

MÜNCHENER
UNIVERSITÄTSREDEN

NEUE FOLGE HEFT 34

Das Elektron der Physiker

von

Walter Rollwagen

MAX HUEBER VERLAG
MÜNCHEN

Münchener Universitätsreden

Neue Folge

- Heft 1: Michael Schmaus
Beharrung und Fortschritt im Christentum
Groß 8°. Mit einem Bild des Verfassers, 24 Seiten, geh. DM 1.50
- Heft 2: Bruno Huber
Das Prinzip der Mannigfaltigkeit in der belebten Natur
Groß 8°. 12 Seiten, geh. DM —,70
- Heft 3: Hugo Grau
**Gedanken über die gegenwärtige Sicht der Anatomie am
Beispiel des Nervensystems**
Groß 8°. Mit 4 Abbildungen, 20 Seiten, geh. DM 1.20
- Heft 4: Hans Nawiasky
Max von Seydel
Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.—
- Heft 5: Theodor Maunz
Toleranz und Parität im deutschen Staatsrecht
Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.—
- Heft 6: Aloys Wenzl
Immanuel Kants bleibende Bedeutung
Groß 8°. 12 Seiten, geh. DM —,80
- Heft 7: Karl von Frisch
Symbolik im Reich der Tiere
Groß 8°. 14 Seiten, geh. DM 1.—
- Heft 8: Alfred Marchionini
Die moderne Klinik innerhalb der universitas litterarum
Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.—
- Heft 9: Emil K. Frey
Chirurgie, Forschung und Leben
Groß 8°. 12 Seiten, geh. DM 1.—
- Heft 10: **Rede des Rektors Prof. Dr. Alfred Marchionini**
Ehrenpromotion von Prof. Dr. Pasteur Vallery-Radot
und
Rede des Herrn Professors Dr. Pasteur Vallery-Radot, Paris
Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.—
- Heft 11: Erich Valentin
Mozart in seiner und unserer Zeit
Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.—

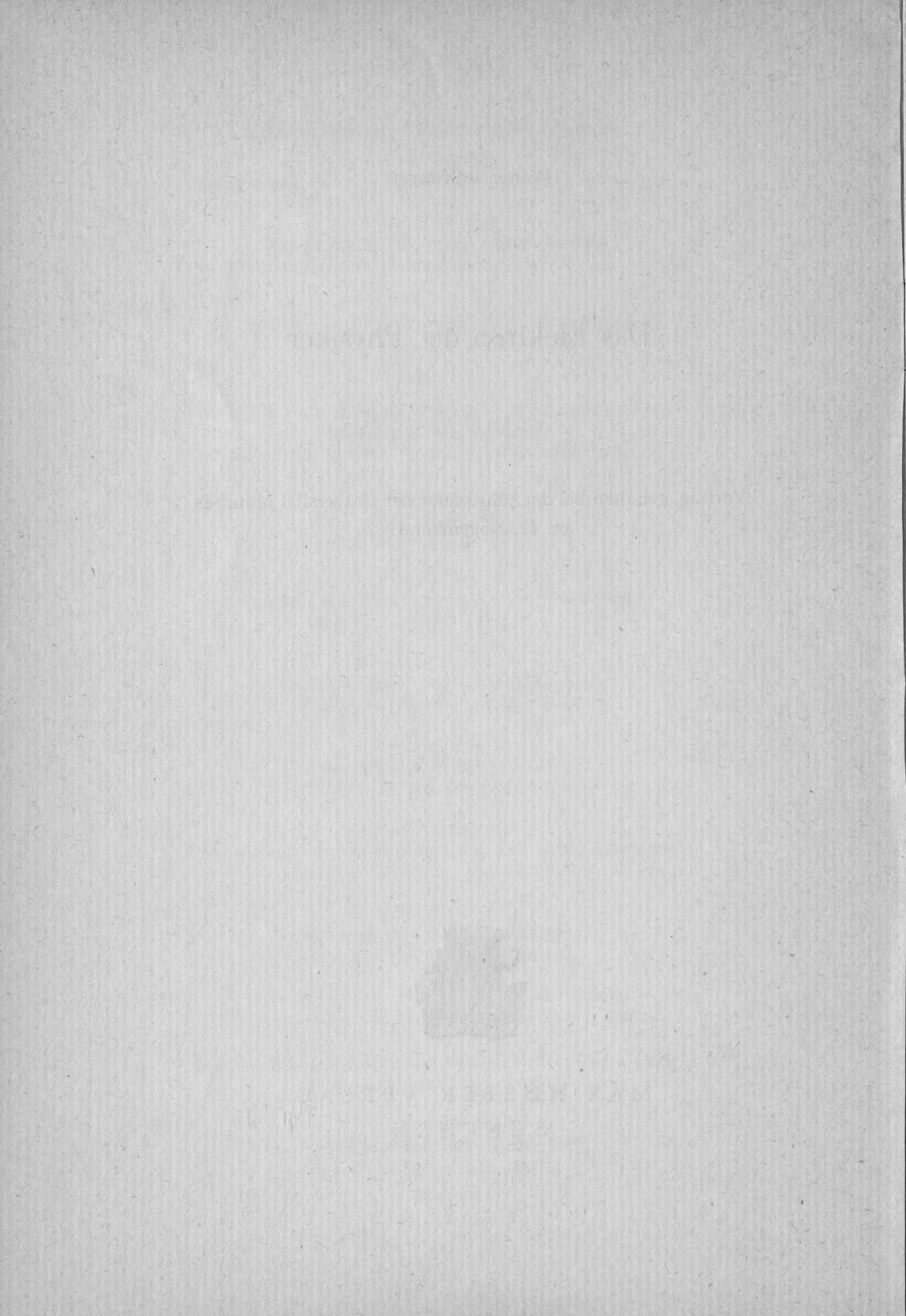
Walter Rollwagen

Das Elektron der Physiker

Vortrag, gehalten bei der Jahresfeier der Universität München
am 17. November 1962



MAX HUEBER VERLAG
MÜNCHEN



Wenn einem Physiker die ehrenvolle Aufgabe übertragen wird, in einer festlichen Stunde Gedanken darzustellen, die für die Art der physikalischen Forschung charakteristisch sind und die darüber hinaus zum Brückenschlag zwischen den zahlreichen Gruppen geistig geprägter Menschen verhelfen können, so steht er vor größeren Schwierigkeiten als die Vertreter anderer Fakultäten. Sie alle können sich bei einem Bericht aus ihrem Forschungsbereich auf Begriffe stützen, die lebensnah sind, lebensnah in dem Sinn, daß von ihnen unmittelbar Wege zur Gedankenwelt unseres täglichen Lebens, zu unseren Fragen und Sorgen und zu den glücklichen Augenblicken des Erkennens führen.

Diese Unmittelbarkeit ist der modernen Physik versagt, trotz ihrer schicksalbestimmenden Auswirkungen. Sie hat einen neuen Bereich unserer Existenz sichtbar gemacht und ausgeschöpft, an den wir nach der 2000-jährigen Wirksamkeit einer theologisch-philosophischen Geisteswelt herangeführt wurden. Dieses Neue fand schon 100 Jahre vor Galiläi etwa in Macchiavelli seinen ersten Ausdruck und hat sich in der 300-jährigen Entwicklung der Naturwissenschaft umfassend entfaltet. In unseren Hochschulen war diese Naturwissenschaft zunächst ein Fremdling. Heute steht sie gleichrangig neben den viel älteren geistigen Disziplinen. Man hat sich daran gewöhnt, daß sie als jüngstes Kind der Fakultäten durch ihr unermüdliches Fragen und durch ihr Hervorzaubern von zuweilen unbequem erscheinenden Fakten alle Glieder der Familie zu neuem Abwägen und Infragestellen von Vertrautem anregt. In den Zeugnissen berühmter Naturwissenschaftler und den Interpreten ihrer Arbeit spiegelt sich das Spannungsfeld dieser 300 Jahre Naturwissenschaft einsichtig wider: Von dem Erlebnis der Gnade, göttliche Gesetze zu erkennen und sie nachdenken zu dürfen bis zum glücklichen Gefühl geistiger Selbständigkeit, von der Freude an der Mannigfaltigkeit und Schönheit der Natur bis zu der Anerkennung einer mathematischen Abstraktion als einzige Wirklichkeit, vom Erkennen der uns mit der ratio geschenkten Kraft bis zum überheblichen Mißbrauch ihrer Macht. Diese so oft als Kronzeuge für den Säkularisierungsprozeß beschworene Naturwissenschaft soll nun in dieser Stunde vor uns lebendig werden.

Wir dürfen dabei nicht im Vordergründigen verharren, in der Freude am Einzelphänomen — so sehr wir Naturwissenschaftler hoffen, daß diese

weiterhin in der Welt jedes Menschen ein Heimatrecht behält — wir müssen bis zu Bereichen vorstoßen, die der Physik den Vorwurf des Unanschaulichen eingetragen haben und den Schuldspruch von der zerstörten Hoffnung auf ein geschlossenes Weltbild. Das kann nur unvollkommen gelingen, selbst wenn Sie mir die Bereitschaft Ihres Mitdenkens schenken. Aber im Raum der Universität sind wir ständig zu diesem Versuch aufgerufen, um den Prozeß des intellektuellen Bemühens in seiner Wirkung auf die Ganzheit unseres Lebens zu beleuchten.

Der Naturwissenschaftler wird sich bei einem derartigen Versuch an Phänomenen orientieren, die im Naturgeschehen erkennbar werden und die ihm ein verlässiger Kompaß auf seinem Weg zu deren geistiger Durchdringung und Verknüpfung sind. So entstand die Wahl unseres Themas: Das Elektron der Physiker.

Es zeichnen sich in der Geschichte der Erforschung des Elektrons, dieses Grundbausteins aller elektrischen Erscheinungen, deutlich einzelne Stufen ab, deren jede in ein breites Anwendungsgebiet führte. Diese Teilgebiete kommen jeweils mit einigen charakteristischen Eigenschaften aus dem vielschichtigen Erscheinungsbild des Elektrons aus und arbeiten deshalb mit Vorstellungen und Modellen, die diese Teilbereiche erschöpfend wiedergeben. So könnte man von einem Elektron der Chemiker sprechen, vom Elektron der Spektroskopiker, der Festkörperphysiker, vom Elektron der Hochfrequenztechnik. Hinter allen und alle umfassend steht das Elektron der Physiker, das in *allen* seinen Wirksamkeiten durch *ein* Gedankensystem erfaßt werden soll. Beginnen wir mit den Phänomenen; ich bitte Sie, mir für eine kurze Weile in die sachliche Welt des Laboratoriums zu folgen. Wir denken uns ein Glasrohr, ungefähr von den Dimensionen einer Fernsehröhre, im wesentlichen auch mit dem gleichen Aufbau im Inneren; also auf der einen Stirnfläche ein Fluoreszenzschirm, an der gegenüberliegenden Fläche zwischen zwei in das Glas eingeschmolzenen Metallstiften eine dünne Wolframdrahtwendel, ähnlich wie in einer elektrischen Glühbirne. Kurz vor der Wendel, dem Fluoreszenzschirm zugekehrt, schließt ein Metallblech, gleichfalls mit einer metallischen Verbindung nach außen, den ganzen Rohrquerschnitt ab; es hat genau in der Mittelachse des Rohres ein kleines Loch von ungefähr 1 mm Durchmesser. Das Glasrohr wird ausgepumpt und mit Quecksilber-Dampf von ca. $\frac{1}{10}$ Millionstel Atmosphäre Druck gefüllt. Legt man an die Lochblende eine positive Spannung von etwa 2000 Volt und heizt mit einem elektrischen Strom die Wolframdrahtwendel, dann beobachten wir ein bläuliches Leuchten im Rohr und auf dem Fluoreszenzschirm. Das Leuchten erfüllt den Raumbereich, der von den Verbindungslinien der Glühwendelränder zu dem Lochblendenrand eingeschlossen wird und reicht bis zum Fluoreszenzschirm. Durch geeignete Wahl der Glühfläche des Wolframdrahtes und der Geometrie der Anord-

nung kann man ein sehr schmales Lichtbündel, einen Leuchtstrahl, erzeugen, der in dem hell leuchtenden Auftreffpunkt auf dem Fluoreszenzschirm endet. Nun beginnen die Experimente mit dem Ziel, Eigenschaften dieser offensichtlich vom Glühdraht ausgehenden Strahlung kennen zu lernen und ein Modell zu entwerfen, aus dem alle diese Eigenschaften im Rahmen bekannter physikalischer Gesetze geschlossen werden können.

1. Wir nähern eine auf einige 100 Volt aufgeladene große Metallplatte; der Strahl wird abgelenkt.

2. Wir verfeinern diesen Versuch und bringen von der unserer aufgeladenen Metallplatte gegenüber liegenden Seite eine zweite geerdete Metallplatte, parallel zur ersten Platte, in Rohrnähe, so daß der leuchtende Strahl im Raum zwischen diesen Platten verläuft. Wir beobachten natürlich gleichfalls ein Ablenkung, stellen aber zusätzlich fest, daß der Leuchtstrahl genau die Krümmung einer Parabel annimmt, wie ein fallender Stein, den wir waagrecht abgeworfen haben.

3. Wir nähern dem Rohr einen Magneten. Der Strahl wird abgelenkt. Die Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse fällt dem Fachmann nicht schwer: Wir haben den Strahl in ein elektrisches, dann in ein magnetisches Feld gebracht. Aus der Tatsache der Ablenkung und deren Richtung folgt: Der Strahl muß in Strahlrichtung bewegte negative elektrische Ladung enthalten.

4. Versuch: Wir pumpen das Rohr auf höchstes Vakuum aus. Der Leuchtstrahl verschwindet. Der Leuchtpunkt am Fluoreszenzschirm aber bleibt erhalten und zeigt bei der Wiederholung der vorangegangenen drei Versuche die gleiche Verschiebung. Der Transportweg der Ladungen ist also nicht an die Anwesenheit von Gasmolekülen gebunden. Läßt man anstelle von Quecksilber andere Gase einströmen, so ändert sich lediglich die Farbe der Leuchterscheinung. Wir erinnern uns an das Bild vom fallenden Stein. Dieser Vergleich sollte uns vor Augen führen, daß offensichtlich der ganze Erfahrungsschatz der Mechanik für das Modell dieser Strahlen herangezogen werden konnte. So wurde in systematischer, immer am Experiment orientierter 45-jähriger Forschungsarbeit das erste Modell vom Elektron, dem Atom der Elektrizität, geschaffen.

Man kennzeichnete es um das Jahr 1915 etwa folgendermaßen: Das Elektron ist ein Teilchen, das wir hinsichtlich seines Verhaltens wie eine Punktmasse behandeln dürfen, ca. 1840 mal leichter als das Wasserstoffatom, mit einer immer gleich großen, negativen Ladung. Dieses Elektron war der Schlüssel zum Verständnis vieler elektrischer Phänomene. Es bestimmt z. B. die Gesetze der Stromleitung in Flüssigkeiten ebenso wie die Erscheinungen des Stromtransportes in Gasen und festen Körpern.

Entscheidend für die weitere Forschung wurde die Feststellung, daß dieses gleiche Elektron der einzige Baustein der Atomhülle ist. Man stellte sich um diese Zeit das Atom so vor, daß die negativ geladenen Elektronen den positiven Kern des Atoms umkreisen. Inzwischen hatte aber die experimentelle Quantenphysik zwingend zeigen können, daß ihre neuartigen Gesetzmäßigkeiten bei dem Geschehen im Atom eine wichtige Rolle spielen müssen. Das Atom nahm nur ganz bestimmte, diskrete Energiebeträge auf und strahlte sie bei der Rückkehr in den Ausgangszustand in Form eines Lichtquants $h\nu$ wieder aus. h ist die Plancksche Konstante, ν die Frequenz des Lichtes. Niels Bohr entwickelte 1913 das klassische Modell des Atoms weiter. Die neuen Kenntnisse wurden in Form von Regeln, die das Modell zu befolgen hatte, eingebaut. Damit fand die Quantenphysik zunächst in einer kabbalistischen Form ihren Platz, wie es Sommerfeld treffend formulierte. Die Elektronen durften nur auf bestimmten, ausgezeichneten Bahnen kreisen. Sie durften, allen damaligen Erfahrungen der Physiker zuwider, bei diesen zugelassenen Kreisbewegungen keine Energie in Form von Licht abstrahlen, wohl aber wenn sie aufgrund einer Störung von außen oder auch spontan von einer Bahn auf eine andere überwechselten. Aber auch hier war die Auswahl durch Regeln eingeschränkt. Mit diesen geheimnisvollen Zusatzbedingungen erschloß das von Sommerfeld zum Planetenmodell erweiterte Atommodell die ganze Systematik der Lichtaussendung von Atomen, ein Erfolg, der aufbauend auf die genialen Gedanken von Bohr im wesentlichen von Sommerfeld und seiner Schule in den Jahren um 1920 erarbeitet wurde.

Damit verschaffte sich ein ganz ungewohntes Element in der physikalischen Gedankenwelt ein Hausrecht: Diese Regeln, die wie Zauberformeln Altbewährtes außer Kraft setzen, bei deren Berücksichtigung aber im übrigen die klassischen Gesetze eine erstaunliche Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ergaben! Das konnte kein Zufall sein. Dem Forscher stellte sich gebieterisch die Aufgabe, diesem Neuen, was mit dem Planckschen Wirkungsquantum in die atomaren Bereiche physikalischen Geschehens einbrach, seinen geheimnisvollen Charakter zu nehmen und die Physik wieder zu einem System von Gesetzen und Erscheinungen einer einheitlichen Kategorie umzubauen.

Ganz ohne Eingriff in das Punktmodell des Elektrons war es aber auch in dieser bisher skizzierten Phase der Erforschung der Atomhülle nicht abgegangen. Man mußte dem Elektron eine neue Eigenschaft zusprechen, um die Mannigfaltigkeit der Spektrallinien voll darstellen zu können. Das Elektron sollte wie ein kleiner Kreisel einen mechanischen Drehimpuls haben, der auch eine magnetische Wirkung, ein magnetisches Moment, bedingte. Die Annahme wurde in Experimenten, unabhängig von der Spektroskopie, erhärtet und endgültig mit der Bezeichnung Spin den Eigenschaften des Elektrons zu-

erkannt. Entscheidend waren dafür die Versuche von Stern und Gerlach. Damit meldete sich nun dringlicher als bisher die Frage nach der Gestalt des Elektrons. Ist es eine kugelförmig verteilte Ladung, die wie die Erde um ihre Achse rotiert? Wie wird aber dann die Ladung zusammengehalten? Wie können wir den Spin deuten, wenn wir vielleicht in diesen Dimensionen von ungefähr dem millionsten Teil eines millionstel Millimeters nicht mehr nach Ausdehnung und Gestalt fragen dürfen?

Fragen und experimentelle Ergebnisse, die sich wie alle quantenphysikalischen Erscheinungen jeder dem damaligen Kenntnisstand entsprechenden Deutung entzogen. Es ging darum in dieser Situation nicht mehr um Ausbau und Verfeinerung von Bekanntem. Hier konnte nur mehr ein neuer Ansatz, der zu grundlegenden Aussagen führte, weiterhelfen. Ausgangspunkt mußte natürlich die Quantenphysik sein. Ihr erstaunlichstes Ergebnis war die Feststellung, daß Licht nicht nur Welleneigenschaften, sondern auch korpuskulare Eigenschaften hat.

Diesen neuen Ansatz wagte de Broglie mit der kühnen Frage, ob nicht auch umgekehrt Teilchenströme, also Elektronen oder Atome, Wellenaspekte zeigen. In den mathematischen Beziehungen, mit denen die Gesetze der klassischen Dynamik in konzentrierter und allgemeinsten Form erfaßt wurden, in der sog. Hamiltonmechanik, spielt die Wellenstruktur eine entscheidende Rolle. Es war auch eine schon von Hamilton selbst erkannte Analogie zur geometrischen Optik, also zur Strahlvorstellung des Lichtes, in dieser mathematischen Abstraktion enthalten. Bis dahin sah aber niemand die Möglichkeit, daß sich in dieser mathematischen Abstraktion eine physikalische Wirklichkeit verbergen könnte, sondern man glaubte nur eine besonders bequeme und umfassende mathematische Erfassung aller nur möglichen Teilchenbahnen bei mechanischen Abläufen vor sich zu haben. Die an die Hamiltonmechanik anknüpfenden theoretischen Untersuchungen des damals 34-jährigen de Broglie gipfelten 1924 in der These: jede Teilchenbewegung ist mit einem Wellenphänomen verknüpft.

Zur Berechnung der entsprechenden Wellenlänge mußte für eine in dieser Theorie auftretende Konstante vom Charakter einer Wirkung ein bestimmter Zahlenwert eingesetzt werden. Es war verlockend, dafür die Planck'sche Konstante, die ja die Dimension einer Wirkung hat, zu wählen. Damit ergaben sich für Elektronen mittlerer kinetischer Energie Wellenlängen von rund $\frac{1}{10}$ von $\frac{1}{\text{millionstel}}$ mm, also die Größenordnung von Röntgenwellen. Im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen, bei denen diese Wellen eindeutig elektromagnetische Wellen sind, also dem physikalischen Charakter nach dem Licht gleichwertig, gibt der Formalismus keine Auskunft über die Art dieser neuen Wellen. Entscheidend war, ob dieses theoretisch postulierte Wellenphänomen experi-

mentell beobachtbar war. Für den Experimentator ist das experimentum crucis für Wellencharakter das Auftreten von sogenannten Interferenzerscheinungen. Wir können derartige Erscheinungen leicht selbst beobachten. Wenn Sie z. B. durch das feine Gittergewebe eines aufgespannten Regenschirms gegen eine Lichtquelle blicken, so erscheint diese Lichtquelle in ein System von kleinen, farbig begrenzten Leuchtflecken aufgelöst.

Man erinnerte sich aufgrund der These von de Broglie an ein Jahr zurückliegende Experimente, bei denen Elektronen an Platin-Oberflächen reflektiert wurden; dabei ergaben sich selektive Erscheinungen, die einen Zusammenhang mit den Wellenphänomenen nahelegten. Die Fortführung dieser Untersuchungen an Nickel-Kristallen bestätigte mit größter Präzision die de Broglie-Werte für diese Wellen, die unter dem Namen Materiewellen in die physikalische Begriffswelt eingegangen sind.

Wir können nun das Elektron nicht mehr mit den Worten charakterisieren: es ist ein Teilchen, das wir wie eine Punkt-Masse behandeln dürfen.

Wir können zwar weiterhin die Masse und Ladung des Elektrons angeben, im übrigen aber nur über das Verhalten des Elektrons etwas aussagen: Das Elektron verhält sich entweder wie eine Korpuskel oder wie eine Welle; die Art des Verhaltens ist eindeutig durch die Versuchsanordnung bestimmt. Dieser Dualismus ist also nicht der Ausdruck einer Willkür, sondern entspricht zwei Wirkungsformen, die beide zur Existenz des Elektrons gehören. Als charakteristisch für das Verhalten des Elektrons ist außerdem der Spin und das magnetische Moment zu nennen.

Mit diesen Elektronen kann man im Experiment sicher arbeiten, da man es immer nur mit dem einen oder dem anderen Aspekt zu tun hat, also mit einem Verhalten, das aus der klassischen Physik jeweils wohl vertraut ist.

Wir wollen uns das anhand einiger Beispiele vergegenwärtigen: Denken Sie an Radio und Fernsehen! Alle Vorgänge in Sender und Empfänger sind gesteuerte Bewegungen von Elektronen, ganz gleich, ob es sich um Elektronen im Glaskolben der Verstärkerröhren handelt oder in den nur mehr Stecknadelkopf großen festen Stoffen, die diese Röhren ersetzen. Die Draperien der Nordlichter werden verstanden als Leuchtzeichen der Elektronen, die von der Sonne kommend im Magnetfeld der Erde ihre Bahnen beschreiben und dabei in der hohen Atmosphäre Atome zur Lichtaussendung anregen. Oder erinnern wir uns an das Elektronenmikroskop, dieses Instrument, das anstelle von Licht Elektronen zur Abbildung von Objekten benutzt. Die Bilder zeigen noch Details, die im Objekt weniger als ein Millionstel Millimeter voneinander entfernt sind. D. h. man müßte das Bild eines Objektes von 1 qmm Fläche in einer Vergrößerung auf das Format 400 x 400 Meter im Abstand von 25 cm Stelle für Stelle betrachten, um mit bloßem Auge die vom Elektronen-

mikroskop vermittelte Bildinformation zu erhalten. Dieses Gerät macht das einzelne Virus genau so sichtbar wie die Atomketten, die einen Kristall aufbauen. Die Elektronenoptik ist zu einer eigenen Wissenschaft geworden, die z. B. mit Materiewellen die klassischen Erscheinungen der optischen Interferenzen wiederholt und mit dieser Experimentierkunst sogar neue Anregungen für eine weitere physikalische Vertiefung formaler Überlegungen ermöglicht. Es bedarf wohl keiner weiteren Beispiele, um davon überzeugt zu sein, daß man mit diesen Elektronen wie wir sie bisher kennen gelernt haben, arbeiten kann. Das ist aber nicht das eigentliche Ziel physikalischer Forschung.

Für ein in sich geschlossenes physikalisches System ist dieser Zustand eines Nebeneinander von Welle und Korpuskel untragbar. Es erscheint mir eine der großartigsten Leistungen in der Geschichte der theoretischen Physik zu sein, daß es gelungen ist, in sich geschlossene mathematische Systeme zu finden, die dieses dualistische Verhalten abbilden. Diese Systeme enthalten als Grenzfall die gesamte klassische Physik und haben unsere Kenntnisse von den physikalischen Phänomenen in den Rang von Erkenntnissen gehoben.

Wir haben bei der Postulierung der Materiewellen durch de Broglie gesehen, wie das Modelldenken versagte, wie aber aus dem geistigen Zusammenführen von Phänomenen mit analogen mathematischen Strukturen auf einer abstrakteren Ebene Hinweise auf neue Phänomene im Raum der Fakten erwachsen. Dieser Prozeß in aller Konsequenz weitergeführt, machte schließlich die den Gesamtbereich der Physik durchgängig beherrschenden Prinzipien zum Ausgangspunkt theoretischer Überlegungen. Dazu gehören z. B. die Erhaltungssätze für Energie und Impuls, der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung, die Erfüllung des Relativitätsprinzips, der Einbau des Dualismus und die dadurch bedingte Indeterminiertheit unserer Aussage im Raum der Vorstellung.

Für alle Forderungen dieser Art lassen sich entsprechende mathematische Strukturen angeben. An die Stelle der mathematischen Nachbildung anschaulicher Mechanismen ist also die Konstruktion mathematischer Funktionen getreten, die durchgängige Prinzipien der Physik abbilden. Zur Durchführung dieser Theorien ist allerdings eine derart virtuose Beherrschung der mathematischen Methoden vorausgesetzt, daß es auch innerhalb der Physiker nur einer kleinen Gruppe möglich ist, mit schöpferischen Leistungen in dieser Richtung tätig zu werden.

Was ist im Zuge dieser Entwicklung aus dem Elektron geworden? Die Stufen der Entwicklung bis zum heutigen Stand kennzeichnen die grundlegenden Arbeiten der Quantentheorie von Schrödinger und Heisenberg und darauf aufbauend die Dirac-Theorie des Elektrons und die Quantenelektrodynamik. Im ersten Schritt lieferte die mathematische Struktur drei der vier charakte-

ristischen Zahlen, der sogenannten Quantenzahlen, die das Verhalten des Elektrons in der Atomhülle fixieren. Die Forderung der relativistischen Invarianz erfüllte im zweiten Schritt die Dirac'sche Theorie. Das von Dirac konstruierte Gleichungssystem entsprach den bis dahin bekannten experimentellen Ergebnissen mit erstaunlicher Präzision. Insbesondere enthält es die Spin-Eigenschaften des Elektrons, natürlich ohne irgendwelche speziellen modellmäßigen Annahmen, aber auch mit der Theorie notwendig verbundene physikalisch zunächst unverständliche Zustände negativer Energie. Nachdem dieser neue Ansatz entscheidende Fragen mit bis dahin unerreichter Exaktheit beantwortete, prüfte Dirac dieses merkwürdige Verhalten auf die Möglichkeit, ihm eine physikalische Wirklichkeit zuzuordnen und auf die Voraussetzung, unter welchen Bedingungen sie experimentell beobachtbar sein müßte. Er postulierte die Existenz des sog. Positrons, eines Teilchens genau mit den Eigenschaften des Elektrons, nur mit positiver Ladung.

Vier Jahre später, 1933, war das neue Teilchen experimentell bestätigt. Z. B. bei Durchstrahlung einer dünnen Bleiplatte mit Gammastrahlen hinreichender Energie — das sind sehr kurzwellige Strahlen — emittiert die Folie Elektron-Positron-Paare, die in der Nebelkammer als feine Spuren sichtbar sind. Umgekehrt kann ein Positron beim Zusammenstoß mit einem Elektron in 2 Gammaquanten zerfallen, die zur gleichen Zeit in entgegengesetzter Richtung emittiert werden.

Paarbildung und Vernichtungsstrahlung heißen die Begriffe, die dieses Verhalten charakterisieren. Damit ist in die Erscheinung des Dualismus Welle — Korpuskel ein neuer Aspekt hineingetragen, die Möglichkeit der Umwandlung, die Umwandlung elementarer Energiestrukturen ineinander. Die Elektronen haben damit ihre Individualität verloren, sie können aus energiereicher Wellenstrahlung entstehen und wieder in eine solche zurückverwandelt werden. Für den letzten Schritt, über den wir hier berichten können, hat wieder das Experiment die Führung übernommen. Mit einer Experimentiertechnik, die auf Grund der im zweiten Weltkrieg mit der Radarmethode gesammelten Erfahrungen entwickelt werden konnte, zeigte Lamb im Jahre 1950, daß im Spektrum des Wasserstoffs eine Linie, die nach der Dirac-Theorie einfach sein sollte, in zwei ganz nahe beieinander liegende Linien aufspaltet. Die Quantenelektrodynamik kann dieses Ergebnis deuten und mit hoher Genauigkeit berechnen. Sie berücksichtigt dazu die Wechselwirkung des Elektrons mit dem umgebenden quantisierten Feld, insbesondere auch mit seinem eigenen Feld. Wir wissen, daß jede Ladung in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld aufbaut; Ladung und Feld sind untrennbar miteinander verbunden. Die Quantenphysik fordert eine Wechselwirkung zwischen dem Elektron und seinem Feld. Diese Wechselwirkung erfolgt über den Austausch von Lichtquan-

ten. Das wird mit dieser Theorie quantitativ erfaßt. Zu der von Lamb beobachteten Linienverschiebung tragen z. B. folgende Vorgänge bei:

Das Elektron wird zwischen Emission und Wiedereinfang eines Lichtquants im Coulomb-Feld des Wasserstoffkerns gestreut oder das Elektron absorbiert ein Quant, das bei der Vernichtung eines im Kernfeld gebildeten unbeobachtbar kurzlebigen Elektron-Positron-Paares entstand. Diese Wechselwirkungen machen sich in der beobachteten Linienaufspaltung bemerkbar.

Damit ist erwiesen, daß wir uns das Elektron überhaupt nicht als etwas in sich abgeschlossenes vorstellen dürfen, sondern daß dieses Gebilde Ladung und Feld, welches sich uns nach außen als Elektron dokumentiert, eigentlich ein Vorgang ist. Dieser Vorgang besteht in einer ständigen Wechselwirkung des Elektrons mit seinem Eigenfeld.

Die das Gesamtverhalten des Elektrons abbildende Theorie ist heute keineswegs abgeschlossen. Die experimentell bestätigten Erscheinungen sind fester Besitz. Mit dem weiteren Ausbau der Theorie und der experimentellen Möglichkeiten hoffen wir auf noch umfassendere Aussagen und damit auf ein immer tiefer gehendes Verständnis für unsere physikalische Welt.

Welche Bedeutung der Erforschung des Phänomens Elektron im Rahmen der Gesamtphysik zukommt, mögen Sie daran ermessen, daß 20% aller Nobelpreise für Physik für Verdienste auf dem Gebiet der Elektronenforschung verliehen wurden. In einem historischen Abriß hätte eine verwirrende Zahl von Forschern genannt werden müssen, um den geistigen Leistungen aller Beteiligten gerecht zu werden. Wir haben heute die historische Darstellung ausgeklammert.

In einer abschließenden Betrachtung versuchen wir einige Gedanken anklingen zu lassen, die uns bei dem Versuch einer Einordnung unserer Betrachtungsart in unsere tägliche Welt bewußt werden.

Es stellt sich die Frage: Was wollen die Physiker überhaupt? Sie wollen den Teil der Welt verstehen, der sich einer bestimmten Kategorie des Fragens erschließt, dem Fragen nach quantitativen Zusammenhängen. Diese Art des Fragens schließt in der Antwort das Hervortreten einer individuellen Meinung aus. Zum Verständnis eines Ergebnisses der Naturwissenschaft ist es gleichgültig, wer dieses Ergebnis gefunden und formuliert hat. Lassen Sie es mich an einem Beispiel erklären. Der Schritt, der zur Postulierung der Materiewellen führte, war die Folge eines Aktes höchster Spiritualität. Nach der Bestätigung aber war dieses Phänomen in seiner ganzen experimentellen Wirksamkeit für jeden manipulierbar, der sein wissenschaftliches Handwerk ordentlich gelernt hat. Der Weg zur richtigen Verwendung eines Ergebnisses ist mit seiner ersten Formulierung frei. Der Nachdruck liegt dabei auf dem Wort richtig. Das gilt nicht in gleicher Weise für andere Wissenschaften. Das Ergebnis eines philosophischen Denkprozesses erschließt sich in adäquater geistiger

Struktur nur dem Kenner, ja wohl nur demjenigen, dessen eigene geistige Struktur weitgehend verwandt ist. Wenn ein solches Ergebnis über diesen sehr begrenzten Kreis hinaus wirksam wird, dann nimmt es das gesamte Gefälle bis zum Schlagwort und zur Ideologie in Kauf. In dieser Breiten-Wirkung der richtigen Anwendung naturwissenschaftlicher Gesetze liegt der Grund für das rasche Voranschreiten dieser Wissenschaft und der immer fühlbarer werdende Abstand von ihrer geistigen Verarbeitung.

Wir wollen weiter fragen: Was lehren uns die Ergebnisse dieser Art des Forschens? Es scheint sich zu bestätigen, daß es möglich sein sollte aus einem einzigen mathematischen System die gesamten quantitativen Zusammenhänge der Physik abzuleiten. Es ist jedenfalls sicher, daß die in diesem System verarbeiteten Grundgedanken die mathematische Abbildung durchgängiger Prinzipien nach Art der Erhaltungssätze der Physik sind, also keinerlei anschauliche Modelle, deren Mechanismus mathematisch nachgebildet wird. Die Physik wird wie jede Wissenschaft von der Hoffnung getragen, daß ihre Denkobjekte durch Systematisieren und Abstrahieren auf eine beschränkte Zahl von Begriffen zurückgeführt werden können, und daß die Analyse des Wirkungsfeldes dieser Begriffe eine Ordnung erkennbar macht, deren Aussagekraft die Summenwirkung der Einzelercheinungen übersteigt. Jede Wissenschaft lebt von der Überzeugung, daß geistige Ordnungen existieren, die zu erkennen der wissenschaftlichen Methode möglich ist. Für die Naturwissenschaft scheint mir der Beweis für die Berechtigung dieser Haltung erbracht. Sie lehrt uns dabei sehr eindringlich, daß auch in ihrem Bereich die Ordnung eine geistige Ordnung ist. Um diese Ordnung mitteilbar zu machen, genügt die Begriffswelt unserer Vorstellungen nicht. Die Kraft geistiger Aussage geht weit über den Bereich der Vorstellung hinaus. In der Naturwissenschaft hilft uns die Mathematik jede Stufe geistigen Emporsteigens eindeutig zu formulieren und gleichzeitig an die Grenzen ihrer Aussagemöglichkeit heranzuführen.

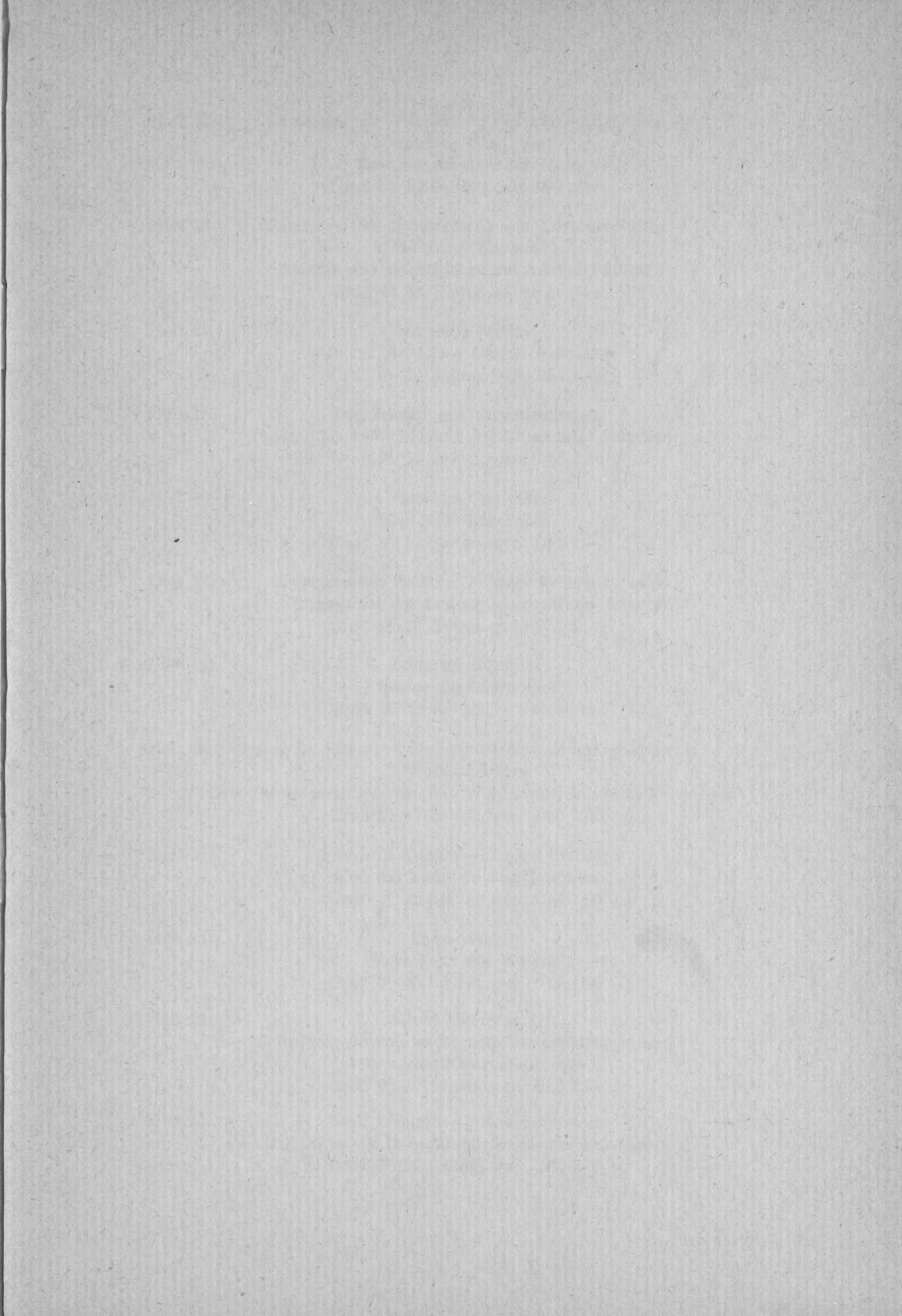
Besonders bedeutungsvoll erscheint die Erkenntnis, daß die physikalische Ordnung vom dualistischen Prinzip geprägt ist. D. h.: zur geistigen Fixierung des physikalischen Phänomens in seiner Ganzheit gehören Begriffspaare, die im Experiment nicht gleichzeitig wirksam werden können. Solche Begriffspaare heißen „zueinander komplementär“. Wir erinnern uns in diesem Zusammenhang an unsere Betrachtungen über das Elektron: es wirkt als Welle oder Korpuskel. Diese Situation weckt das Verlangen Gedanken nachzugehen die über den Bereich der Physik hinausweisen. Ist das Komplementaritätsprinzip auf die Physik beschränkt oder gibt es auch in den Bereichen anderer Wissenschaften komplementäre Begriffspaare? Diese von Niels Bohr aufgeworfene Frage hat in vielen Bereichen Resonanz gefunden, ohne daß man bisher sagen könnte, ob diese Frage eindeutig zu beantworten ist. Besonders

folgenreich wäre es, wenn die oft diskutierten Begriffspaare Physis und Psyche sowie Wissen und Glauben komplementären Charakter trügen. Komplementär heißt nicht, daß wir bei der Analyse des einen Aspektes den zweiten Aspekt nur beiseite schieben, es heißt vielmehr, daß er in diesem Akt der Analyse überhaupt nicht existiert. Damit wollen wir sagen, daß diese beiden Aspekte nicht nebeneinander bestehen, sondern daß aus der Gesamtexistenz des Phänomens durch die Art der Analyse eine Wirksamkeit in der einen oder anderen Form erst aktualisiert wird. Wenn der Komplementaritätsbegriff über die Physik hinausweist, müßten die betroffenen Wissenschaften einen eigenen Kalkül zur Formulierung ihrer Gesetze finden. Nur so könnte die Zusammenführung komplementärer Aspekte in einem gemeinsamen System neue Erkenntnisstufen sichtbar machen.

Die gemeinsamen Überlegungen von Geisteswissenschaftlern und Naturwissenschaftlern greifen aber heute schon über dieses Problem der Komplementarität hinaus. Ich möchte hier an die Untersuchungen des Psychologen Jung und des Physikers Pauli erinnern, die in einem Band*) „Naturerklärung und Psyche“ dargestellt sind. Pauli stellt dort fest, daß der Begriff archetypisch bei Kepler sich weitgehend deckt mit dem von Jung eingeführten Begriff Archetypen: „als Instinkte des Vorstellens funktionierende urtümliche Bilder“. Hier werden Gedanken neu lebendig, die auf Plato zurückgehen. Es scheinen außerdem über den physikalischen Feldbegriff Beziehungen zu dem Begriff des Unbewußten denkbar, die für die Biophysik ebenso bedeutungsvoll werden können, wie für die Psychologie. Vielleicht nimmt unsere Seele Urbilder wahr, die ihr, als dem Ebenbild Gottes, mit der Schöpfung geschenkt wurden? Lassen Sie mich die Frage anders stellen. Kann Naturwissenschaft nur so gedacht werden? Wenn wir diese Frage bejahen, dann ist der Schritt zu der Überzeugung nicht weit, daß Denkstrukturen, die in der Naturwissenschaft auftreten, über sie hinaus von Bedeutung sind. Die Methode des naturwissenschaftlichen Denkens hat uns Kräfte anvertraut, die den kosmischen Kräften entsprechen. Man möchte glauben, daß damit in der Welt dieses Denkens eine Grenze sichtbar wird. Vielleicht öffnet uns gerade eine Grenzsituation auch wieder die Augen für eine neue gemeinsame Weltanschauung, wenn wir nur bereit sind, mit unerbittlicher Wahrheitsliebe nach ihr zu suchen. Freilich müßten wir auf dem Weg zu ihr auf die sichere Führung durch das Experiment verzichten, das jedes Ausbrechen aus der Zucht der Gedanken unbestechlich verrät.

Aber selbst wenn sich diese Hoffnungen als trügerisch erweisen, bleibt die Erkenntnis von der Vielfältigkeit intellektueller Bemühung und die Beglückung bei der Begegnung einer Ordnung, die über die Welt des Alltags hinausweist. Vollendete Ordnung ist vollendete Schönheit.

*) Rascher Verlag Zürich 1952



- Heft 24: **Joseph Pascher**
Die christliche Eucharistiefeier als dramatische Darstellung
des geschichtlichen Abendmahles
 Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.40
- Heft 25: **Friedrich Lütge**
Geschichte, Wirtschaft, Wirtschaftsgeschichte
 Groß 8°. 19 Seiten, geh. DM 1.60
- Heft 26: **Eugen Ulmer**
Wege zu Europäischer Rechtseinheit
 Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.50
- Heft 27: **Johannes Theodorakopoulos**
Philosophie und Religion
 Groß 8°. 16 Seiten, geh. DM 1.50
- Heft 28: **Thrasylulos Georgiades**
Sakral und Profan in der Musik
 Groß 8°. 12 Seiten, geh. DM 1.20
- Heft 29: **Julius Speer**
Wald und Forstwirtschaft in der Industriegesellschaft
 Groß 8°. 16 Seiten — vergriffen
- Heft 30: **Jaques Albert Cottat**
Die geistige Bedeutung Asiens und des Abendlandes füreinander
 Groß 8°. 35 Seiten, geh. DM 2.80
- Heft 31: **Wolfgang Clemen**
Das Wesen der Dichtung in der Sicht moderner
englischer und amerikanischer Dichter
 Groß 8°. Ca. 20 Seiten, geh. DM 1.60
- Heft 32: **Hans Liebmann**
Biologisches Denken als Voraussetzung
einer modernen Wasserwirtschaft
 Groß 8°. 11 Seiten, geh. DM 1.20
- Heft 33: **Hugo Kuhn**
Rittertum und Mystik
 Groß 8°. 14 Seiten, geh. DM 1.60
- Heft 34: **Walter Rollwagen**
Das Elektron der Physiker
 Groß 8°, 13 Seiten, geh. DM 1.60

MAX HUEBER VERLAG MÜNCHEN