22, 25,
29, 30, 83, 118, 138
Ludwig 16, 29

Mach 5, 12, 14, 26, 27, 29, 37, 73,
84, 101, 113, 114, 119, 120, 139,
140, 143
Mache 8, 11, 20, 29
Marek 11, 30
Maxwell 6, 17, 27, 39, 51, 52, 53,
54, 55, 57, 58, 59, 60, 63, 68,
89, 100, 137, 138, 139, 140, 141
Mayer 89
Meitner 7, 9, 16, 19, 29
Mendelejew 36
Meyer 5, 9, 14, 29, 37, 84
Mill 140
Mozart 8, 16

Nabl 146
Nernst 4, 20, 95, 140, 145
Neumann 17
Newton 44, 53, 139, 141

Oersted 52
Ohm 95
Oparin 104
Ostwald 5, 12, 20, 24, 26, 27, 30,
37, 38, 43, 50, 73, 84, 88, 91,
115, 119, 122

Paulus 131
Pawlow 105
Petzval 4
Planck 6, 34, 35, 36, 37, 57, 68,
71, 83, 141, 143, 145
Plutarch 131
Poincaré 81
Poisson 44
Przibram 25, 30, 89, 134
Pythagoras 132, 134

Röntgen 34, 96
Rousseau 133
Rumford 38
Rutherford 141

Saulus, siehe Paulus
Schiller 9, 15, 16, 81, 84, 92, 128,
131, 133
Schopenhauer 16, 23, 24, 87, 88,
91, 92, 106, 113, 121, 124
Schrödinger 6, 65, 83, 142
Schubert 16
Schütz 80
Seelig 145
Shakespeare 15
Skaupy 10, 11, 29
Smoluchowsky 76
Sokrates 133
Solon 18
Sommerfeld 12, 29, 35, 51, 55,
68, 72, 83, 141
Stefan 3, 4, 6, 7, 8, 14, 25, 29, 30,
52, 56, 57, 84, 96, 97, 137
Streintz 11, 14, 20, 29

Tandler 28, 30
Thirring 28, 30
Thomson, J. J. 34
Thomson, W. 37, 83, 100

Van der Waals 61

Wald 73
Wallenstein 134
Weber 53
Wien 57

Zermelo 75, 77, 81, 84





ZBPH



+P274409