

Das physikalische Werk Peter Debye's¹

Günther Rasche, Universität Zürich

Am 24. März dieses Jahres wäre Peter Debye 100 Jahre alt geworden. Zu diesem Anlass haben die Zürcher Physiker zwei Vorträge geplant. Den ersten halte ich Ihnen jetzt; er wird sich in der Hauptsache mit dem physikalischen Werk Debye's befassen. Der zweite Vortrag findet morgen abend im Rahmen der Physikalischen Gesellschaft statt, wo Herr Busch auch über die Persönlichkeit Debye's ausführlich berichten wird.

Vor 1½ Monaten traf ich Mansel Davies, der 1970 den Nachruf auf Debye für die Royal Society geschrieben hat. Ich fragte ihn, wie er, der selbst nicht Fellow der Royal Society ist, zu dieser Ehre gekommen sei. Er erklärte mir, dass die Royal Society tatsächlich zuerst einen der Ihrigen mit dieser Aufgabe betraut hätte; der habe aber nach kurzer Zeit aufgegeben. Der zweite Fellow, der angefragt wurde, habe sofort mit der Begründung abgelehnt, das bedeute eine halbjährige Vollbeschäftigung, zu der er nicht bereit wäre. So fragte die Royal Society Davies, und er hat einen Nachruf geschrieben, wie ihn Debye sich nicht besser hätte wünschen können.

Sie sehen aus dieser Geschichte auch die Schwierigkeit, in der ich mich heute befinde: Es ist unmöglich, in einer Stunde das ganze Werk Debye's zu besprechen; und statt länger als eine Stunde zu reden, möchte ich mich hauptsächlich auf die Arbeiten beschränken, die eine gewisse Beziehung zu Zürich haben.

Die folgende Aufstellung gibt einen Eindruck von den vielen Stationen des Wirkens Debye's:

- 1904–06 Aachen
- 1906–11 München
- 1911–12 Zürich (Universität)
- 1912–14 Utrecht
- 1914–20 Göttingen
- 1920–27 Zürich (ETH)
- 1927–34 Leipzig
- 1934–40 Berlin
- 1940–52 Cornell University in Ithaca (NY).

Auch nach seinem Rücktritt 1952 arbeitete Debye bis zu seinem Tode im Laboratorium in Ithaca weiter und hielt in der ganzen Welt Vorträge, auch in Zürich.

¹ Dieser Aufsatz entstand aus einem Vortrag, der am 3.5.1984 im Rahmen des Physikalischen Kolloquiums beider Zürcher Hochschulen gehalten wurde. Eine vollständige Liste aller Publikationen Debye's findet man in den «Biographical Memoirs of the Fellows of the Royal Society» 16, 175 (1970) (ETH Bibliothek Per 915705 BG).

In Aachen und München entstanden unter dem Einfluss Sommerfeld's diejenigen 12 Arbeiten, die 1911 zu Debye's Berufung als Nachfolger Einstein's an die Universität Zürich führten. Die Titel gebe ich in folgender Übersicht und werde den Inhalt kurz beschreiben.

1. Wirbelströme in Stäben von rechteckigem Querschnitt
2. Eine Bemerkung zu der Arbeit von Hrn. Schulze:
«Einige neue Methoden zur Bestimmung der Schwingungszahlen höchster hörbarer und unhörbarer Töne usw.»
3. Der Lichtdruck auf Kugeln von beliebigem Material
4. Das Verhalten von Lichtwellen in der Nähe eines Brennpunktes oder einer Brennlinie
5. Das elektromagnetische Feld um einen Zylinder und die Theorie des Regenbogens
6. Näherungsformeln für die Zylinderfunktionen für grosse Werte des Argumentes und unbeschränkt veränderliche Werte des Index
7. Stationäre und quasistationäre Felder (Handbuchartikel)
8. Semikonvergente Entwicklung für die Zylinderfunktionen und ihre Ausdehnung ins Komplexe
9. Elektromagnetische Wellen an dielektrischen Drähten (mit Hondros)
10. Zur Theorie der Elektronen in Metallen (Habitationsarbeit)
11. Die Berechnung der Moleküldimensionen aus Radiometerbeobachtungen
12. Der Wahrscheinlichkeitsbegriff in der Theorie der Strahlung.

Debye hat 1905 in Aachen sein Diplom als Elektroingenieur erworben. Die erste Publikation ist seine Diplomarbeit. Er leitet darin die exakte Lösung für die Feldverteilung in einem unendlich langen Eisenblech rechteckigen Querschnittes in einer unendlich langen Spule für quasistationäre periodische Vorgänge her und berechnet die Wärmeverluste infolge der Foucault'schen Ströme im Eisenblech. Dazu bildet er das Oberflächenintegral des Poyntingvektors. Die Arbeit behandelt ein Thema, dessen weitestgehende Verallgemeinerungen einen grossen Teil von Debye's späterem Werk beherrschen: die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie. Sie zeigt bereits auch einen wesentlichen Zug besonders seiner frühen Arbeiten: ein Problem mathematisch zuerst völlig allgemein und ohne jede Näherung soweit wie möglich zu behandeln und erst im Endergebnis zu den physikalisch wichtigen Grenz- und Sonderfällen überzugehen.

Die Arbeit 7. ist ein mathematisch hervorragend geschriebener Handbuchartikel in der Encyclopädie der Mathematischen Wissenschaften, in dem Debye noch einmal seine Beherrschung der Grundlagen der Elektrotechnik zeigt.

In der Arbeit 2. beschäftigt er sich zum ersten Mal mit der Elastizitätsmechanik, deren Kenntnis ihm später bei der Theorie der spezifischen Wärme fester Körper zugute kommen sollte. Es ist eine kleine Arbeit, die durch eine experimentelle Untersuchung von Schulze über die Chladni'schen Klangfiguren von eingeklemmten kreisförmigen Platten angeregt worden war. Die ge-

messen, nach Schulze unverständlichen Anomalien erklärte Debye in zwangloser Weise qualitativ als erzwungene Schwingungen. Quantitativ liess sich nicht viel ausrechnen, da die genauen Anregungsbedingungen unbekannt waren.

Die Arbeit 3. ist Debye's Dissertation. In ihr und den damit eng zusammenhängenden Arbeiten 5., 6. und 8. zeigt er beispielhaft, wie man eine einwandfrei gestellte physikalische Aufgabe anzugehen und zu lösen hat. Fehlende mathematische Hilfsmittel schuf er dabei selbst.

Angeregt wurde Debye zu 3. durch die Arrhenius'sche Theorie der Kometenschweife. Arrhenius benutzte für den Strahlungsdruck eine Formel, in der Beugungseffekte vernachlässigt werden. Das Verhältnis Strahlungsdruck: Gravitationskraft ist dann aus geometrischen Gründen umgekehrt proportional dem Radius a des vom Licht der Wellenlänge λ getroffenen Teilchens und steigt somit für kleine Teilchen über alle Grenzen.

Debye berechnete nun (nach teilweisen Vorarbeiten von Schwarzschild und Mie) das exakte elektromagnetische Feld einer asymptotisch ebenen Welle, die auf eine Kugel beliebigen Materials auftrifft. Das Feld ergibt sich als Reihenentwicklung, als Partialwellenzerlegung, in welcher die Zylinderfunktionen vorkommen. Die mechanische Kraft (\equiv Strahlungsdruck) des nun bekannten Feldes auf die Kugel wird als Oberflächenintegral seines Maxwell'schen Tensors über eine im Unendlichen liegende Fläche berechnet. Es ergibt sich aus der 80seitigen Arbeit, dass das Verhältnis Strahlungsdruck: Gravitationskraft für vollkommen reflektierende und für rein dielektrische Kugeln im Grenzfall kleiner Radien verschwindet. Für endliche Leitfähigkeit ist dieses Verhältnis für kleine Radien verschieden von 0, aber endlich.

Das Ergebnis für den Strahlungsdruck ist durch eine unendliche Summe ausgedrückt, deren n 'tes Glied die Zylinderfunktionen n 'ter Ordnung für das Argument $2\pi \frac{a}{\lambda}$ enthält. Für die physikalisch interessanten Argumente der Grössenordnung 1 (und grösser) konvergiert die Summe schlecht, da die «... in den einzelnen Termen der Reihe auftretenden Zylinderfunktionen bei grossen Werten des Argumentes mit steigendem Index nur äusserst langsam abnehmen...». Dadurch «... wird man also auf den Versuch geführt, Näherungsformeln für die Zylinderfunktionen zu konstruieren, die bei beliebig veränderlichem Index dieselben für grosse Werte des Argumentes ersetzen können.»

Diese schon von Rayleigh gestellte Aufgabe ist in den beiden rein mathematischen Arbeiten 6. und 8. vollständig gelöst. Die Ergebnisse benutzte Debye für die numerische Berechnung bereits in seiner Dissertation und dann auch in der kurzen Arbeit 5., in welcher der Regenbogen allerdings nur am Rande erwähnt wird.

Den Abschluss der Debye'schen Arbeiten über klassische Beugungsprobleme bildet 4. Darin wird das Verhalten von Lichtwellen in der Nähe der

geometrischen Strahlenvereinigung untersucht. Dies ist wichtig zum genauen Verständnis der Wirkungsweise optischer Instrumente, z.B. für die Helligkeitsverteilung bei schlechter Fokussierung unter Berücksichtigung der Beugung. Man gelangt mit diesen Methoden zu einer gleichzeitigen Behandlung von geometrischen und undulatorischen Abbildungsfehlern, wie das im Born'schen Buch über Optik schön gezeigt wird.

Schon 1899 hatte Sommerfeld die Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen entlang eines leitenden, geraden, kreiszylindrischen Einzeldrahtes behandelt und die von ihm als «Hauptwelle» bezeichnete Lösung gefunden. Sie ist dadurch ausgezeichnet, dass sie einen ausgeprägten Skineffekt zeigt und sich deshalb praktisch ungedämpft mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt. In seiner Dissertation fand Hondros 10 Jahre später zusätzlich die sogenannten «Nebenwellen», die sich aber über das ganze Drahtinnere ausdehnen, deshalb stark gedämpft sind und für die Beobachtung keine Rolle spielen. In der Arbeit 9. wird nun das Problem für einen dielektrischen Draht untersucht. Die Ursache für die Dämpfung der Nebenwellen entfällt dann, und in der Tat zeigen Hondros und Debye, dass oberhalb einer gewissen Grenzfrequenz die Nebenwellen fortgepflanzt und beobachtet werden können. Eine Hauptwelle gibt es im dielektrischen Fall nicht.

In der Habilitationsarbeit 10. zeigt Debye zum ersten Mal seine Beherrschung der Methoden der statistischen Mechanik. Er will hier eine systematische Statistik der Metallelektronen aufgrund der Boltzmann-Gibbs'schen Prinzipien versuchen. Die Ergebnisse sind heute überholt; wir wissen, dass zur Behandlung dieser Fragen die Quantenstatistik benutzt werden muss. So kann man diese Arbeit gewissermassen als Vorläufer des grossen, 20 Jahre später geschriebenen Handbuchartikels von Bethe und Sommerfeld auffassen.

Andererseits leitet sie auch direkt über zu 12., wo mit den Methoden der statistischen Mechanik die erste direkte Herleitung der Planck'schen Strahlungsformel gegeben wird. Während Planck selber die materiellen Resonatoren «quantisierte» und für den Zusammenhang mit der Energieverteilung der Strahlung im Hohlraum eine klassische Formel benutzte, «quantisiert» Debye die elektromagnetischen Feldoszillatoren direkt. Dazu benutzt er die Rayleigh-Jean'sche Abzählung der Eigenschwingungen des elektromagnetischen Feldes in einem Kubus mit spiegelnden Wänden. Die Anzahl Eigenschwingungen pro Volumeinheit zwischen den Frequenzen ν und $\nu + d\nu$ ist:

$$N d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu.$$

Nun benutzt er die Planck'sche Elementarquantenhypothese in der Form: «Schwingungsenergie kann von ponderablen Körpern aufgenommen werden und eventuell in Energie von anderer Schwingungszahl überführt werden nur in Form von Quanten von der Grösse $h\nu$.»

Er verteilt also die jeder der Eigenschwingungen zukommende Energie in Elementarquanten $h\nu$. Sei $f(\nu)$ die Anzahl Quanten in der Eigenschwingung der Frequenz ν ; dann ist die Energie pro Volumeinheit zwischen den Frequenzen ν und $\nu + d\nu$ gegeben durch

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu h\nu f(\nu).$$

Die Wahrscheinlichkeit W eines beliebigen, durch die Verteilungsfunktion $f(\nu)$ charakterisierten Zustandes des Feldes wird nun durch die Anzahl voneinander verschiedener Zuordnungen der Quanten zu den Eigenschwingungen gemessen. Es ergibt sich (mit der gleichen Zählmethode wie bei Planck)

$$W = \Pi \frac{(N d\nu + N f d\nu)!}{(N d\nu)! (N f d\nu)!}.$$

Das Zeichen Π bedeutet das Produkt über alle zu den verschiedenen Frequenzintervallen $d\nu$ gehörigen Teilwahrscheinlichkeiten. Das Boltzmann'sche Prinzip ergibt für die Entropie des Strahlungsfeldes pro Volumeinheit

$$s = k \log W$$

und unter Benutzung der Stirling'schen Formel wird

$$s = k \frac{8\pi}{c^3} \int_0^\infty \{ (1+f) \log (1+f) - f \log f \} \nu^2 d\nu.$$

Um das Gesetz der schwarzen Strahlung zu finden, muss man dasjenige $f(\nu)$ suchen, welches s bei gegebener Gesamtenergie pro Volumeinheit

$$u = \int u_\nu d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \int \nu^3 f d\nu$$

zu einem Maximum macht. Die Rechnung führt zum Planck'schen Resultat

$$f = \frac{1}{\frac{h\nu}{ekT} - 1}.$$

Das Ziel dieser Arbeit formuliert Debye noch einmal im letzten Satz: «Vor allem aber hoffen wir gezeigt zu haben, dass für die Ableitung des Strahlungsgesetzes kein über die Quantenhypothese hinausgehendes Eingehen auf die Resonatoreigenschaften erforderlich ist.»

In der Arbeit 11. wird aus Radiometerbeobachtungen eine grössenordnungsmässige Abschätzung der Moleküldimensionen gegeben, die sehr gut mit anderen Messungen (Wärmeleitfähigkeit, van der Waals-Gesetz, Viskosität und Diffusion) übereinstimmt.

Aufgrund der besprochenen Arbeiten und Empfehlungen von Röntgen und Sommerfeld wurde Debye am 8. April 1911 als Extraordinarius für theoretische Physik «und Mitbeteiligung an den Praktika nach Verständigung mit

dem Ordinarius für Physik» gewählt. Seine Antrittsrede vom 8. Juli 1911 mit dem Titel «Die Frage nach der atomistischen Struktur der Energie» ist ein ausgezeichnetes Beispiel für seine immer wieder gerühmte Fähigkeit, auch schwierige Themen verständlich für ein breites Publikum darzustellen. Ich empfehle sie jedem zur ausführlichen Lektüre (56. Jahrgang der Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 1911, Seite 156). Nach einer anschaulichen Besprechung des Planck'schen Strahlungsgesetzes beschäftigt er sich darin mit anderen Gebieten der Physik, «wo die endliche Teilbarkeit der Energie eine Rolle spielen könnte». Am wichtigsten schien ihm dabei (neben dem Photoeffekt, dem Nernst'schen Wärmetheorem, der kinetischen Theorie der Magnetisierung und der elektrischen Leitfähigkeit) die Theorie der spezifischen Wärme fester Körper, die Einstein (und Nernst-Lindenmann) bereits in vorläufiger Weise den Erfordernissen der Quantentheorie angepasst hatte. Für sehr tiefe Temperaturen hatten sich aber experimentelle Abweichungen von den theoretischen Ergebnissen gezeigt. Debye setzte sich in seiner ersten Zürcher Arbeit zum Ziel, diese Diskrepanzen zu erklären. Die Resultate trug er zum ersten Mal in seiner Vorlesung über Thermodynamik im Wintersemester 1911/12 vor.

Behandelt wird ein einatomiger fester Körper. Die Energie seiner Gitterschwingungen kann man in guter Näherung auf eine Summe ungekoppelter linearer harmonischer Oszillatoren verschiedener Eigenfrequenzen zurückführen. Die Anzahl der Oszillatoren ist das Dreifache der Anzahl N der Atome im Körper. Weitgehend unbekannt ist die Lage der Eigenfrequenzen; doch liegen sie sicher sehr dicht beieinander, so dass man sie durch eine Frequenzverteilungsfunktion $z(\nu)$ beschreiben kann:

$z(\nu) d\nu =$ Anzahl Schwingungen mit Eigenfrequenzen zwischen ν und $\nu + d\nu$.

Debye benutzt nun, dass nach den Planck'schen Ideen jede Eigenschwingung mit der Frequenz ν im thermischen Gleichgewicht die Energie

$$\frac{h\nu}{e^{kT} - 1}$$

hat. Das kommt ja auch aus seinen eigenen ausführlichen Rechnungen für das Strahlungsgesetz heraus. Damit gilt für die Energie U des Körpers:

$$U = \int_0^{\infty} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1} z(\nu) d\nu$$

wobei zusätzlich, falls man eine Näherung für $z(\nu)$ macht, noch gelten muss:

$$\int_0^{\infty} z(\nu) d\nu = 3N.$$

Es «erübrigt» (eine häufig von Debye benutzte sprachliche Wendung) nun, $z(\nu)$ zu kennen. Einstein nahm an, dass es nur eine Frequenz ν gibt: $z(\nu) = 3N \delta(\nu - \nu)$. Das führt zu einer spezifischen Wärme

$$c_v = \frac{\partial U}{\partial T},$$

welche im Grenzfall kleiner Temperaturen nach einem Exponentialgesetz verschwindet. Debye überlegt nun, dass $z(\nu)$ für kleine Frequenzen (nur diese werden bei niedrigen Temperaturen angeregt!) die Frequenzverteilung der elastischen Eigenschwingungen (also des akustischen Spektrums) des Körpers sein muss. Diese berechnet er zu

$$z(\nu) = \frac{12\pi}{c_s^3} V \nu^2$$

(V = Volumen des Körpers, c_s = Schallgeschwindigkeit im Körper) und benutzt sie auch für grosse ν . Das maximale ν_{\max} bestimmt sich in seiner Näherung dann aus:

$$\int_0^{\nu_{\max}} z(\nu) d\nu = 4\pi V \frac{\nu_{\max}^3}{c_s^3} = 3 N$$

und kann ebenso wie die berühmte Debye-Temperatur $\theta = \frac{h \nu_{\max}}{k}$ durch die Schallgeschwindigkeit ausgedrückt werden. Damit wird:

$$U = 9 k N \frac{T^4}{\theta^3} \int_0^{\theta/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx.$$

Die spezifische Wärme einatomiger fester Körper ist also eine universelle Funktion des Verhältnisses T/θ . Für kleine T/θ verhält sie sich in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den Messungen wie $(T/\theta)^3$, für grosse T/θ ergibt sich der klassische Dulong-Petit'sche Wert $3 k N$. Dass auch dieser Grenzfall richtig herauskommt, liegt daran, dass für grosse Temperaturen die Energie eines Oszillators unabhängig von seiner Frequenz ist. Für $T \sim \theta$ ergeben sich messbare Abweichungen, die durch die spätere, genauere und kompliziertere Rechnung von Born und Karman erklärt werden können. Die konsequente Berechnung des Frequenzspektrums selbst in der elastischen Näherung ist nicht einfach. Debye löste dazu das elastische Eigenwertproblem für einen kugelförmigen Körper mit festgehaltener Oberfläche und fand daraus die asymptotische Verteilung der Eigenschwingungen. Dabei half ihm seine Kenntnis der bereits bei den elektrodynamischen Problemen benutzten Methoden. Die mathematische Frage nach der Verteilung der Eigenfrequenzen ist keineswegs einfach zu lösen und hat später immer wieder auch Hermann Weyl beschäftigt.

In diese erste Zürcher Zeit fällt auch der Beginn der Debye'schen Arbeiten über die Dipoltheorie. Die vorläufige Mitteilung an die Physikalische Zeitschrift unter dem Titel «Einige Resultate einer kinetischen Theorie der Isolatoren» behandelt die Temperaturabhängigkeit der statischen Dielektrizitätskonstanten: in vielen Flüssigkeiten nimmt sie mit abnehmender Temperatur sehr stark zu. Ein Dielektrikum stellte man sich nach der Lorentz'schen Elek-

tronentheorie damals so vor, dass man im Inneren der die Substanz bildenden Moleküle elastisch gebundene Elektronen annahm. In einem von aussen angelegten elektrischen Feld verschieben sich diese Elektronen und erzeugen die dielektrische Polarisierung. Ein Einfluss der Temperatur war bei diesem Mechanismus unverständlich. Um die experimentellen Ergebnisse zu erklären, nahm Debye die Existenz eines permanenten elektrischen Dipolmomentes der Moleküle an. Die Ausrichtung der Dipole im äusseren elektrischen Feld wird durch die Wärmebewegung gestört, und somit ergibt sich der Einfluss der Temperatur auf die Dielektrizitätskonstante.

Die Rechnung verläuft wie bei der Langevin'schen Theorie des Paramagnetismus (1905), und Debye gibt nur das Resultat an. Aus dem Vergleich mit den Experimenten kann man dann das elektrische Moment entnehmen. Wegen der Unkenntnis über das innere Feld bei Flüssigkeiten ist die Theorie im strengen Sinne nur für Gase und Dämpfe anwendbar. Messungen lagen damals aber nur für Flüssigkeiten vor, und Debye erhielt somit nur grössenordnungsmässig richtige Werte, alle ca. $5 \cdot 10^{-19}$ esu. Wichtig ist seine Bemerkung, dass unterhalb einer kritischen Temperatur «auch ohne äusseres Feld eine Polarisierung im Inneren des Körpers vorhanden sein kann, d. h. man würde eine remanente dielektrische Polarisierung beobachten können». Dies ist der erste Hinweis auf die Möglichkeit der 10 Jahre später von Valasek zum ersten Mal beobachteten Ferroelektrizität.

Nach 3 Semestern verliess Debye Zürich vorerst und folgte einem Ruf nach Utrecht. Hier entstand die Arbeit «Zur Theorie der anomalen Dispersion im Gebiete der langwelligen elektrischen Strahlung». Es war ihm aufgefallen, dass die Substanzen mit permanentem elektrischen Dipolmoment bei kleinen Frequenzen (Drahtwellen) des elektrischen Feldes bereits eine anomale Dispersion zeigen. Diese erklärt er dadurch, dass die permanenten Dipolmomente im Gegensatz zum zeitunabhängigen Fall bei diesen Frequenzen nicht mehr genügend Zeit haben, um sich während eines Viertels der Schwingungsperiode parallel zum Feld auszurichten. Als Bremsmechanismus wirkt die innere Reibung. Für die Relaxationszeit erhält Debye

$$\frac{8\pi\eta a^3}{kT}$$

(a = Radius des Moleküls, η = Zähigkeit der Substanz), und für elektromagnetische Schwingungsdauern in dieser Grössenordnung beginnt die anomale Dispersion. Bei bedeutend kleineren Schwingungsdauern können sich die permanenten Dipole gar nicht mehr ausrichten, und nur noch die Verschiebungselektronen tragen zur Polarisierung bei.

Debye hat sich mit den elektrischen Dipoleigenschaften der Moleküle immer wieder beschäftigt und sie für die Chemie fruchtbar gemacht. Die Grundideen sind aber schon in den beiden beschriebenen Arbeiten enthalten. Das Vorgehen in der zweiten Arbeit ist ein Modell für die Behandlung von Relaxationsprozessen beim Studium des Verhaltens von Molekülen geworden.

In die Utrechter Zeit fällt die erste Bohr'sche Arbeit über den Aufbau der Atome und Moleküle (Juli 1913). Im gleichen Jahr gab Debye die allgemeine Form der klassischen Quantenbedingung für periodische Bewegungen:

$$\int p \, dq = nh.$$

Damit war sein Interesse an der Erforschung der Atom- und Molekülstruktur von einer weiteren Seite geweckt.

Inzwischen hatte Laue in München mit Friedrich und Knipping die Röntgenstrahlinterferenzen an Kristallen entdeckt, und im gleichen Jahr (1912) wurde die Bragg'sche Anordnung bekannt. Laue behandelte in seiner rein geometrischen Theorie der Interferenzen das Atomgerüst des Kristalles als starr, vermutete aber schon, dass die Schwingungen der Atome um ihre Ruhelagen die Interferenzbilder wesentlich beeinflussen könnten. Debye war aufgrund seiner Arbeit über die spezifische Wärme sofort in der Lage, diesen Einfluss quantitativ zu berechnen. In drei kleineren Arbeiten aus Utrecht (29.7., 30.7. und 18.8.1913) behandelt er, gleichsam als Lockerungsübung, das Problem in starker Vereinfachung: er berücksichtigt nur eine Atomschwingungsfrequenz. Als Hauptergebnis können wir hier schon das auch ohne diese Näherung gültige Resultat vorausnehmen: die Schärfe der Interferenzmaxima wird nicht durch die Temperaturbewegung beeinflusst, wohl aber ihre Intensität. Am 29. September 1913 schloss er dann die grosse, zusammenfassende Arbeit «Interferenz von Röntgenstrahlen und Wärmebewegung» ab, in welcher er das gesamte Schwingungsspektrum des Kristalls wie bei der Theorie der spezifischen Wärme berücksichtigt. Die Einstellung Debye's gegenüber dem Wechselspiel zwischen Experiment und Theorie geht aus folgendem Zitat hervor:

«... die Frage, ob die Interferenzerscheinungen durch Temperaturänderungen in ihrem Aussehen beeinflusst werden, ist bisher experimentell noch nicht in Angriff genommen. Unter diesen Umständen mag es voreilig scheinen, die Theorie über das schon durch die Näherungsrechnungen Erreichte ausbauen zu wollen. Dennoch haben wir das im folgenden ausgeführt, von dem Gedanken ausgehend, dass es für die experimentelle Prüfung bequemer sein muss, über die Richtigkeit unserer Vorstellungen zu entscheiden, wenn man sich einer bis zu gewissem Grade abgeschlossenen Theorie gegenüber befindet.»

Debye zeigte, dass die Temperaturabhängigkeit der Interferenzerscheinung bei tiefen Temperaturen Aufschluss über die Existenz der Nullpunktsenergie geben kann. Er schliesst, dass es möglich sein muss, «... mittels Messungen über die Intensitätsverteilung als Funktion der Temperatur eine endgültige Entscheidung für oder wider der Hypothese der Nullpunktsenergie zu erbringen.

An der hiesigen Stelle fehlten leider die Mittel zu dieser Untersuchung, ich muss mich deshalb jeder Vermutung über das wahrscheinliche Resultat solcher Versuche enthalten.»

Der letzte Satz ist eine kaum verhüllte Spitze gegen die Utrechter Verhältnisse und seine dortigen Kollegen. Bis jetzt hatte Debye noch keine experimentelle Arbeit selbständig durchgeführt. Insbesondere wohl aber nach der Entdeckung der Röntgeninterferenzen am Sommerfeld'schen Institut realisierte er, wie fruchtbar sich eine (wenn auch bescheidene) Möglichkeit zu eigenem Experimentieren auswirken konnte. Es juckte ihn jetzt in den Fingern, zwischen den verschiedenen theoretischen Möglichkeiten durch eigene Versuche entscheiden zu können. Das war wohl der Hauptgrund, warum er 1914 den Ruf nach Göttingen annahm. Dort wurde ihm ein Teil des Voigt'schen Institutes zur Verfügung gestellt, und seitdem gingen die theoretischen und die experimentellen Arbeiten von Debye Hand in Hand. Für heute will ich mich allerdings weiterhin mehr mit den theoretischen Entwicklungen befassen.

Wir erwähnten bereits, dass Debye die klassische Quantenbedingung verallgemeinert hatte: das Bohr'sche Atommodell war ihm geläufig. Aufgrund seiner Arbeiten über Röntgeninterferenzen an Kristallen schien es ihm natürlich, auch die nach Bohr regelmässige Anordnung der Elektronen im Atom oder Molekül durch die gleiche Methode sichtbar zu machen. Das Prinzip erläutert er in seiner meisterhaften Arbeit «Zerstreuung von Röntgenstrahlen» (Göttingen 25.2.1915). Er berechnet zunächst die Streuung einer elektromagnetischen Welle an einem «Bohr'schen» Atom mit p Elektronen. Für ein einzelnes Elektron ($p = 1$) erhält man bei den geläufigen Röntgenwellenlängen in guter Näherung die Streustrahlung des Hertz'schen Dipols. Bei mehreren Elektronen hat man aber i. a. Interferenzeffekte zu berücksichtigen. Wenn nun, wie in einem amorphen Körper, alle Orientierungen der Atome vorkommen, muss man das Ergebnis über alle Richtungen mitteln. Es bleibt dann noch ein Rest der beim festgehaltenen Atom zustande gekommenen Interferenzen übrig. Das Verhältnis der gestreuten zur einfallenden Intensität wird:

$$V = \frac{N \varepsilon^4}{\mu^2 c^4} \frac{1 + \cos^2 \vartheta}{2} \frac{1}{R^2} \sum_n \sum_m \frac{\sin(2 k s_{nm} \sin \frac{1}{2} \vartheta)}{(2 k s_{nm} \sin \frac{1}{2} \vartheta)}$$

- s_{nm} Abstand zwischen n 'tem und m 'tem Elektron
 $-\varepsilon, \mu$ Ladung und Masse des Elektrons
 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ Wellenzahlvektor der Röntgenstrahlen
 ϑ Winkel zwischen Beobachtungs- und Einfallrichtung
 R Abstand des Beobachtungspunktes vom Streukörper.

Die Formel zeigt, dass «trotz der Regellosigkeit der Orientierung der Atome dennoch Interferenzen zu erwarten sind infolge der Regelmässigkeit der Elektronenanordnung im Inneren der Atome». Für $\lambda \gg s_{nm}$ folgt $V \sim p^2$; für $\lambda \ll s_{nm}$ folgt $V \sim p$, ausser in einem kleinen Winkelbereich um die Einfallrichtung. Experimente für $\lambda \approx s_{nm}$ können dann Aufschluss über die s_{nm}

geben. Für kleine θ erwartet man günstigenfalls Interferenzringe. So etwas hatte Friedrich angeblich schon undeutlich gesehen.

In Göttingen traf Debye nun mit dem jungen Paul Scherrer zusammen, und es begann eine erfolgreiche experimentelle Zusammenarbeit. Am 3. Dezember 1915 legten die beiden der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen bereits ihre ersten systematischen Untersuchungen über Röntgeninterferenzen an «amorphen» Substanzen vor. Die Figuren waren allerdings so scharf, dass sie nicht von Interferenzen der wenigen Elektronen eines Atoms herrühren konnten. Es stellte sich heraus, dass das «amorphe Pulver» in Wirklichkeit aus kleinen Kriställchen bestand und «die Erscheinung mit Notwendigkeit aus der von v. Laue entworfenen Theorie der Kristallinterferenzen» folgt. Damit war im Gegensatz zum ursprünglichen Forschungsplan das berühmte Debye-Scherrer-Verfahren entdeckt, welches ein Jahr später in den USA unabhängig auch von Hull gefunden wurde. Die unschätzbare Bedeutung ihrer Methode für die Strukturanalyse war den beiden Autoren wohl bewusst: «Tatsächlich gelingt es mit Hilfe einer einzigen Photographie, die gegenseitige Lage und die Abstände der Atome im Kristall zu bestimmen.»

Debye verlor aber sein Hauptziel, mit einem «nach Röntgenwellenlängen eingeteilten Massstab» direkten Aufschluss über das Atominnere zu bekommen, nicht aus den Augen. Die Beobachtung des reinen Effektes an einzelnen Atomen ist nur in verdünnten Gasen zu erwarten, und dort war die Intensität zu gering für aussichtsreiche Versuche. Deshalb unterzog er die Laue-Diagramme einer verfeinerten Analyse mit der Absicht, die Kristallinterferenzen als nebensächlich zu eliminieren und die reine Atomstreuung zu ermitteln. Dazu musste aber beim LiF-Kristall z. B. zunächst einmal festgestellt werden, ob das Li als Atom oder als Ion eingebaut ist. In kühner Weise extrapolierten Debye und Scherrer die Laue-Intensitäten nach verschwindendem Streuwinkel und schlossen, dass Li^+ und F^- vorliegt, wie bei der Elektrolyse. Dann wählten sie Diamant (weil dort der Temperatureffekt sehr klein ist) und schlossen aus den Laue-Intensitäten bei grossen Winkeln auf die reine Atomstreuung am C. Die Messungen erlaubten, als grössten Effekt der Elektronenanordnung die Ausdehnung der Elektronenhülle zu ermitteln. Das Ergebnis war mit den Bohr'schen Vorstellungen verträglich.

Debye bemerkte auch, dass diese Methoden im Prinzip benutzt werden könnten, um Aufschluss über die chemische Bindung zu erhalten. Das ist in grober Weise verständlich, wenn man bedenkt, dass es ja die Elektronen sind, welche die primären Röntgenstrahlen streuen; es sollte aus der Verteilung der Sekundärstrahlung also im günstigsten Fall auch hervorgehen, wie viele Elektronen dem ganzen Molekül und wie viele den einzelnen Atomen angehören.

Debye und Scherrer untersuchten schon in Göttingen auch die Streuung von Röntgenstrahlung an Flüssigkeiten. Sie glaubten zunächst, Interferenzen zwischen den verschiedenen Atomen eines Benzolrings gesehen zu haben und auf seinen Durchmesser schliessen zu können. Dies war aber eine Täuschung.

1925 in Zürich zeigte Debye, dass sogar für Gase bei grösseren Dichten ein Interferenzring auftritt, weil die Moleküle ein endliches Volumen einnehmen. Insbesondere einatomiges flüssiges Argon zeigt einen solchen «Flüssigkeitsring». Zu einer sauberen Trennung von zwischenmolekularen und innermolekularen Interferenzen kam es allerdings nicht, bis Debye und Mitarbeiter 1929–30 (in Leipzig) bei normalen Drucken an Gasen messen und die zwischenmolekularen Interferenzen experimentell unterdrücken konnten. Damit gelang zum ersten Mal die Röntgenbeugung an isolierten Molekülen (CCl_4).

Debye experimentierte mit einfachsten Mitteln und grosser Intuition. Er hatte das Glück, am Ausgang der romantischen Zeit zu arbeiten, als man den mühsamen Instanzenweg von der Absichtserklärung über das bewilligte Proposal bis zur Zuteilung der Strahlzeit noch nicht kannte. Diesen Zeitaufwand konnte Debye sich sparen. Allerdings gab es damals noch keine Computer. Viel Zeit müssen also die ausgiebigen und zum Teil langwierigen numerischen Rechnungen gekostet haben, die fast jede seiner Arbeiten enthält. Fehlerrechnungen habe ich bei ihm nie gesehen, auch fast keine Fehlerangaben. Auf Präzisionsmessungen liess er sich sowieso nicht ein.

Als die äusseren Bedingungen in Göttingen nach dem Kriege sehr schlecht wurden, nahm Debye 1920 einen Ruf an die ETH an. Mit ihm kam Scherrer auf ein Extraordinariat. Eine dokumentierte Zusammenarbeit zwischen den beiden gab es m. W. aber nicht mehr. In dieser zweiten Zürcher Zeit entstanden drei wesentliche Arbeiten: Die Erklärung des Compton-Effektes, die Theorie der starken Elektrolyte und die Bemerkungen zur adiabatischen Entmagnetisierung.

In seiner grundlegenden Göttinger Arbeit (1915) «Zerstreuung von Röntgenstrahlen» hatte Debye die klassische Elektrodynamik für die Streuung elektromagnetischer Strahlung an Elektronen als gültig angenommen; insbesondere hat dann die Sekundärstrahlung die gleiche Frequenz wie die Primärstrahlung. Debye kannte die davon abweichenden Messungen von Compton (1922). In seiner Zürcher Arbeit «Zerstreuung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie» nimmt er an, «... dass die klassische Elektrodynamik auch für die Berechnung der Streustrahlung eines freien durch Primärstrahlen angeregten Elektrons versagt und durch eine Quantenauffassung ersetzt werden muss». Er fährt fort: «Die Sekundärstrahlung sei im Sinne von Einstein als «Nadelstrahlung» aufgefasst. Auf Grund dieser Prämissen lässt sich jetzt ein sehr detailliertes Bild des Prozesses gewinnen, wenn man a) den Energiesatz und b) den Impulssatz auch auf diesem Gebiete als zutreffend annimmt. Die beiden Sätze sind ohne Zusatzhypthesen allein ausreichend.» Aus dem relativistischen Energie-Impulssatz ergibt sich dann die Frequenzverschiebung der Sekundärstrahlung als Funktion des Streuwinkels, und Debye stellt das graphisch sehr übersichtlich dar. Bemerkenswert sind auch seine Worte zur Intensitätsfrage: sie kann «nur gelöst werden durch eine Angabe über die Wahrscheinlichkeit eines Einzelprozesses. In unserem Fall ist die Wahrscheinlichkeit dafür anzugeben, dass bei gegebener Intensität in der Primär-

strahlung ein Sekundärstrahl entsteht, welcher in einen Raumwinkelbereich $d\Omega$ zeigt, dessen Mittellinie mit der Primärrichtung einen Winkel ϑ einschliesst.» Die Debye'sche Arbeit ist unabhängig von der Compton'schen, doch etwas später erschienen.

Im Folgenden werde ich nun näher auf die Elektrolytheorie eingehen. Arrhenius hatte 1884 als erster klar die Hypothese ausgesprochen, dass die Moleküle des gelösten Stoffes im Lösungsmittel auch ohne äusseres Feld in entgegengesetzt geladene Ionen zerfallen können. Die angenäherte Richtigkeit dieser Hypothese hatte er durch Vergleich der einerseits aus dem Leitvermögen und andererseits aus der Gefrierpunktserniedrigung folgenden experimentellen Dissoziationsgrade plausibel gemacht. Er erkannte aber auch schon deutlich systematische Abweichungen ausserhalb der Fehlergrenzen bei starken Elektrolyten, z. B. KCl. Der Dissoziationsgrad α ergibt sich theoretisch als Funktion der Konzentration c eines gelösten binären Salzes (auf solche beschränken wir uns der Einfachheit halber im Folgenden) aus dem Massenwirkungsgesetz (zuerst von Guldberg-Waage 1867 experimentell gefunden) zu

$$\alpha = 1 - \frac{c}{K} + O(c^2)$$

c : Konzentration der gelösten Moleküle

K : Konstante des Massenwirkungsgesetzes.

Nun hängen natürlich osmotischer Druck usw., insbesondere auch die gut messbare Gefrierpunktserniedrigung sowie die Leitfähigkeit eines Elektrolyten vom Dissoziationsgrad und damit von c ab. Es seien

R : absolute Gaskonstante

T : Gefrierpunktstemperatur bei $c > 0$

T_0 : Gefrierpunktstemperatur bei $c = 0$

Q : Schmelzwärme eines Mols

Λ : molare Leitfähigkeit = $\frac{\sigma}{c}$

$\Lambda_0 = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\sigma}{c}$.

Dann gilt nach den üblichen Gesetzen der Thermodynamik für die Gefrierpunktserniedrigung

$$\frac{T-T_0}{T_0} = - \frac{Q}{R T_0} = - 2 c f_0(c)$$

und für die molare Leitfähigkeit

$$\Lambda = \Lambda_0 f_\lambda(c).$$

Im Grenzfall völliger Dissoziation des Elektrolyten wären der osmotische Koeffizient $f_0 = 1$ und der Leitfähigkeitskoeffizient $f_\lambda = 1$. Die Grössen $1 - f_0$ und $1 - f_\lambda$ beschreiben also die Abweichungen von diesem Grenzfall. Aus dem Massenwirkungsgesetz ergibt sich:

$$f_0 = 1 - \frac{1}{2} \frac{c}{K} + o(c^2) \quad \text{und} \quad f_\lambda = 1 - \frac{c}{K} + o(c^2).$$

Experimentell waren eigenartigerweise diese Gesetze für schwache Lösungen (c sehr klein) starker Elektrolyte (K sehr gross, d. h. α fast 1) nicht erfüllt. Statt dessen hatte bereits Kohlrausch experimentell gefunden:

$$1 - f_0 \approx c^{1/2} \quad 1 - f_\lambda \approx c^{1/2}.$$

Es war schon seit langem klar, dass das Massenwirkungsgesetz dieses Resultat nicht erklären konnte; insbesondere Bjerrum, Sutherland und Milner hatten bereits darauf hingewiesen, dass die elektrostatische Wechselwirkung der Ionen untereinander berücksichtigt werden müsse. Dies hatte Ghosh zwischen 1918 und 1921 in einigen Arbeiten durchzuführen versucht, doch konnte er das Kohlrausch'sche Gesetz nicht erklären. Diese Ghosh'schen Ansätze waren für Debye und Hückel der Anlass, das Problem in zwei Arbeiten von insgesamt 42 Seiten zu lösen. Als erste Fussnote in der ersten Arbeit sagt Debye: «Angeregt wurde ich zu den vorliegenden Überlegungen durch einen Vortrag von E. Bauer in der hiesigen Physikalischen Gesellschaft über die Ghosh'schen Arbeiten. Die allgemeinen Gesichtspunkte, von denen hier zur Berechnung von Gefrierpunktniedrigung sowie der Leitfähigkeit ausgegangen wird, führten mich unter anderem zu dem Grenzgesetz mit der zweiten Wurzel der Konzentration. Ich konnte darüber im Winter 1921 im hiesigen Kolloquium berichten. Unter der tätigen Mithilfe meines Assistenten Dr. E. Hückel fand dann im Winter 1922 die eingehende Diskussion der Ergebnisse und ihre Zusammenfassung statt. (P. Debye).»

Die grundlegende Ausgangsidee von Debye für die Klärung der Erscheinungen in starken Elektrolyten ist die Annahme, dass sie vollständig dissoziiert sind ($\alpha = 1$) und jedes Ion infolge der elektrostatischen Wechselwirkung eine «Ionenatmosphäre» um sich herum aufbaut, in welcher die dem «Zentralion» entgegengesetzten Ladungen im Mittel überwiegen. Die lineare Ausdehnung dieser Ionenatmosphäre, den sog. Debye-Radius, erhält man für einen binären Elektrolyten durch folgende (zumindest physikalisch) selbstkonsistente Rechnung:

$\frac{N}{V} = c$: Konzentration des Elektrolyten, d. h. mittlere Konzentration jeder Ionensorte

$\psi(r)$: von Zentralion und Ionenatmosphäre erzeugtes elektrostatisches Potential

ε : Elementarladung

D : Dielektrizitätskonstante des Wassers

$\rho(r)$: Ladungsdichte der Ionenatmosphäre in der Nähe des Zentralions

Nach der Boltzmann-Verteilung ist dann

$$\rho = \varepsilon c \left(e^{-\frac{\varepsilon\psi}{kT}} - e^{\frac{\varepsilon\psi}{kT}} \right) = -2 \varepsilon c \sinh \frac{\varepsilon\psi}{kT}.$$

Die Poissongleichung verlangt

$$\Delta \psi = - \frac{4\pi}{D} \varrho.$$

Aus der Kombination beider Gleichungen ergibt sich

$$\Delta \psi = \frac{8\pi \varepsilon c}{D} \sinh \frac{\varepsilon \psi}{kT}.$$

Linearisierung dieser Gleichung führt zu

$$\Delta \psi = \frac{8\pi \varepsilon^2 c}{kTD} \psi.$$

Lösung ist

$$\psi = \frac{\varepsilon}{D} \frac{e^{-\kappa r}}{r}$$

mit dem Debye-Radius

$$\frac{1}{\kappa} = \sqrt{\frac{kTD}{8\pi \varepsilon^2 c}}.$$

Dieser ist ein Mass für die Ausdehnung der Ionenatmosphäre, jener charakteristischen Länge, welche alle Ergebnisse der Theorie beherrscht. Das Auftreten der Wurzel aus der Konzentration macht es plausibel, dass das Kohlrausch'sche Gesetz erklärt werden kann. Es ergibt sich eine elektrische Zusatzenergie für das Zentralion gegenüber seiner Ionenatmosphäre. Also erhält man Zusatzglieder in den thermodynamischen Grössen. Daraus folgt nach den üblichen thermodynamischen Regeln wie erwünscht:

$$1 - f_0 = \frac{1}{6} \frac{\varepsilon^2}{DkT} \kappa \sim c^{1/2}.$$

An diesen Formeln habe ich Ihnen gezeigt, wie Debye ein solches Problem in Angriff nahm und an geeigneter Stelle Vernachlässigungen machte. Er war jetzt ein Meister der ersten Näherung (Manfred Eigen nennt ihn so) geworden. Die Problematik der Linearisierung war ihm natürlich wohl bewusst. Seinem tiefen Verständnis für die physikalischen Zusammenhänge und (so vermute ich) seiner Schulung durch Arnold Sommerfeld an exakt lösbaren Problemen verdankt Debye, dass er immer die richtigen Vereinfachungen machte.

Die zweite Elektrolytarbeit beschäftigt sich mit der Leitfähigkeit der starken Elektrolyte. Dies ist ein verwickelteres Problem, da bei bewegtem Zentralion die Ionenatmosphäre nicht mehr radialsymmetrisch ist. Das kann als Relaxationseffekt interpretiert werden: die Ionenatmosphäre braucht etwas Zeit, um sich bei bewegtem Ion auszubilden. Das führt zu einer Zusatzkraft. Die Verhältnisse werden weiter dadurch kompliziert, dass die Dichte der Ionen-

atmosphäre um das bewegte Zentralion zwar gleichbleibt, dass sie sich aber unter dem Einfluss des äusseren Feldes in entgegengesetzter Richtung bewegt. Sie schleppt das umgebende Lösungsmittel bis zu einem gewissen Grade mit, so dass sich das Zentralion relativ zu einem bewegten Lösungsmittel bewegen muss. Werden alle diese Effekte berücksichtigt, erhält man nach Debye und Hückel wie erwünscht:

$$1 - f_{\lambda} \sim \kappa \sim c^{1/2}.$$

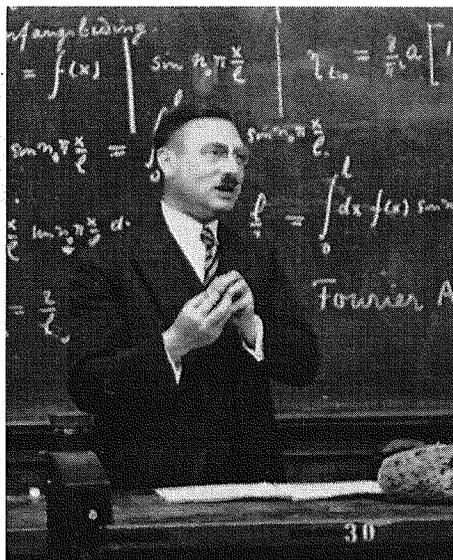
Während es sich sowohl bei der Erklärung des Comptoneffektes als auch bei der Elektrolytheorie um die Analyse und Interpretation von bekannten Erscheinungen handelte, wird in der kurzen Arbeit (sieben Seiten) «Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur» die später so fruchtbare Methode der adiabatischen Entmagnetisierung zur Erzeugung tiefer Temperaturen zum ersten Mal und vollkommen klar entwickelt. Man darf deshalb sagen, dass dies die originellste Arbeit aus der zweiten Zürcher Zeit ist. Debye realisiert darin, dass die Langevin'sche Magnetisierungskurve paramagnetischer Substanzen für sehr kleine Temperaturen nicht gelten kann, da die Entropie sonst divergieren würde. Er benutzt sie trotzdem, um ganz grob eine grössenordnungsmässige Abschätzung der realisierbaren Temperaturerniedrigung bei Gadoliniumsulfat zu geben. Es zeigte sich, dass diese fast gleich gross sein könnte wie die $1,3^{\circ}\text{K}$, die Kamerling-Onnes bereits erreicht hatte. Die letzten Sätze der Debye'schen Arbeit lauten deshalb: «Eine Voraussage über die Grösse der erreichbaren Abkühlung darf man wohl nicht wagen, aber es scheint nicht ausgeschlossen, dass dieselbe erheblich sein könnte. Das Experiment allein kann indessen Aufschluss geben, die obigen Überlegungen sollen zur Ausführung desselben anregen.» Ein Jahr später (1927) wurde von Giauque in Berkeley die gleiche Anregung gemacht; die ersten Experimente gelangen 1933 in Berkeley und Leiden.

Damit habe ich Ihnen erzählt, welche Arbeiten Debye's auf seine Tätigkeit in Zürich einen Einfluss hatten und welche Arbeiten er hier gemacht hat. Der grundlegende Teil seines physikalischen Werkes war 1927 bei seinem Weggang nach Leipzig abgeschlossen. Seine Interessen verlegten sich immer mehr auf chemische Fragestellungen, kernphysikalische Themen behandelte er z. B. gar nicht. Er setzte die Untersuchung von Flüssigkeiten, Gasen und Molekülen mit Röntgenstrahlen fort, baute (mit Falkenhagen) die Elektrolytheorie aus, schrieb ein Buch über die Dipoltheorie. Wichtig waren noch seine Beiträge zur Beugung von Licht an Ultraschallwellen, die dabei die Funktion des optischen Gitters übernehmen. Auch weitere Arbeiten über tiefe Temperaturen folgten.

1940 verliess Debye Deutschland und wurde Professor für Chemie an der Cornell University. Hier untersuchte er insbesondere grosse Moleküle (Polymere) in Lösungen durch Lichtstreuung und hatte damit noch einmal grossen Erfolg.

Debye war der vielseitigste und genialste Naturwissenschaftler unserer Zeit. Eine Grenze zwischen Physik und Chemie gab es für ihn nicht, die Mathematik als Werkzeug beherrschte er perfekt. Bereits 1916 war er zum ersten Mal für den Nobelpreis für Physik nominiert worden, der Preis wurde aber wegen der Kriegswirren nicht vergeben. Erst 20 Jahre später, 1936, erhielt er dann den Nobelpreis für Chemie. 1950 wurde ihm die Max-Planck-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft verliehen.

Debye war ein ausgezeichnete Lehrer. Wie er auf seine Zuhörer wirkte, kann man aus erster Hand im Nachruf lesen, den Alfred Brunner 1966 für die NZZ geschrieben hat. Ich habe Debye nie gehört und kann nichts darüber sagen. Dafür zeige ich Ihnen ein Bild aus einer Vorlesung während der Leipziger Zeit:



Es handelt sich offensichtlich um die Lösung eines Anfangswertproblems mit Fourieranalyse. Die Schrift ist präzise, und was an den einfachen Formeln nicht sofort klar ist, wird noch mit einer entsprechenden Handbewegung plausibel gemacht.

Es gibt von Debye m. W. keine philosophischen Äusserungen wie von vielen anderen seiner Kollegen. Wie er über Physik und Chemie, denen er seine ganze Arbeitskraft gewidmet hatte, dachte, können wir aus folgendem Zitat entnehmen: «... our science is essentially an art which could not live without the occasional flash of genius in the mind of some sensitive man, who, alive to the smallest of indications, knows the truth before he has the proof.»