

## Das thermisch bedingte elektromagnetische Feld

Helmut Nieke

### Zusammenfassung

Als Folge der Wärmebewegung wird das thermisch bedingte elektromagnetische Feld (TEMF) definiert, das die Temperaturstrahlung durch Dipolbildung erzeugen soll. Seit etwa 1960 ist man der Ansicht, daß Elementarteilchen eine Struktur haben. Mit Hilfe der historischen Entwicklung der Temperaturstrahlung und der Beugung des Lichtes wird gezeigt, daß es überfällig ist, das Photon mit Struktur versuchsweise als Mittel oder Grundlage der Quantisierung der Strahlung zu betrachten. Ein Photon mit der Frequenz  $f$  ist nur dann in der Struktur stabil und emittierbar, wenn es die Einstein-Gleichung  $E = h f$  erfüllt.

### The Thermally Conditioned Electromagnetic Field

#### Abstract

As consequence of thermic motion the thermally conditioned electro-magnetic field (TEMF) is defined which should produce the temperature-radiation by means of dipole formation. Since 1960 we think that elementary particles have a structure. In terms of historical development of temperature-radiation and diffraction of light is shown that it is overdue to consider by way of trial the structure of the photon as medium or basis of quantization of radiation. A photon with the frequency  $f$  is only stable in structure and emittable if the Einstein-equation  $E = h f$  is fulfilled.

#### 1. Einleitung

Die Wärme hält man heute unbestritten durch die innere Bewegung der Materie bedingt, was als kinetische Wärmetheorie anerkannt ist. In Form von Temperaturstrahlung wird die thermische Energie teilweise in elektromagnetische Strahlung umgewandelt. Die Frage lautet also: „Warum strahlen heiße Körper?“

Mathematisch wird für den schwarzen Körper die Verbindung mit der Temperatur durch die Plancksche Strahlungsformel hergestellt. Physikalisch hat man jedoch keine konkrete Vorstellung von dieser Umwandlung.

Man kennt die Hertzsche Dipolstrahlung, bei der (die periodisch erzeugte) elektrische Energie in Strahlung umgewandelt wird, wobei pro Periode viele Quanten abgestrahlt werden können.

Die spontane Emission (durch Stoß oder Wechselwirkung von Elektronen, Ionen usw.) ist dadurch charakterisiert, daß das Quant nicht sofort nach der Anregung emittiert wird sondern erst nach einer mittleren Verweilzeit oder Lebensdauer und dann jeweils nur ein Quant pro Prozeß.

Die stimulierte Emission setzt angeregte Zustände voraus, so daß ein Photon ein weiteres Photon auslösen kann.

Alle drei Entstehungsarten passen nicht ohne weiteres auf die Entstehung der Temperaturstrahlung.

Die Möglichkeit der Erzeugung der Temperaturstrahlung durch Dipolbildung der Materie wurde oft, z. B. auch schon von Einstein [1] gefordert, da aber damals die Struktur von Elementarteilchen noch nicht bekannt war, konnten keine Einzelheiten angegeben werden.

## 2. Die Planckschen Quantenauffassung

Planck [2] vereinigte in seiner Strahlungsformel alle bisherigen Ansätze. Planck sah die Strahlung als gegeben an, er forderte nur Gleichgewichtseinstellung durch ein Kohlestäubchen, Resonatoren und später durch Oszillatoren. Die Quantisierung erfolgte nach Planck in jedem Fall durch die Schwingungen des (linearen oder harmonischen) Oszillators. Dieser soll nur Schwingungsenergie als Vielfaches eines Energiebetrages von anfangs  $\epsilon$  später von  $hf/kT$  emittieren.

Bohr [3] charakterisierte: „Nun entbehrt die Strahlungstheorie in der von Planck ursprünglich gegebenen Gestalt, wie allgemein zugegeben wird, innerer Folgerichtigkeit; ...“ In der Statistik wurde von anderen Autoren die Quantisierung auch über die Einteilung in Phasenzellen und deren Besetzung infolge der Unterscheidungsmöglichkeiten der Teilchen begründet. Die Quantisierung erfolgte formal oder wurde mit dem Hohlraum oder dessen Wände begründet. Hierüber berichtete aus historischer Sicht z. B. Kuhn [4].

## 3. Quantisierung nach Bohr

Bohr ging von Spektrallinien und deren Gesetzen (Serienformeln der Linienspektren) aus, um den Aufbau der Atome zu ergründen. Dabei wurde ein Zusammenhang der Elektronenbahnen mit den emittierten Spektrallinien erwartet. Als Bedingung für stabile oder stationäre Bahnen sollte anfangs deren Länge ein Vielfaches der Wellenlänge sein. Später das Impulsmoment der Rotation oder der Drehimpuls gleich  $n h$ . Dabei war es nicht der Einzelwert, der die Frequenz der emittierten Photonen bestimmte, sondern die Differenz der Energie von zwei solchen möglichen Bahnen. Sind für die Bahn mit der höheren Energie die Bedingungen zur Emission erfüllt (besetzt oder angeregt) und die Bahn mit der niedrigeren Energie frei, so kann nach den Sätzen der Statistik eine Emission erfolgen. Zum Übergang von einer Bahn zur niedrigeren setzte er den Quantensprung an, um die Quantisierung zu begründen. Schwierigkeiten ergab die aus diesem Modell notwendige laufende Energieabgabe der bewegten Elektronen, die einen Zusammenbruch des Atoms zur Folge hätte.

Später gab Bohr die anschauliche Deutung ähnlich dem Planetensystem auf, und folgerte eine Unanschaulichkeit bei Quantenprozessen; es waren dann nur noch formale Quantenzahlen zu erfüllen. Der Dualismus von Welle und Korpuskel als Komplementarität und die ausschließlichen Wahrscheinlichkeitsaussagen bei Quantenprozessen als Indeterminismus wurden zur Grundlage der Heisenberg-Bohrschen Quantentheorie als Kopenhagener Deutung.

## 4. Quantisierung nach Einstein

Einstein [5] ging vom lichtelektrischen Effekt aus, der zwingend für das Photon eine Quantennatur fordert. Aber damit konnte auch er Beugung und Interferenz nicht erklären, die man seit Fresnel mit und nur mit Wellen erklären zu können glaubte. Einstein [6] forderte statt des Dualismus von Welle und Korpuskel eine Verschmelzung von Welle und Korpuskel, und trat gegen den Indeterminismus und Unanschaulichkeit bei Quantenprozessen auf.

Das Photon selbst war als Ursache der Quantisierung damals nicht denkmöglich, denn es galt als Massepunkt. Ab etwa 1960 wird eine Struktur der Elementarteilchen diskutiert, aber das Photon

mit seiner Struktur selbst als Anlaß oder Mittel der Quantisierung zu betrachten, wurde bisher nicht versucht. Das hat seinen Grund, da für Photonen und Elektronen durch den Dualismus von Welle und Korpuskel schon eine formale Struktur vorgegeben war, und damit wurde ein Fortschritt in dieser Richtung verhindert. Aber dieser Versuch ist schon lange (seit 1960) überfällig. Nach Kuhn [7] ist das ein Paradigmenwechsel mit allen dort geschilderten Konsequenzen.

Nieke [8] schlug zur Lösung dieses Problems den Prozeß der Sammelemission vor. Hier wird die sog. Lebensdauer als die Zeit zum Aufbau der Photonen im 'status nascendi' betrachtet. Während der Verweilzeit wird die Energie der Anregung mit Dipolmoment, von der Schwingung in Rotationsenergie des elektromagnetischen Feldes umgesetzt, wobei die Emission mit der Frequenz  $f$  erst erfolgt, wenn die Energie gemäß der Einstein-Gleichung  $E = h f$  gesammelt ist.

Nach Nieke [9] hat das Photon die hypothetische Struktur eines elektromagnetischen Wirbelpaares, so kann das Photon während der Lebensdauer eines Zustandes schrittweise aufgebaut werden. Dazu können elektromagnetische Impulse, die von der Wärmebewegung kommen können, gespeichert werden und wenn die Energie  $hf$  gesammelt ist, dann wird das Photon emittiert. Wie die elektromagnetischen Impulse infolge der Wärmebewegung entstehen und zur Strahlung beitragen können, soll hier untersucht werden.

### 5. Definition des TEMF

Die Entstehung einer Temperaturstrahlung als elektromagnetische Strahlung ist nach unseren Kenntnissen nur denkbar, wenn durch Wärmebewegung Di- oder Multipole durch Anregung entstehen oder in Bewegung gesetzt werden. Das durch die thermische Bewegung entstehende Feld hat noch keinen Namen und das zeigt schon, daß dieses Gebiet bisher ungenügend bearbeitet wurde, wohl aber führen Spezialfälle bereits eigene Namen.

Als thermisch bedingtes elektromagnetisches Feld (TEMF) sollen Feldwerte oder Energie des elektromagnetischen Feldes bezeichnet werden, welche durch thermische Bewegung (Translation, Rotation und Potentiale) der Materieteilchen und deren Wechselwirkungen einschließlich der thermischen Strahlung des eigenen Systems bewirkt wird.

Damit sind auch die sog. virtuellen Photonen, die Nieke [8] diskutierte, im TEMF enthalten, aber hier als Photonen im 'status nascendi'. Das TEMF folgt dem jeweiligen Rhythmus der thermischen Bewegung. Örtlich und zeitlich gemittelt hebt sich das nicht abgestrahlte Feld in größerem Abstand von der Materie auf. Die Energie des TEMF, als ein Teil der thermischen Energie, hebt sich natürlich nicht auf.

### 6. Allgemeine Aussagen über das TEMF

Die Definition läßt schon einige Aussagen über das TEMF zu. Örtlich und zeitlich gemittelt kann gemäß dem Energiesatz die Energie des TEMF  $W_{\text{TEMF}}$  nicht größer sein als die thermische Energie  $W_T$ , auch als Wärmeenergie oder in der Thermodynamik als innere Energie bezeichnet wird, also:

$$W_{\text{TEMF}} < W_T \quad (1)$$

Bei hohen Temperaturen wird im thermischen Gleichgewicht

$$W_T = m N k T \quad (2)$$

mit  $m$  als Zahl der Freiheitsgrade und  $N$  die Zahl der Atome. Sonst sind statt (2) die entsprechenden Gesetze der Thermodynamik einzuführen. Für die Feldwerte des TEMF gilt bei passend kleinem Volumen  $v$

$$W_{\text{TEMF}} = 1/2 ( \int (H B) dv + \int (E D) dv ) \quad (3)$$

Dabei kann man das TEMF aus Dipolfeldern zusammensetzen, indem außer den offensichtlichen Di- oder Multipolen noch die jeweils nächst gelegenen entgegengesetzten Ladungen als Dipole zusammengefaßt werden.

### 7. Quasimolekülbildung bei Stoß- und Streuprozessen

Die bei Stoßprozessen entstehenden Dipolmomente berechnete Born u. Huang [10] für die Grenzfälle der adiabatischen und harmonischen Näherung. Smith [11] berichtete über zwei Modelle sich stoßender Atome. Beim Überlappungsmodell über- oder durchlappen sich die äußeren Elektronenschalen und beim Verzerrungsmodell werden diese deformiert wie ein Tennisball vom Schläger. Bobashev [12] zeigte, daß nach einem Stoß die Quasimolekül-Anregung noch weiter bestehen kann.

Die Bildung von Quasimolekülen während eines Stoß- oder Streuprozesses wurde zuerst von Born u. Franck [13] betrachtet. Wegen der kurzen Stoßdauer erwarteten sie keine scharfe Quantelung, sondern ein kontinuierliches Spektrum. Landau [14] forderte dies als quasiklassischen Anteil. Nach Finkelburg u. Peters [15] wäre das Spektrum der Quasimoleküle primär kontinuierlich durch freie Anfangs- oder Endzustände, wenn man die Energieänderung durch Stoßprozesse entsprechend Geschwindigkeitsverteilung und Stoßparameter berücksichtigt. Bei allen Stoßvorgängen erfordert die Berechnung der Dipolmomente Korrekturen durch Umgruppierung von Elektronen infolge des entstehenden Feldes, worauf schon Fock [16] hinwies. Es sind also deformierbare Medien vorzusehen. Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Quasimolekülbildung zum TEMF beiträgt.

### 8. Thermische Energie im Festkörper

Betrachtet man die Atome des Kristallgitter als gekoppelte Pendel, so setzt sich eine Schwingung von einem Ende zum anderen fort. Das Kristallgitter sollte eine unendlich große Wärmeleitfähigkeit haben, denn jede Schwingungsenergie durchläuft den gesamten Kristall. Das Experiment ergibt das aber nicht, sieht man von extrem tiefen Temperaturen ab. Für die Gitter-Wärmeleitfähigkeit wird eine  $1/T$ -Abhängigkeit gemessen, je höher die Temperatur, desto niedriger wird die Temperaturleitfähigkeit.

Zur Erklärung. führte Peierls [17] den Umklapp-Prozeß ein, wo nach einer Weglänge der fortschreitende Schwingungsprozeß unterbrochen wird. Wird die Energie wie beim gekoppelten Pendel weitergegeben, so ist das der Normalprozeß. Beim U-Prozeß wird die Schwingungsenergie nicht in gleicher Richtung weitergegeben, sondern sie läuft wieder zurück, wenn der nachfolgende Baustein durch seine augenblickliche Stellung die Energieweitergabe im bisherigen Rhythmus verhindert. Die Schwingungsenergie wird an dieser Stelle kurzzeitig gespeichert und anschließend zurückgegeben. An dieser Stelle ist eine besondere Gelegenheit für die Entstehung eines TEMF vorhanden, das sich von dem der Normal-Prozesse unterscheidet, denn hier ist eine zusätzliche Dipolbildung möglich. Mit zunehmender Temperatur nehmen die U-Prozesse zu, und so könnte auch das TEMF zunehmen.

Als Phonon-Polarisationen diskutierten dies Merten [18], Claus [19] oder Merten, Claus u. Brandmüller [20], mit anharmonischen Kräften Maradudin [21] und als Streuung der Phononen Schober [22].

Schon lange unterscheidet man akustische und optische Gitterschwingungen. Die optischen Gitterschwingungen bewirken Dipolmomente, die periodisch zur Verfügung stehen und schon überall berücksichtigt werden. Bei akustischen Gitterschwingungen werden keine oder nur sehr kleine Dipolmomente erwartet. Aber bei angeregten Schwingungen kann der Prozeß, analog der Quasimolekülbildung bei den Richtungsänderungen im Normal- oder U-Prozeß eine Rolle spielen. Im Rhythmus der Schwingungen wird bei den einzelnen Bausteinen in harmonischer Näherung eine Trennung der Schwerpunkte von Kern- und Elektronenhülle auftreten. Atomkern und Elektronenhülle schwingen dann mit ungleicher Amplitude oder phasenverschoben. In jedem Fall entstehen Dipolmomente. Auf diesen Effekt könnte man die Absorption von Licht der Frequenz der Gitterschwingungen z. B. bei Germanium zurückführen, denn in rein homöopolaren Kristallen ist sonst keine Absorption durch Gitterschwingungen zu erwarten.

Nach Renk [23] können Defekte Gitterschwingungen infrarot-aktiv machen. Schuller [24] beobachtete besonders den Oberflächeneinfluß als Phonon-Polaritonen.

Generell bringt eine thermische Emission Abkühlung. Gezielt wird das als Laserkühlung eingesetzt, worüber Cohen-Tannoudji [25] berichtete. Dabei wird entweder durch passenden Rückstoß entgegen der Bewegungsrichtung der thermischen Geschwindigkeit des Atoms versucht diese auf null zu bringen oder durch stimulierte Raman-Emission dem Atom Energie zu entziehen.

Formal oder real werden hier Prozesse beschrieben, die zum TEMF beitragen können. Bei hohen Temperaturen verlieren Gitterschwingungen in der Form von Kollektivschwingungen zunehmend an Bedeutung, die Gitterbausteine schwingen zunehmend unabhängig von einander, womit sich die Strahlung der des schwarzen Strahlers nähert.

## 9. Kontinuierliche Strahlung durch das TEMF

Werden durch thermische Anregung Spektrallinien emittiert, so ist das sicher auch eine Folge des TEMF, wobei aber jeweils nur eine Dipolart die Emission bewirkt. Das Spektrum der Temperaturstrahlung ist aber kontinuierlich.

Ein schwarzer Körper läßt sich durch einen im thermischen Gleichgewicht befindlichen Hohlraum mit einem kleinen Loch näherungsweise realisieren. Es zeigte sich, daß die Beschaffenheit der Wände des Hohlraumes, schwarze oder spiegelnde Wände, eine untergeordnete Rolle spielen. Es kommt also darauf an, einen Hohlraum im thermischen Gleichgewicht zu halten, das kleine Loch verhindert, daß das thermische Gleichgewicht merklich gemindert wird. Daher wird die schwarze Strahlung auch als Hohlraumstrahlung bezeichnet, wenn auch damit kein Hinweis auf die Entstehungsart gegeben wird.

Hier ist noch die Sonolumineszenz zu erwähnen, über die Grum u. Roy [26] berichteten. Es wird dabei keine direkte Anregung durch Ultraschall angenommen, sondern er bringt Gasbläschen zum Platzen, wodurch 50 ps Lichtblitze entstehen. Das Spektrum liegt im sichtbaren Bereich, es gibt keine speziellen Sonolumineszenz-Frequenzen.

Bei der stimulierten Emission trifft ein Photon auf ein im Stadium der Sammelemission befindliches Atom, wo dies die synchrone Energieabgabe auslösen kann. Dies wäre ähnlich auch auf die schwarze Strahlung übertragbar, als stimulierte Kontinuum-Emission, natürlich wird dieser Fall seltener auftreten als in einem Laser. Trifft also die Strahlung auf eine Wand des Hohlraumes, so kann diese Energie dort genutzt werden, entweder die durch thermische Stöße entstehenden Verluste zu ergänzen oder ein fast fertiges Photon durch stimulierte Emission auszulösen. Auf dieses Modell weisen die Ergebnisse von Hanbury-Brown u. Twiss [27] bei thermischen Quellen, wo die Photonen teilweise nicht statistisch einzeln eintreffen, sondern auch in Rudeln oder Klumpen.

### 10. Versuch der Aufteilung der nicht-schwarzen Strahlung in Anteile

Planck [2] sah die Strahlung als gegeben an und umging so das TEMF. Nichtschwarze (auch als grau bezeichnete) Strahlung entsteht nach Planck, wenn die Dipollänge nicht klein gegen die Wellenlänge ist, die Dipole nicht im thermischen Gleichgewicht sind oder eine Kopplung der Dipole besteht. Zur Untersuchung der nicht-schwarzen Strahlung wird hier der Emissionsgrad  $\epsilon$  entsprechend den Vorstellungen des TEMF in Anteile aufgespalten.

Die thermische Energie zur Erzeugung des TEMF kann kleiner sein oder eine andere Verteilung haben, als bei der Planckschen Strahlungsformel vorausgesetzt wird. So ergibt sich der Faktor

$$\epsilon_1 = W_T / W_{\text{Planck}} < 1. \quad (4)$$

Die Energieverteilung in der Materie entspricht der Boltzmann- oder der Fermi-Dirac-Statistik und ist verschieden von der Bose-Einstein-Statistik für Photonen. Für  $W_T$  sind also die für den betreffenden Fall gültige Thermodynamik einzusetzen. Nach Zukale [28] kann dies näherungsweise durch einen  $m$ -Faktor im Nenner des Exponenten der  $e$ -Funktion berücksichtigt werden: ( $\Delta E =$  Bandlücke)

$$\exp(\Delta E / m k T). \quad (5)$$

Hierzu geben auch spezifische Wärme und ähnliche Größen Berechnungsgrundlagen.

Die wirksame thermische Energie  $W_T$  kann bei ihren Bewegungen unterschiedliche elektromagnetische Dipolmomente erzeugen, also ein unterschiedliches TEMF als  $W_{\text{TEMF}}$  ergeben.

Es ist eine in der Mechanik bekannte Erscheinung, daß sich Schwingungen nur dann anregen oder aufschaukeln lassen, wenn diese in der Eigenschwingung oder in deren Nähe angeregt werden. Erst mit der Eigenfrequenz läßt sich der passende Energiebetrag die notwendige Zeit übertragen. So ergibt sich:

$$\epsilon_2 = W_{\text{TEMF}} / W_T < 1. \quad (6)$$

$\epsilon_2$  kann kleiner als 1 werden, wenn die Frequenz der Anregung durch das thermische Feld nicht mit der Frequenz der Dipole übereinstimmt, Schwingungen oder Stöße nicht voll mit einem Dipolmoment verbunden sind oder ein Ausgleich des Feldes durch bewegliche Ladungsträger nach Fock [16] stattfindet. Bewirkt z. B. die kinetische Energie kein TEMF und ist die potentielle Energie voll mit einem Dipolmoment verbunden, so wäre bei harmonischen Kräften  $\epsilon_2 = 1/2$ . Überwiegt die Zeit der kinetischen Energie (neutrale Gase bei niedrigem Druck), so wird  $\epsilon_2$  noch wesentlich kleiner. Für die optischen Gitterschwingungen ist ein  $\epsilon_2$  nahe 1 zu erwarten, während für die akustischen Gitterschwingungen  $\epsilon_2$  klein ist, aber ungleich null, da eine Quasimolekülbildung nicht ausgeschlossen ist.

Weiterhin muß die Energie  $W_{\text{TEMF}}$  nicht mit der maximal möglichen Energie  $W_{\text{Strahl}}$  abgestrahlt werden. Es ergibt sich der dritte Faktor:

$$\epsilon_3 = W_{\text{Strahl}} / W_{\text{TEMF}} \leq 1. \quad (7)$$

Über strahlungslose Übergänge, die hierzu notwendig sind, herrscht noch keine Klarheit. Oft wird der Auger-Prozeß hierfür verantwortlich gemacht. Für Festkörper referierte Haug [29] dieses Problem. Nach Nieke [8] ist ein Übergang immer dann strahlungslos, wenn nicht zwei entgegengerichtete elektromagnetische Teilwirbel zusammen mit der Energie  $h f$  als Photon entstehen können. Speziell für  $\epsilon_3$  ist das der Fall, wenn während der Zeit der Sammelemission die Anregung durch thermische Stöße vermindert wird. Im Hohlraum im thermischen Gleichgewicht sollte das ausgeglichen werden. Dem Faktor  $\epsilon_3$  würde nach Planck [2] eine Kopplung der Dipole entsprechen.

Nach allen Messungen des Emissionsgrades hat die Oberfläche der Probe einen großen Einfluß. So haben polierte Metalloberflächen einen kleinen Emissionsgrad, der bei rauhen oder oxidierten Oberflächen wesentlich größer ist. Jede Oberfläche bedeutet eine extrem starke Störung der Struktur jedes Festkörpers, denn die im Innern vorliegenden Bindungsverhältnisse sind in jedem Fall verändert. Der Einfluß der Oberfläche kann mit dem Faktor  $\varepsilon_3$  beschrieben werden, es kann aber auch zweckmäßig sein, durch einen gesonderten Faktor den Einfluß der Oberfläche zu kennzeichnen. Nur beim Hohlraum geht dieser Einfluß zurück, da hier der Energieverlust ausgeglichen wird.

Wenn die hier angenommene Kausalkette gültig ist, so wird die Strahlung der nicht-schwarzen Körper um den Faktor des Emissionsgrades kleiner als dem Planckschen Strahlungsgesetz entspricht:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 = W_{\text{Strahl}} / W_{\text{Planck}} \quad (8)$$

## 11. Ergebnisse

Eingangswurde die Frage gestellt: „Warum strahlen heiße Körper?“ Nach dieser Arbeit wäre die Frage so zu beantworten: Bei thermischer Bewegung werden auch Dipole gebildet. Diese Dipole erzeugen das TEMF. Hat sich lokal mit der Frequenz  $f$  die elektromagnetische Energie  $hf$  gesammelt, so wird ein Photon mit Struktur und Feld emittiert. Da diese Struktur der Photonen mit ihrer Periodizität auch die sog. Wellennatur des Lichtes ergibt, so entfällt beim Dualismus von Welle und Korpuskel die Welle und damit wird der Dualismus hinfällig. es bleibt das Korpuskel mit Struktur und Feld als Verschmelzung wie dies Einstein [6] forderte.

Literaturverzeichnis

- [1] M. J. Klein, in: A. P. French (Hrsg.), Albert Einstein - Wirkung und Nachwirkung. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1985, S. 232.  
Bezug: A. Einstein, Ideas and Opinions. Dell, New York 1954.
- [2] M. Planck, Die Ableitung der Strahlungsgesetze. Ostwald's Klassiker Nr. 206, Akad. Verlagsges. Leipzig 1923.  
M. Planck, Wärmestrahlung. Barth, Leipzig, 2. Aufl. 1913, 5. Aufl. 1923.
- [3] N. Bohr, Über die Quantentheorie der Linienspektren. Vieweg, Braunschweig 1923. Zitat S. 6.
- [4] T. S. Kuhn, Was sind wissenschaftliche Revolutionen? München 1982.
- [5] A. Einstein, Ann. Physik (IV) (1905) 132.
- [6] A. Einstein, Phys. Z. **18** (1917) 121.
- [7] T. S. Kuhn, Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Suhrkamp, Frankfurt M. 1973.  
The Structure of Scientific Revolutions. Chicago 1962, 1991.
- [8] H. Nieke, Newtons Beugungsexperimente und ihre Weiterführung. Arbeit 13.
- [9] Wie [8], Arbeit 12.
- [10] M. Born u. G. Huang, Dynamical Theory of Lattices. Oxford 1954.
- [11] R. T. Smith, In: T. R. Govers a. F. J. de Heer (Ed.): The physics of  $\alpha$ -electronic and atomic collisions. VII. ICPEAO Amsterdam 1971, Amsterdam a. London 1972, S. 1.
- [12] S. V. Bobashev, wie [11], S. 38.
- [13] M. Born u. J. Frank, Z. Physik **31** (1925) 411.
- [14] L. D. Landau, Phys. Z. Sowjetunion **1** (1932) 88; **2** (1932) 46.
- [15] W. Finkelburg u. Th. Peters, Handbuch der Physik XXVIII. Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1957, S. 79.
- [16] V. Fock, Z. Physik **61** (1939) 126.
- [17] R. Peierls, Ann. Physik (5) **3** (1929) 1055.
- [18] L. Merten, Festkörperprobleme XII (1972) 381.
- [19] R. Claus, Festkörperprobleme XII (1972) 445.
- [20] R. Claus, L. Merten u. J. Brandmüller, Springer Tracts mod. Phys. **75** (1975), Springer, Berlin.
- [21] A. A. Maradudin, in: Phonon Physics - a Survey. Ed. T. Paszkiewicz, Physics of Phonons. Lecture Notes of Physics, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1987, S. 1 - 47.
- [22] H. R. Schober, In: [21] S. 188 - 207.
- [23] K. F. Renk, Z. Physik **201**. (1967) 445.
- [24] E. Schuller, Die Dispersion  $\alpha$ -polarer Gitterwellen in halbbunendlichen Kristallen mit besonderer Berücksichtigung der Dämpfung. Dis. Univ. München 1976.
- [25] G. Cohen-Tannoudji, in: Ed. J. Dalibard u. a. : Fundamental Systems in Quantum Optics. Les Houches session LIII. North-Holland, Amsterdam 1992; Phys. Bl. **51** (1995) 91.
- [26] L. A. Crum a. P. A. Roy, Science **266** (1994)
- [27] R. Hanbury-Brown a. R. Q. Twiss, Proc. Roy. Soc. London **242** (1957) 300; **243** (1958) 291.
- [28] W. Zukale, Exper. Techn. Physik **24** (1976) 17.
- [29] A. Haug, Festkörperprobleme XII (1972) ,411.