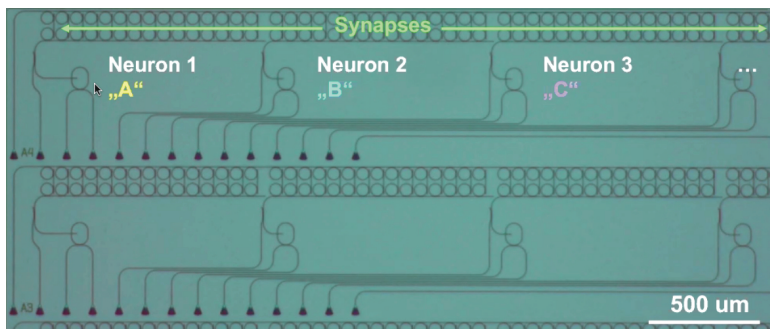


Ausschnitt aus dem PIC der Uni Münster mit 4 Neuronen und 60 Synapsen.



Sowohl synaptische Gewichtsmodulation als auch Neuronenintegration werden unter Verwendung integrierter Phasenwechselmaterialien erreicht; diese befinden sich auf zwei Sorten von Mikroringresonatoren, die eine synaptische oder neuronale Funktion haben. Die Forscher entwickelten einen neuromorphen Chip mit 4 künstlichen Neuronen und insgesamt 60 Synapsen (s. Abb.). Bei den beiden bislang verwendeten neuronalen Algorithmen – sowohl bei überwachtem als auch bei unbeaufsichtigtem Lernen – war das künstliche Netzwerk in der Lage, anhand vorgegebener Lichtmuster ein gesuchtes Muster zu erkennen. Weil die Phasenwechsel-Materialien innerhalb von Pikosekunden schalten und so Lichtsignale verstärken oder abschwächen, lernt das neuronale Netz sehr schnell. Auch der Energiebedarf des Netzwerks ist im Mittel niedrig. Pro Rechenschritt werden zwar noch einige hundert Pikojoule verbraucht, deutlich mehr als bei einem klassischen Rechner. Ist das neuronale Netz aber einmal trainiert, müssen für den weiteren Betrieb keine nennenswerten Energiemengen mehr zugeführt werden.

12.2.2.1 Probleme: Materialstabilität und Lichtleitung

Die Forscher beschreiben aber auch Probleme, will man solche Chips für Neuronetze verwenden. Ein wichtiges davon betrifft die Phasenwechselmaterialien. Sie scheinen für die nichtflüchtige Langzeitlagerung von synaptischen Gewichten gut geeignet zu sein, die ja auf Mikroringresonatoren basieren, die nur selten angepasst werden müssen. Wenn diese jedoch als Neuron verwendet werden, begrenzt die Kristallisationsgeschwindigkeit solcher Materialien die maximale Geschwindigkeit, mit der Neuronen angeregt werden können. Darüber hinaus wird die Notwendigkeit, die Materialien zu schmelzen, um nach jedem möglichen Anregungsereignis einen vollständigen neuronalen Reset zu induzieren, die große, aber endliche Schaltausdauer der Materialien, dann absehbar verbrauchen.

Ein anderes wichtiges Problem: Herkömmliche tiefe neuronale Netze sind sehr groß; sie umfassen heute typischerweise viele tausend Neuronen und Millionen von Synapsen. Photonische Netzwerke erfordern jedoch Wellenleiter, die weit genug voneinander entfernt sind, um eine Kopplung zu verhindern – die man ja andererseits beim Ein-/Auskoppeln in Ringresonatoren nutzt. Ebenso gilt es, scharfe Biegungen vermeiden,

um zu verhindern, dass Licht den Wellenleiter verlässt; es wird ja durch Totalreflexion in dem Wellenleiter gehalten. Da andererseits das Überqueren von zwei Wellenleitern das Risiko birgt, unerwünschte Leistung in den falschen Pfad einzuspeisen, stellt die 2D-Natur eines photonischen Chips eine erhebliche Entwurfsbeschränkung dar.

Dennoch strebt man nun einen industriell gefertigten Chip mit einer großen Zahl optischer Synapsen und Neuronen an. Als Einsatzmöglichkeit sieht man Aufgaben der Bilderkennung. Optische Signale von Kameras ließen sich damit ohne Umweg über die Elektrizität verarbeiten.

12.2.3 Photonisches Reservoir-Computing

Das Reservoir Computing gerade in Verbindung mit Photonik oder auch Spintronik genannt wird (s. u.) liegt an bei diesen Techniken oftmals vorfindbaren Oszillatoren. Ein einzelner nichtlinearer Oszillator kann ein Reservoir emulieren, wenn er in angeregte Schwingungszustände versetzt wird, die durch ein schnell variierende Eingabesignale erzeugt werden. Der Verlust der Parallelität der Architektur mit nur einem Oszillator wird durch einen zusätzlichen Vorverarbeitungs-Eingabeschritt kompensiert: Die Eingabe wird durch eine sich schnell verändernde Maske vervielfacht, die es erlaubt, virtuelle Knoten zu definieren, die zeitlich durch die resultierende Oszillatordynamik miteinander verbunden sind. Dies bietet eine drastische Vereinfachung der Reservoir-Auslegung für Hardware-Implementierungen.

Zudem wurden in den letzten Jahren Reservoir-Computer konstruiert, die die unglaublichen Bandbreiten und Geschwindigkeiten ausnutzen, die photonischen Signalen inne ist. Diese photonischen Reservoirs nutzen optische Multiplexing-Strategien, um hochkomplexe virtuelle Netzwerke zu bilden. Photonische RC ist besonders attraktiv, wenn die zu verarbeitende Information bereits im optischen Bereich liegt, z. B. bei Anwendungen in der Telekommunikation und Bildverarbeitung.

Es wurde experimentell demonstriert und verifiziert, dass einige dieser photonischen RC-Lösungen äußerst wettbewerbsfähige Leistungswerte bei noch nie dagewesenen Datenraten erzielen, die oft softwarebasierte maschinelle Lernverfahren für rechenintensive Aufgaben übertreffen, etwa bei der Erkennung von Sprache und Sprechern, chaotischer Zeitreihenvorhersage oder dynamischer Systemmodellierung. Ein weiterer bedeutender Vorteil photonisch-basierter Ansätze ist die Verwendung von kohärentem Licht, um sowohl die Phase als auch die Amplitude des Lichts auszunutzen. Die gleichzeitige Ausnutzung zweier physikalischer Größen führt zu einer bemerkenswerten Verbesserung gegenüber Netzwerken, die traditionell in softwarebasierten RC-Realisierungen verwendet werden. Ein Reservoir, das mit komplexen Zahlen arbeitet, verdoppelt im Wesentlichen die internen Freiheitsgrade im System.

13 Quantenmechanik – Schwarze Körper, Doppelspalten, Verschränkung

Sowohl die Klimaproblematik wie auch die Coronakrise lehrt uns: Es führt nicht zu einem optimierten Ergebnis, betrachtet man nur eine Komponente der Variablen einer Aufgabenstellung. Beide gerade angesprochenen Aufgaben können bei isoliertem Lösungsversuch durch wirtschaftliche und soziale Schäden weit neben dem gewünschten Ziel landen. Auf der anderen Seite bringt die Kombination von Maßnahmen oder Methoden oft viel Erfolg. So lassen sich auch biologisch inspirierte Computersysteme nicht einfach mit memristiv, photonisch, neuromorph oder DNA-basiert darstellen. Es klingt fast wie eine Karikatur der Technikentwicklung, aber fasst man die derzeitigen Buzzwords zusammen, ergibt sich möglicherweise eine überragende Computerarchitektur: Der neuromorphe, photonische Quantencomputer. Um ansatzweise ein Verständnis für Quantencomputer zu vermitteln, sei zunächst auf die Grundlagen der Quantenmechanik eingegangen. Es geht darum, zu vermitteln, dass man Quantenmechanik nicht intuitiv verstehen, aber damit Mathematik betreiben – und die Ergebnisse dann anwenden kann.

I think I can safely say nobody understands Quantummechanics.

Richard Feynman (1918-1988) in: *The Character of Physical Law*. MIT Press, 1967

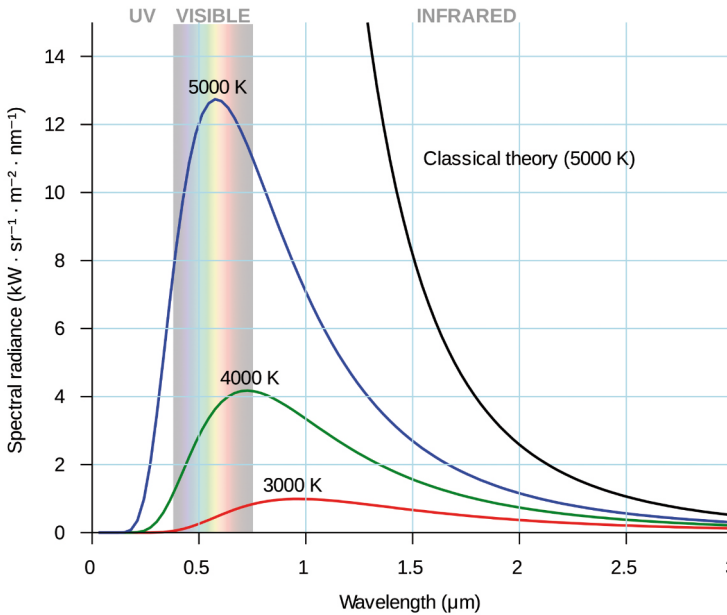
Die Geschichte der Quantenmechanik, begann mit verschiedenen Entwicklungen. Ausgangslage im 19. Jahrhundert war die Annahme des Äthers, eines Mediums, das notwendig für die Ausbreitung von Licht sein sollte. Problem dabei: Diese hypothetische Substanz, die im ausgehenden 17. Jahrhundert postuliert wurde, ließ sich nicht auffinden. Vielmehr ergaben sich nicht erklärbare Beobachtungen.

13.1 Geschichte der Quantenmechanik: Erste Hinweise

Für eine davon legte Gustav Kirchhoff (1824-1887), ein deutscher Physiker, die Grundlage. Er formulierte 1859 das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen Absorption und Emission eines realen Körpers im thermischen Gleichgewicht und sagt kurz gefasst aus: Ein Körper, der gut absorbiert, strahlt auch gut. Zudem: Materie gleich welcher Art sendet bei Erhitzung eine kontinuierliche Strahlung aus, die je nach der Temperatur unsichtbar oder sichtbar ist. An eine ausgedehnte experimentelle Untersuchung dieses Gesetzes war zunächst nicht zu denken, die weitreichende Bedeutung wurde jedoch sofort erkannt. Das daraus entwickelte Kirchhoff 1860 das Konzept des Schwarzen Körpers.

13.1.1 Der Schwarze Körper

Das ist eine idealisierte thermische Strahlungsquelle. Sie absorbiert alle auftreffende elektromagnetische Strahlung jeglicher Wellenlänge voll-



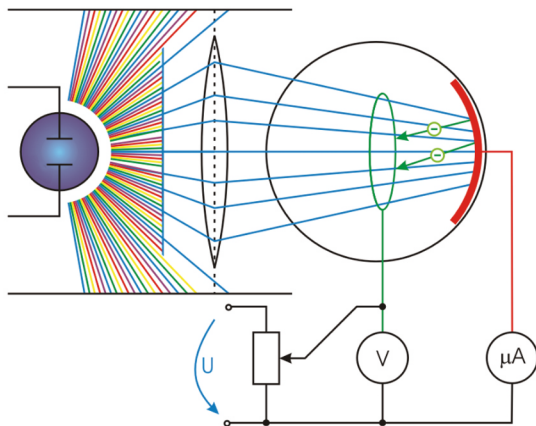
Schwarzkörperstrahlung: Wenn die Temperatur eines schwarzen Körpers abnimmt, nimmt auch die Intensität seiner Strahlung ab; deren Maximum bewegt sich hin zu längeren Wellenlängen. Zum Vergleich wird mit dem rechten Graph das Ergebnis der Strahlungsberechnung nach dem klassischen Rayleigh-Jeans-Gesetz inklusive der damit verbundenen „Ultraviolett-Katastrophe“ gezeigt.

ständig, während reale Körper immer einen Teil davon zurückwerfen. Der Versuch, die Schwarzkörperstrahlung theoretisch zu beschreiben, hat dann wesentlich zur Geburt der Quantenphysik beigetragen.

Zwar hatte der englische Physiker Baron Rayleigh 1900, korrigiert von seinem Landsmann James Jeans fünf Jahre später, das Rayleigh-Jeans-Gesetz aufgestellt. Es beschreibt die Strahlung eines Schwarzen Körpers – leider nur bei großen Wellenlängen (s. Abb.). Bei kleinen Wellenlängen hingegen liefert es viel zu große Werte; man nennt dies die Ultraviolett-Katastrophe. Der deutsche Physiker Wilhelm Wien formulierte bereits 1894, dass die Wellenlänge, bei der ein Schwarzer Körper die intensivste Strahlung abgibt, umgekehrt proportional zur Temperatur ist. Verdoppelt sich etwa die Temperatur des Strahlers, so halbiert sich die Wellenlänge, bei der sein Strahlungsmaximum liegt. Dieses Wiensche Verschiebungsgesetz bzw. allgemeiner formuliert als Wiensches Strahlungsgesetz hatte nur ein Problem: Mit der damals bekannten Physik ließ es sich nicht erklären, führte zu Widersprüchen.

13.1.2 Photoelektrischer Effekt

Experimentelle Hinweise dafür gab die Entdeckung des photoelektrischen Effekts durch Heinrich Hertz (1857-1894). Im Jahr 1886 konnte er den Einfluss von Ultraviolettstrahlung auf die Metalloberflächen mit Hilfe einer Funkenstrecke zeigen. Er beobachtete, dass das ultraviolette Licht, das von einem „Primärfunken“ ausgesandt wird, die Länge eines zweiten



Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zum Nachweis des **photoelektrischen Effekts**. Der Filter lässt Licht bestimmter Wellenlänge von der Lampe links durch. Das Licht trifft auf die gekrümmte Elektrode und Elektronen werden emittiert. Die einstellbare Spannung kann erhöht werden, bis der Strom nicht mehr fließt (Gegenfeldmethode). Diese „Stoppspannung“ ist nur eine Funktion des Elektrodenmaterials und der Frequenz des einfallenden Lichts und wird durch die Lichtintensität nicht beeinflusst.

Funkens vergrößert. Verschiedene Absorber für UV-Licht – auch in sichtbarem Licht durchsichtige – verkleinerten den Funken. Licht ohne UV-Anteil hatte keinen Einfluss auf die Funkenlänge. Die Erklärung dieser Beobachtungen ist, dass das ultraviolette Licht Elektronen aus den Elektroden der Funkenstrecke herausschlägt, die dann schon bei geringerer elektrischer Feldstärke zu einem Überschlag führen, da nicht erst die Austrittsarbeit aufgewendet werden muss. Aus der Sicht klassischer Physik würde nun eine Änderung der Lichtintensität Änderungen in der kinetischen Energie der vom Metall emittierten Elektronen bewirken. Die weiteren experimentellen Untersuchungen konnten dies jedoch nicht bestätigen. Vielmehr fand

man, dass Elektronen dann freigesetzt werden, wenn die Energie der Strahlung – die von der Frequenz abhängig ist – einen bestimmten Schwellwert übersteigt. Unterhalb dieser Schwelle werden unabhängig von der Lichtintensität oder der Belichtungsdauer keine Elektronen aus dem Material emittiert (s. Abb.).

Unabhängig von der Entdeckung des photoelektrischen Effekts, aber in Überlegungen zur Erklärung des Verhaltens Schwarzer Körper gab im Jahre 1900 Max Planck (1858-1947) bereits Hinweise für eine Erklärung. Er postulierte eine Quantisierung elektromagnetischer Strahlung.

13.1.3 Die Postulierung des Quant

Erst die Formel von Max Planck im Jahr 1900, dass die Materie die Strahlungsenergie nur in Form bestimmter Energiequanten aufnehmen und abgeben kann, konnte dieses Rätsel mathematisch lösen. Seine Quantenhypothese besagt, dass jedes energieabstrahlende Atomsystem theoretisch in eine Anzahl diskreter „Energieelemente“ E unterteilt werden kann. Jedes dieser Energieelemente soll proportional zu der Frequenz ν sein, durch folgende Formel definiert:

$$E = h\nu$$

Dabei ist h ein numerischer Wert, der als Planck-Konstante oder Plancksches Wirkungsquantum bezeichnet wird.

Planck ging demnach von der Annahme aus, dass der Schwarze Körper aus Oszillatoren mit diskreten Energieniveaus besteht. Er betrachtete diese Quantelung der Energie also als *Eigenschaft der Materie und nicht des*

Lichtes selbst. Er sagte später über seine Quantisierung: „Das war eine rein formale Annahme, und ich dachte mir eigentlich nicht viel dabei, sondern eben nur das, daß ich unter allen Umständen, koste es, was es wolle, ein positives Resultat herbeiführen müßte.“ [plan1931] Heutzutage gilt diese mit der klassischen Physik unvereinbare Annahme als die Geburt der Quantenphysik und die größte intellektuelle Leistung von Planck.

13.1.3.1 Die Bezeichnung „Quantum“

Max Planck sprach in seiner Arbeit 1900 von „Energieelementen“. Die bekannteste Nennung von „emittierten Quanta“ geht auf Philipp Lenard (1862-1947) zurück. Er war ein österreichisch-ungarischer Physiker, der ab 1907 auch die deutsche Staatsbürgerschaft hatte. Er erhielt 1905 den Nobelpreis für Physik für seine Arbeiten über Kathodenstrahlen, insbesondere für die Aufklärung ihrer korpuskularen Natur. Lenard untersuchte als erster den Photoeffekt im Hochvakuum. Er konnte 1899 durch Ablenkung der Ladungsträger im Magnetfeld ihre spezifische Ladung bestimmen und sie so als Elektronen identifizieren. Er entdeckte auch Abhängigkeiten von der Frequenz und der Bestrahlungsstärke. Die Elektronen bezeichnete er jedoch wie bereits einer seiner Lehrer, Hermann von Helmholtz, als Stromquanten oder kurz Quanta (Plural von Quantum) [mehr1982]. Der englische Physiker Joseph John Thomson (1856-1940) schlug den Namen Korpuskeln vor, aber schließlich setzte sich der Begriff „Elektron“ durch, vorgeschlagen von dem Iren George Johnstone Stoney (1826-1911) und dem Deutschen Hermann von Helmholtz (1821-1894).

Ansonsten fiel Lenard eher negativ auf. Er war ein Nationalsozialist und Antisemit der frühen Stunde, kannte Hitler persönlich, wurde zum Wortführer einer „Deutschen Physik“ mit der These: „Wissenschaft ist, wie alles was Menschen hervorbringen, rassisch, blutmäßig bedingt“. Die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik verstand er nicht, griff Albert Einstein an, arbeitete an einer Äther-Theorie...

Der Begriff Quant (vom lateinischen quantum: wie groß; wie viel) sollte dennoch zur Berühmtheit werden. Mediziner und Pharmakologen bezeichneten zuvor mit „quantum satis“ (abgekürzt qs) ausreichende Mengen eines Stoffs; übrigens war Hermann von Helmholtz auch Mediziner... Auch heute gibt es diese Bezeichnung. Bei Stoffen, die mit dieser Mengenangabe gekennzeichnet sind, handelt es sich immer um Hilfsstoffe, niemals um Wirkstoffe. Die Abkürzung wird auch im Lebensmittelrecht als Mengenangabe für Lebensmittelzusatzstoffe verwendet, für die keine Höchstmenge festgelegt ist.

In der Physik bezeichnet „Quant“ ein Objekt, das durch einen Zustandswechsel in einem System mit diskreten Werten einer physikalischen Größe erzeugt wird. Quanten können immer nur in bestimmten Portionen dieser physikalischen Größe auftreten, sie sind mithin die Quantelung dieser Größen. Beispiele sind das Photon als Quant des elektromagnetischen Feldes, das Magnon als Quant magnetischer Anregungen, das Gluon als Quant des Kraftfeldes, welches die Starke

Wechselwirkung überträgt, oder auch das Graviton als Quantelungsgröße des Schwerfeldes. Oft wird mit dem physikalischen Begriff Quant ein Teilchencharakter der betrachteten Größe assoziiert. Dies ist jedoch nur ein Teil der eigentlichen Bedeutung des Begriffs. Ein Beispiel für ein Quant, dem man keinen Teilchencharakter zuschreiben kann, ist das Drehimpulsquant.

13.1.4 Einsteins Revolution: Welle-Teilchen-Dualismus

Diese große Bedeutung, die sich hier für eine nach Plank zunächst „rein formale Annahme“ abzeichnet, fand ihren Durchbruch mit Albert Einstein (1879-1955) im Jahre 1905. Er verfasste eine unerwartete Erklärung des photoelektrischen Effekts, bei dem Elektronen aus einem Festkörper herausgelöst werden, indem Photonen bestimmter Energie absorbiert werden. Physiker wie Isaac Newton (1643-1727) hatten zwar schon angenommen, dass Licht aus Teilchen, sogenannten Korpuskeln besteht. Spätestens Ende des 19. Jahrhunderts galt die Vorstellung von Lichtteilchen allerdings als überholt, da zum einen Maxwells Elektrodynamik Licht als elektromagnetische Welle auffasste und in Übereinstimmung damit Interferenzexperimente den Wellencharakter des Lichts unzweifelhaft belegten.

Einsteins Erklärung des photoelektrischen Effekts durch Lichtteilchen 1905 war vor diesem Hintergrund eine mutige Hypothese. Dennoch schrieb er: „Die übliche Auffassung, daß die Energie des Lichtes kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt sei, findet bei dem Versuch, die lichtelektrischen Erscheinungen zu erklären, besonders große Schwierigkeiten... **Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen ...besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei.** Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.“ [eins1905] Der deutscher Physiker, Wissenschaftsjournalist und Einstein-Biograph Albrecht Fölsing (1940-2018) nannte dies „den revolutionärsten Satz, der von einem Physiker des 20. Jahrhunderts geschrieben wurde.“ [föls1993] Genau dafür bekam Einstein 1921 auch den Nobelpreis, nicht etwa – wie vielfach vermutet – für seine Relativitätstheorien.

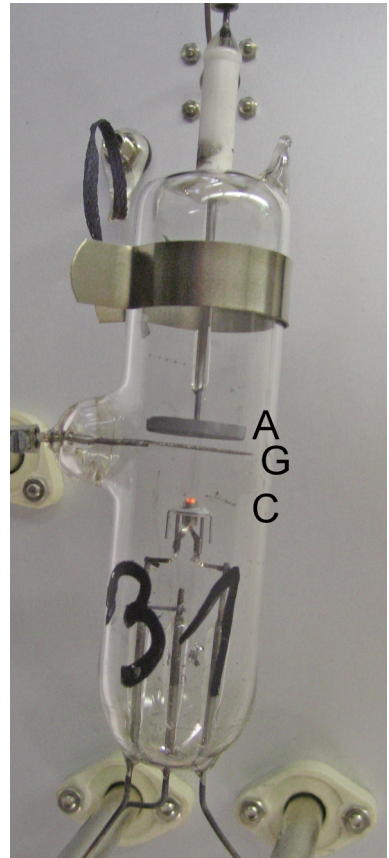
Der photoelektrische Effekt war eines der Schlüsselexperimente zur Begründung der Quantenphysik. Der US-amerikanische Physiker Robert Andrews Millikan (1868-1953) konnte ab 1912 bis 1915 mit Hilfe der Gegenfeldmethode (s. Abb. „photoelektrischer Effekt“) bestätigen, dass der Proportionalitätsfaktor der Einsteinschen Gleichung mit dem bereits bekannten Planckschen Wirkungsquantum übereinstimmt. Der damit gefundene scheinbare Widerspruch, dass Licht in bestimmten Experimenten Wellen-, in anderen aber Teilchenverhalten zeigt (Welle-Teilchen-

Dualismus), wurde erst durch die Quantenmechanik aufgelöst. Die Bezeichnung „Photon“ übrigens wurde erst 1926 von dem US-amerikanischen Chemiker Gilbert Newton Lewis (1875-1946) erfunden. Er meinte damit allerdings zunächst nicht das Lichtquant, sondern ein neues, hypothetisches Teilchen. Seine Hypothese floppte – „Photon“ für Lichtquanten setzte sich aber durch.

13.1.5 Das Bohrsche Atommodell

Gequanteltes Licht spielte auch bei einer weiteren Theorie eine wichtige Rolle, als man Eigenschaften von Atomen unter die Lupe nahm. 1913 verwendete der dänische Physiker Niels Bohr (1885-1962) das Konzept gequantelter Energieniveaus, um die Spektrallinien des Wasserstoffatoms zu erklären. Das „Bohrsche Atommodell“ besagt, dass das Elektron im Wasserstoffatom mit einer bestimmten Energie um den Kern kreist. Das Elektron wird hierbei noch als klassisches Teilchen betrachtet. Zusätzlich gilt: Wenn es mit einer solchen Energie um den Kern kreist, erzeugt es entgegen der klassischen Elektrodynamik keine elektromagnetische Welle, strahlt also auch keine Energie ab. Eine experimentelle Bestätigung der von Bohr verwendeten Annahmen gelang 1914 den deutschen Physikern James Franck (1882-1964) und Gustav Hertz (1887-1975, ein Neffe des Physikers Heinrich Hertz) in dem nach ihnen benannten Franck-Hertz-Versuch (s. Abb.). Er belegt die Existenz von diskreten Energieniveaus in Atomen. Dieser Befund stützte das Bohrsche Atommodell und trug zur Fortentwicklung der Quantenmechanik bei. Den Experimentatoren wurde für diesen Versuch im Jahr 1925 der Nobelpreis für Physik verliehen.

Im Jahr 1924 veröffentlichte der französische Physiker Louis de Broglie (1892-1987) seine Theorie der Materiewellen, wonach jegliche Materie einen Wellencharakter aufweisen kann und umgekehrt Wellen auch einen Teilchencharakter aufweisen können. Mit Hilfe seiner Theorie konnten der photoelektrische Effekt und das Bohrsche Atommodell auf einen gemeinsamen Ursprung zurückgeführt werden. Die Umlaufbahnen des Elektrons um den Atomkern wurden als stehende Materiewellen aufgefasst. Die berechnete Wellenlänge des Elektrons und die Längen der Umlaufbahnen nach dem Bohrschen Modell stimmten gut mit diesem Konzept überein. Eine Erklärung der anderen Atomspektren war jedoch weiterhin nicht möglich.



Glasvakuumröhre (2,7 cm Durchmesser), die für das **Franck-Hertz-Experiment** in Lehlabsors verwendet wurde. Es gibt einen kleinen Tropfen Quecksilber im Inneren. Der Dampfdruck des Quecksilbers wird durch die Temperatur der Röhre gesteuert. Der orangefarbene Punkt mit der Bezeichnung C ist die heiße Kathode, die Elektronen emittiert. Das mit G bezeichnete Gitter ist ein Metallschirm, der die meisten Elektronen passieren lässt. Die mit A bezeichnete Metallscheibe ist die Anode, die die Elektronen sammelt.