

sich auch beim Tunnelvorgang nicht vertauschen. Wir werden dieses instantan ablaufende Phänomen, den sogenannten *Tunnelprozess*, im folgenden ausführlich erläutern.

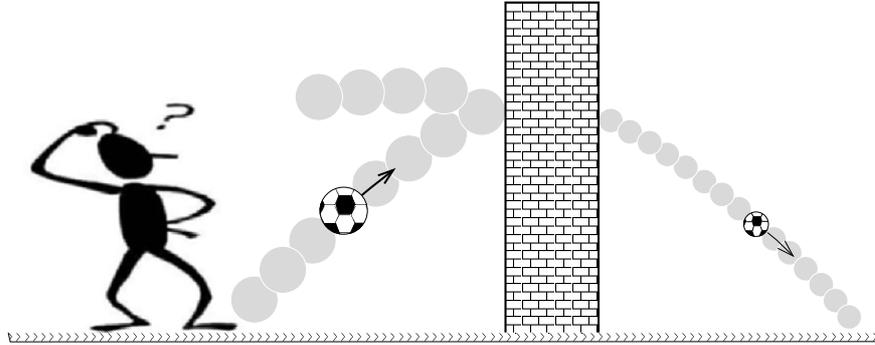


Abb. 5.1: Der Tunneleffekt. Wie gelangt ein „bisschen“ Ball durch die Mauer hindurch?

## 5.1 Der Tunnelprozess: Räume ohne Zeit

### 5.1.1 Der Tunneleffekt

Der Tunneleffekt wurde mathematisch erklärbar durch eine Anfang des letzten Jahrhunderts entwickelte neue physikalische Theorie: die Quantentheorie. Sie bildet derzeit die Grundlage der gesamten modernen Physik.

Zufällig verhalf bei dieser revolutionierenden Forschung die gerade aufstrebende Beleuchtungsindustrie mit der Entwicklung der Glühlampe ein wenig zum Erfolg. Sie war damals neu auf dem Markt und verdrängte allmählich die Gaslaterne. An der Berliner Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) wurde an der Erforschung der Strahlungseigenschaften der Glühlampe gearbeitet. Man wollte verstehen, wie und warum sich die aus-

gesandte Lichtmenge und die Farbe eines heißen Körpers mit steigender Temperatur verändern. Je höher die Temperatur des Strahlers stieg, desto mehr verschob sich die Farbe des abgestrahlten Lichtes vom Roten ins Weiße.

Dem Mitarbeiter der Reichsanstalt Wilhelm K. W. Wien (1864–1928) gelang es 1896 ein empirisches, d.h. ein auf Beobachtungen beruhendes, Gesetz der spektralen Energieverteilung, d.h. der Farbenzusammensetzung der Strahlung, in Abhängigkeit von der Temperatur aufzustellen. Dieses Gesetz wird nach ihm *Wien-sches Verschiebungsgesetz* genannt.

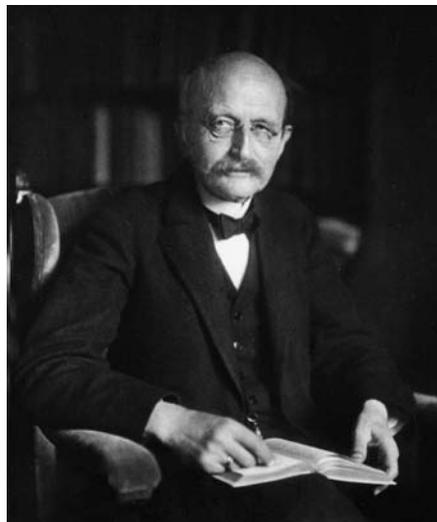


Abb. 5.2: Max Planck, Begründer der Quantenmechanik. Foto: Deutsches Museum München

Max Planck (1858–1947) leitete drei Jahre später dieses Verhalten eines sogenannten *thermischen Strahlers* auch theoretisch ab. Da sich aber bei Präzisionsmessungen vor allem im langwelligen Bereich große Abweichungen vom *Wien-Planckschen Strahlungsgesetz* ergaben, nahm sich Planck dieser Formel erneut an.

Zuerst am 8. Mai 1899 vor der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften und später am 14. Dezember 1900 auf der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft in Berlin schlug Planck eine theoretisch begründete Formel vor, die die Messdaten nun vollständig beschrieb. Dazu musste er von der bisherigen physikalischen Auffassung abweichen, die Energie sei eine kontinuierliche Größe. In seiner Formel nahm die Strahlungsenergie  $E$  zur Frequenz  $f$  proportionale *diskrete* Werte an ( $E = hf$ ). Dazu war die Einführung einer Naturkonstanten  $h$  mit  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Js erforderlich, sie wird seither als *Plancksches Wirkungsquantum* bezeichnet.

Planck fühlte sich mit seiner Formel nicht besonders wohl, sie widersprach schließlich gänzlich der Grundüberzeugung der klassischen Physik, in der die Natur keine „*Sprünge*“ macht. Er tat dies alles nur, um „*koste es, was es wolle, ein positives Resultat*“ herbeizuführen. Später schrieb er, er könne „*die ganze Tat nur als einen Akt der Verzweiflung bezeichnen*“.

Weder Planck noch seine Kollegen erkannten sofort die ungeheure Tragweite dieser Annahme der *gequantelten Natur*. Erst weitere fünf Jahre später stellte Albert Einstein (1879–1955) seine noch viel radikalere Lichtquantenhypothese vor, die schließlich zum endgültigen Bruch mit den althergebrachten Naturvorstellungen führte. In seiner Hypothese mit dem Titel „*Über einen die Erzeugung und Verwandlung von Licht betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*“ betrachtete er das Licht als „*Bombardement von Teilchen*“. Seine Theorie wurde von ihm zur Deutung des *photoelektrischen Effektes* erfolgreich eingesetzt. Einstein zeigte, dass ein von einem Atom absorbiertes Photon (Lichtquant) seine Energie nur an ein einzelnes Elektron abgibt. Wie in Abbildung 5.4 skizziert, löst ein Photon mit seinem Energiequantum  $hf$  ein Elektron von dem Atom ab. Die Energie des Photons wird bei diesem Prozess vollständig an das Elektron übergeben. Einstein bekam für diese Erklärung des photoelektrischen Quan-



Abb. 5.3: Albert Einstein, 1912. Er erweitert die Quantentheorie von Max Planck um die Hypothese der Lichtquanten. Foto: Deutsches Museum München

teneffektes (nicht für seine berühmte Relativitätstheorie) 1921 den Nobelpreis verliehen.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, dass schon vor 300 Jahren Newton das Licht als Teilchen beschrieb und nicht als eine Welle ansah. Er hatte damals mit seiner Annahme einen schweren Stand, denn alle Experimente wiesen zu dieser Zeit ausschließlich auf die Wellennatur des Lichtes hin.

Auf der 1. Solvay-Konferenz in Griechenland, einer *Gipfelkonferenz* der damals führenden Physiker, kam im Herbst 1911 der Durchbruch für die Plancksche Quantenhypothese. Die Quantentheorie rückte nun in den Mittelpunkt der zeitgenössischen physikalischen Forschung.

Viele Effekte in der Optik, Elektronik oder auch in der modernen Nanotechnologie sind nur mit der Quantentheorie erklärbar,

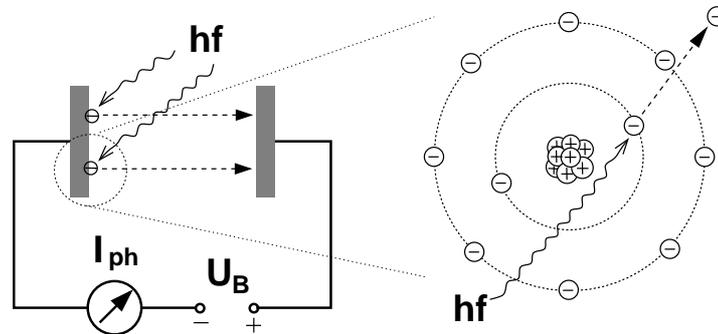
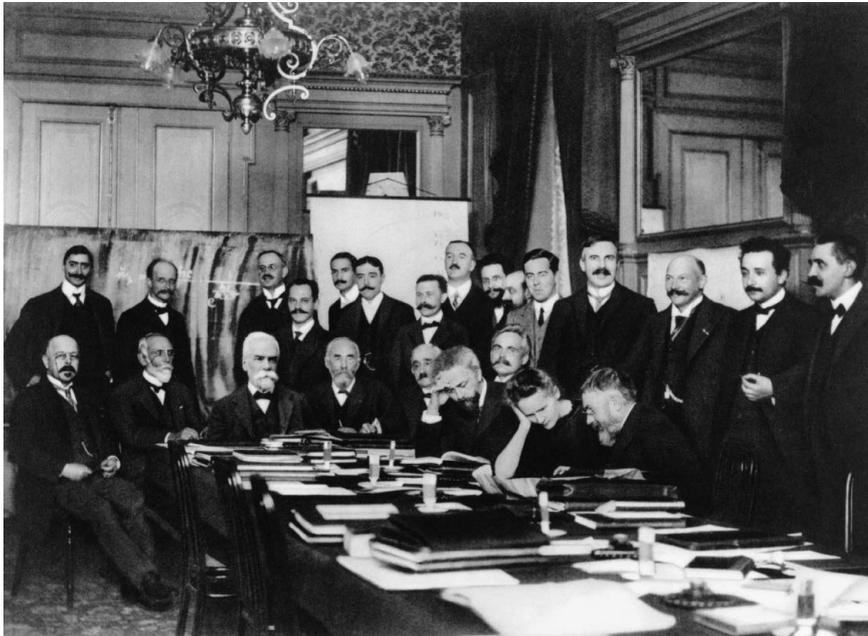


Abb. 5.4: Der photoelektrische Effekt. Das Photon überträgt beim Stoß mit einem Elektron seine gesamte Energie in Form diskreter Energiequanten  $hf$ . Ist die Energie hoch genug, wird das Elektron von der Metalloberfläche abgelöst, es fließt ein elektrischer Strom.

aber auch viele chemische oder molekularbiologische Prozesse sind quantenphysikalischer Natur. So erklärt z.B. erst die Quantenphysik wie Laser funktionieren, warum Metalle den Strom besser leiten als andere Festkörper oder, eine bis zur Einführung der Quantenphysik ungeklärte grundsätzliche Frage, warum Atome überhaupt stabil sind. Weshalb fallen die Elektronen nicht auf den anziehenden positiv geladenen Atomkern?

Der Elektromagnetismus, einer der vier fundamentalen Wechselwirkungsprozesse, wird durch die 1873 von James Clerk Maxwell (1831–1879) aufgestellte Maxwell-Theorie ausgezeichnet und elegant beschrieben. Eine Unvollständigkeit dieser Theorie wurde erst bei der Beschreibung des Wasserstoffatoms bemerkt. Die Anziehung eines (negativ geladenen) Elektrons und eines (positiv geladenen) Protons bilden zusammen das Wasserstoffatom. Die Maxwellsche Theorie beschreibt hierbei jedoch nicht, weshalb sich das Elektron satellitenartig stabil auf Bahnen um das Proton, d.h. den Atomkern, bewegt und nicht innerhalb von  $3 \cdot 10^{-13}$  Sekunden auf das Proton stürzt. Die beobachtete Bahnstabilität



Goldschmidt Planck Rubens Lindemann Hasenohrl  
 Nernst Brillouin Sommerfeld De Broglie Hostelet  
 Solvay Knudsen Herzen Jeans Rutherford  
 Lorentz Warburg Wien Einstein Langevin  
 Perrin Madame Currie Poincaré Kamerlingh Onnes

Abb. 5.5: 1. Solvay-Konferenz im Herbst 1911. Sie brachte den Durchbruch für die Plancksche Quantenhypothese. © Hulton-Deutsch Collection/CORBIS

und die Eigenschaft überhaupt, dass sich Elektronen nur auf gewissen Bahnen um den Atomkern bewegen können, hat die Theorie der Quantenmechanik erklärt.

Wichtige Unterschiede der Quantentheorie gegenüber der klassischen Physik sind z.B.:

- Die Quantisierung  
Alle physikalischen Felder sind quantisiert. Sie existieren nur in Vielfachen minimaler Energiemengen, den sogenannten

*Quanten.* Felder können nur über diese Energiequanten wirken und damit gemessen werden.

- **Der Welle–Teilchen–Dualismus**  
Ist ein Elektron teilchenartig wie eine Billardkugel oder besitzt es Wellennatur wie eine Wasserwelle? Den in der Quantenphysik untersuchten Quanten (d.h. Teilchen wie z.B. Elektronen, Neutronen oder Photonen) werden sowohl Teilchen– als auch Welleneigenschaften zugeschrieben. Welle und Teilchen bilden in der Mikrowelt eine untrennbare Einheit. So können z.B. Lichtquanten aufgrund ihrer Teilcheneigenschaften beim Aufprall auf eine Metallplatte ihre Energie an einzelne Elektronen abgeben und diese dadurch vom Metallatom ablösen. Sie können aber auch aufgrund ihrer Welleneigenschaften an einem Spalt von ihrer Bahn abgelenkt werden, sich überlagern (interferieren) und dabei örtlich auslöschen oder verstärken. Welche Erscheinung (ob Teilchen oder Welle) beobachtet wird, ist, so erstaunlich es klingen mag, abhängig vom jeweils durchgeführten Experiment.
- **Das Ende der eindeutigen Vorhersagbarkeit eines Ereignisses, d.h. des Determinismus**  
Die klassische Physik erlaubt uns, das Verhalten eines Teilchens im voraus zu bestimmen. Das Teilchen besitzt eine gewisse Energie und bewegt sich in einer bestimmten Richtung zu einem Zeitpunkt und damit ist auch das Verhalten des Teilchens in der Zukunft festgelegt. In der Quantenphysik ist dies nicht mehr möglich: Das zukünftige Verhalten eines Teilchens ist zufällig und lässt sich nur noch mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagen. Die Quantenmechanik sagt z.B. nur aus, dass von 1000 Atomen etwa 10 zu einer gewissen Zeit zerfallen werden. Wir können aber nicht sagen, welche von den 1000 radioaktiven Atomen zu welchem Zeitpunkt zerfallen werden.

- Die Unmöglichkeit der präzisen Messung (Unbestimmtheitsrelation, auch Unschärferelation genannt)

Es ist nicht möglich, wie in der klassischen Physik den Ort und die Geschwindigkeit oder die Energie und die Zeit eines Quants zugleich exakt zu bestimmen. Je genauer man den einen Wert ermittelt, desto unbestimmter wird der andere.

Die Unschärferelation lässt sich auf folgende Weise anschaulich erklären: Je genauer man den Ort eines Teilchen messen will, umso kleiner muss die Wellenlänge des benutzten Lichtes sein. Damit wächst jedoch umgekehrt proportional zur Wellenlänge die Energie des Lichtquants und stört bei der Messung entsprechend die Geschwindigkeit des Messobjektes.

Diese Unbestimmtheitsrelation zwischen Energie und Zeit kann als Ursache des Tunneleffekts angesehen werden. Sie ermöglicht es theoretisch, einem Teilchen für extrem kurze Zeit einen Energieschub zu verleihen, der ausreicht, zuvor unüberwindbare Barrieren zu überschreiten. Diese Relation erklärt jedoch nicht das Zeitverhalten beim Tunnelvorgang, wie später noch gezeigt wird.

Wir wollen das Tunnel-Phänomen nun an einigen Beispielen erläutern. Der Tunneleffekt wurde um 1926 erstmals beim radioaktiven Zerfall von Uran beobachtet und, wie in der Einleitung bereits erwähnt, um 1928 quantitativ durch die Quantenmechanik erklärt.

Große Atomkerne mit vielen Bausteinen sind nicht stabil, sie zerfallen mit der Zeit in kleinere. Riesenatomkerne, die nach dem Urknall existierten, sind schon lange zerfallen und in der heutigen Natur nicht mehr anzutreffen. Ihre Lebensdauer, d.h. ihre Zerfallszeit, war kürzer als das Alter unserer heutigen Welt.

Eines der stabilsten Elemente ist das Eisenatom. Es besteht aus 82 Kernbausteinen, nämlich aus 26 Protonen und 56 Neutronen sowie aus 26 Elektronen in der Atomhülle auf quantisierten Umlaufbahnen. Bei dieser Anordnung sich elektrisch abstoßen-

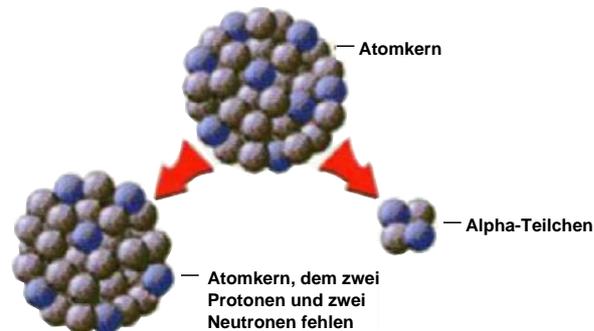


Abb. 5.6: Kernzerfall beim Uran-Atom. Ein  $\alpha$ -Teilchen löst sich aus dem Atomkern, obwohl seine Energie eigentlich zu gering ist, um die Kernkräfte zu überwinden.

der geladener Protonen und abschirmender neutraler Neutronen wird gerade der energetisch günstigste Zustand für Atomkerne erreicht. Alle natürlichen radioaktiven Prozesse führen, wenn auch zum Teil in gewaltigen Zeiträumen, dazu, dass größere Elemente zu Eisenatomen zerfallen oder kleinere Atome mit weniger Bausteinen in Richtung Eisenatom fusionieren (z.B. Wasserstoff zu Helium usw.). Beim radioaktiven Alpha-Zerfall löst sich aus dem Urankern ein Kernbaustein, das sogenannte  $\alpha$ -Teilchen, bestehend aus zwei positiv geladenen Protonen und zwei Neutronen, obwohl die Kernkräfte das Teilchen eigentlich im Inneren des Atomkerns halten müssten (siehe Abbildung 5.6). Es entstehen zwei neue Teilchen, das fortfliegende  $\alpha$ -Teilchen und ein neues zurückbleibendes Atom, das Thorium. Da auch Thorium noch radioaktiv ist, geht der Kernzerfall weiter. Es strahlt, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, weiter Elektronen,  $\gamma$ -Quanten, Protonen und andere Elementarteilchen ab und zerfällt solange, bis das erste nichtradioaktive d.h. stabile (genauer ausgedrückt: sehr langlebige) Element Blei entstanden ist.

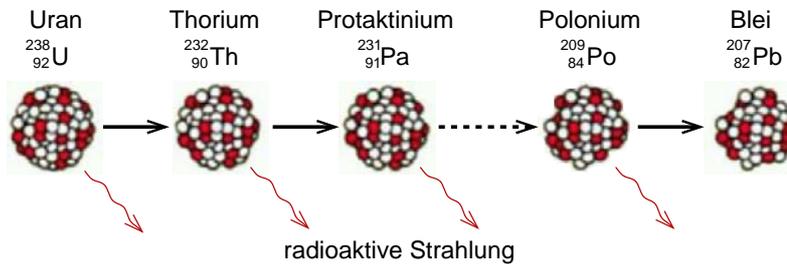


Abb. 5.7: Zerfall eines radioaktiven Urankernes zum viel langlebigeren Element Blei.

In Abbildung 5.8 ist der Tunnelprozess beim Kernzerfall des Uran-Atoms stark vereinfacht schematisch dargestellt. Ein  $\alpha$ -Teilchen, hier als Wellenpaket dargestellt, kann aus dem Energietal des Urankerns auf die andere Seite eines Berges, d.h. aus dem Tal des Atomkerns hinaus gelangen, obwohl seine Energie zu gering ist, den Berg zu überwinden. Die Berge bilden hier die anziehenden Kernkräfte.

Eine Analogie zu diesem Beispiel wäre der Versuch einer Person, einen Ball so hoch zu werfen, dass dieser die Anziehungskraft der Erde überwindet und nicht mehr zurückfällt. Die Erdanziehung zu überwinden bedeutet hier in anderen Worten ausgedrückt, den Gravitationsberg der Erde zu erklimmen, das Tal bildet bei dieser Kraft für uns die Erdoberfläche. Um den Berg zu überwinden ist eine Energie notwendig, die einer Abschussgeschwindigkeit von 11,2 km/s (40 320 km/h) entspricht. Auf diese Fluchtgeschwindigkeit von der Erde, muss eine Rakete gebracht werden, um beispielsweise den Jupiter oder den Mars erreichen zu können. Ist die Abschussgeschwindigkeit zu gering und damit die Energie zu klein, wird es nicht gelingen, der Anziehungskraft der Erde zu entfliehen. Ball bzw. Rakete stürzen auf die Erde zurück oder umkreisen sie als Satellit. Sie fallen in das Tal der

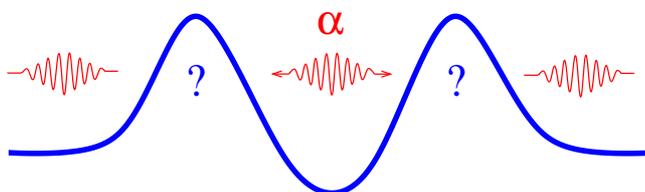


Abb. 5.8: Eine Skizze zum Tunneleffekt. Die Ordinatenrichtung zeigt die Energiegröße an, die Abszisse den Ort. Im Energietal eines Kernpotenzials ist ein  $\alpha$ -Teilchen eingefangen. Nach unseren Alltagserfahrungen kann es wegen seiner zu geringen Energie den Berg nicht übersteigen. Trotzdem wird bei vielen Prozessen beobachtet, dass das Teilchen (hier das  $\alpha$ -Teilchen) das Tal verlassen hat und auf der anderen Seite des Berges angetroffen wird. Das Teilchen ist *getunnelt*. Es stellt sich nun die spannende Frage: Wieviel Zeit verbrachte das Teilchen im Berg, d.h. wie lang dauert das "Tunneln"?

Erdanziehung zurück, statt in den Anziehungsbereich von Jupiter oder Mars zu gelangen.

In der Theorie der Quantenmechanik gibt es also den Tunneleffekt, der eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass Teilchen auch außerhalb des Energietales anzutreffen sind, ohne dass ihre Energie zum Überschreiten des Berges ausgereicht hat.

Oft dauert es viele Jahre, bis ein Teilchen aufgrund der geringen Tunnelwahrscheinlichkeit das Tal eines Atomkernes verlässt. Beim Kohlenstoffisotop  $C_{14}$  löst sich z.B. nur durchschnittlich alle 5600 Jahre ein Teilchen aus dem Kern.

Auf dem radioaktiven Zerfall des Kohlenstoffisotops  $C_{14}$  beruht übrigens eine sehr hilfreiche und genaue Methode der Altersbestimmung von Fossilien, die sogenannte Radio-Karbon-Methode oder  $C_{14}$ -Methode für organisches Material. Sie wurde von Prof. Willard F. Libby (1949) an der Universität von Chicago entwickelt. 1960 erhielt Libby für seine „ $C_{14}$ -Methode der Altersbestimmungen in Archäologie, Geologie, Geophysik und anderen

*Wissenschaften*“ den Nobelpreis für Chemie.

Die Methode funktioniert auf folgende Weise: In unserer Atmosphäre kommt Kohlenstoff in drei Isotopenformen unterschiedlicher Mengen vor, dem  $C_{12}$  (98,89%), dem  $C_{13}$  (1,11%) und dem  $C_{14}$  (0,0000000001%). Der Index der Isotope steht hier für die Anzahl der Kernbauteilchen (Protonen und Neutronen), denn ein Atom kann mit verschiedener Neutronenanzahl im Kern vorkommen. Diese unterschiedliche Neutronenanzahl bei derselben Protonenanzahl erlaubt, dass ein Atom unterschiedlich große Kerne besitzen kann. Diese chemisch identischen Atome werden Isotope genannt. Im Kohlenstoffkern befinden sich 6 Protonen, um den in der Atomhülle 6 Elektronen kreisen. Das Isotop  $C_{12}$  besitzt demzufolge noch zusätzlich 6 Neutronen, das Isotop  $C_{13}$  7 und das Isotop  $C_{14}$  8 Neutronen zu den 6 Protonen im Atomkern.

Die Isotope  $C_{12}$  und  $C_{13}$  sind stabil, das  $C_{14}$  dagegen ist radioaktiv, also instabil. Die Stabilität eines Atoms wird durch seine Kernzusammensetzung bestimmt. Bei dem Isotop  $C_{14}$  verursacht das achte Neutron im Kern den weniger dauerhaften Zustand im Vergleich zu  $C_{12}$  mit seinen nur 6 Neutronen.

Alle Lebewesen nehmen nun im Laufe ihrer Existenz  $C_{14}$ -Isotope aus der Umgebung durch Photosynthese, Atmung oder die Nahrungskette auf. Die  $C_{14}$ -Konzentration in den Lebewesen steht dadurch im physikalischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre. Stirbt ein Lebewesen, wird kein weiterer Kohlenstoff mehr aufgenommen, und die vorhandene  $C_{14}$ -Konzentration nimmt durch den radioaktiven Zerfall mit einer konstanten Rate ab (siehe Abbildung 5.9). Durch die Messung der Restaktivität der  $C_{14}$ -Kohlenstoffisotope kann jetzt die Altersbestimmung erfolgen. Nach etwa 5600 Jahren ist in einem fossilen Lebewesen nur noch die Hälfte der ursprünglichen Konzentration des  $C_{14}$ -Isotops vorhanden, nach weiteren 5600 Jahren ist nur noch ein Viertel der Strahlung messbar. Somit lässt sich anhand des Zerfalls des  $C_{14}$ -Isotops im Vergleich mit der heutigen Luftzusam-

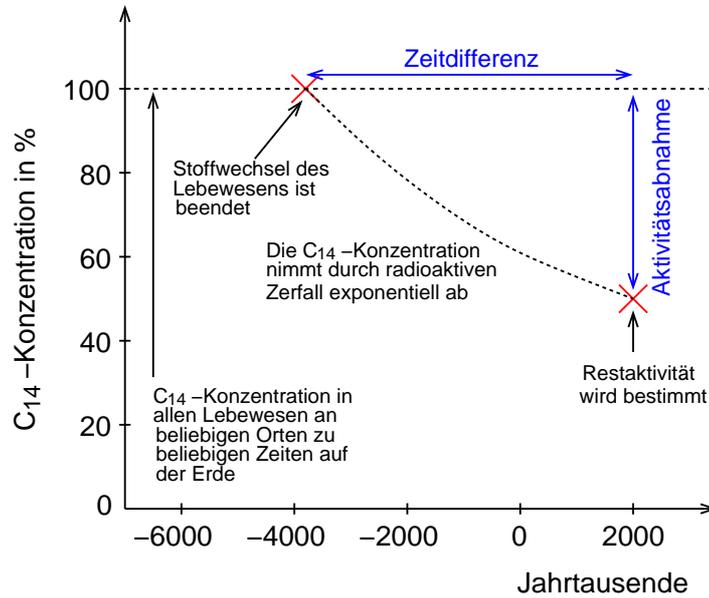


Abb. 5.9: Der radioaktive Zerfall von  $C_{14}$ -Isotopen in Fossilien ermöglicht ihre genaue Altersbestimmung.

mensetzung das Alter von organischem Material bis zu 70 000 Jahre zurückbestimmen. Zu den Triumphen der  $C_{14}$ -Methode zählt die Altersbestimmung der Mumien der Pharaonen.

Ein anderer, für das Leben existentieller Tunnelprozess läuft seit Milliarden Jahren in der Sonne und in den Sternen ab: die Kernfusion. Die Kernfusion ist ein energiefreisetzender Prozess, bei dem zwei Atomkerne zu einem neuen Atomkern verschmelzen und dabei die Sonnenwärme erzeugen. Er findet bei außerordentlich hohen Temperaturen statt, bei denen sich die Materie im vierten Aggregatzustand, dem sogenannten Plasma, befindet. Dies bedeutet, die Atome besitzen eine so große Bewegungsenergie, dass sie sich in ihre Bestandteile, die Elektronen und Kerne,

zerlegen. Im Plasma sind also die Elektronen der Atome vom Atomkern getrennt, sie sind ionisiert. Die Elektronen (negativ geladen) und die Atomkerne (positiv geladene Ionen) bewegen sich mit großer Geschwindigkeit unabhängig voneinander. Die elektrische Anziehungsenergie der geladenen Teilchen ist im Plasmazustand kleiner als ihre Bewegungsenergie.

Zur Verschmelzung zweier Kerne müssen diese nahe genug zusammenkommen, damit die anziehend wirkenden Kernkräfte stärker werden, als die Coulomb–Abstoßung (entspricht hier dem Tunnelberg) durch die gleichnamige, positive, elektrische Ladung der Atomkerne. Um diese elektrische Abstoßung zu überwinden, müsste die Temperatur 560 Millionen Grad betragen. Da aber die Bewegungsenergie (sie ist ein Maß für die Temperatur) selbst im Inneren der Sonne nur etwa 15 Millionen Grad beträgt, reicht sie nicht aus, um die Coulomb–Abstoßung zu überwinden. Die Kerne des schweren Wasserstoffs Deuterium können ausschließlich aufgrund des Tunneleffekts mit den Kernen des überschweren Wasserstoffs Tritium zu einem Helium–4–Kern, einem sog.  $\alpha$ -Teilchen fusionieren. Das  $\alpha$ -Teilchen besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Diese Teilchen werden auch Nukleonen genannt. Bei dem Fusionsvorgang wird ca. viermal soviel Energie pro Nukleon frei wie bei der Spaltung eines Urankerns. Diese Energiefreisetzung verursacht die eingangs erwähnte gewaltige Wirkung der Wasserstoffbombe.

In Abbildung 5.10 ist die Fusion zweier Wasserstoffkerne (Deuterium = ein Proton und ein Neutron und Tritium = ein Proton und zwei Neutronen) zu einem Heliumkern dargestellt. Deuterium  $H_2$  und Tritium  $H_3$  sind Isotope des Wasserstoffs.

Eine technische Anwendung des Tunneleffektes gibt es seit 1960 in der Halbleiterelektronik: die Tunneldiode, nach ihrem Entdecker oft auch Esaki–Diode genannt. Dieses Bauelement befindet sich heute in zahlreichen mikroelektronischen Schaltungen. Als Halbleiter bezeichnet man solche Materialien, die bei

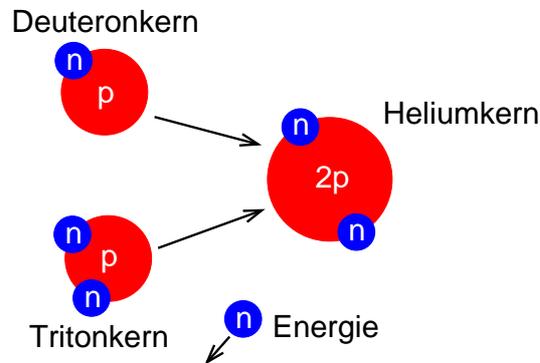


Abb. 5.10: Kernfusion zweier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern. Bei der Verschmelzung der Protonen  $p$  wird ein Neutron  $n$  mit enormer Energie freigesetzt.

tiefen Temperaturen elektrisch gut isolieren, bei hohen Temperaturen aber elektrische Leiter sind.

Aufgrund der räumlichen Nähe und der periodischen Anordnung sehr vieler gleichartiger Atome sowie deren Elektronen in einem Festkörper gruppieren sich energetisch eng benachbarte Elektronenbahnen zu sogenannten *Energiebändern*. Die Elektronenbahnen sind dann nicht mehr scharf bestimmt, sondern bilden ein breites Band von möglichen Kreisbahnen. Diese Bahnenbänder entsprechen erlaubten Energiebändern. Elektronen, die sich in diesen Energiebändern bewegen, können nicht mehr einzelnen Atomen, sondern nur noch dem ganzen Halbleiterkristall zugeordnet werden. Man spricht deshalb auch von einem Elektronengas zwischen den Atomrümpfen des Kristalls. Die einzelnen Energiebänder sind je nach Halbleitermaterial durch mehr oder weniger große Lücken getrennt. Der Grund für das von einem Metall abweichende Stromleitungsverhalten der Halbleiter ist eine solche sogenannte *verbotene Energielücke*, die das energetisch höchste, voll mit Elektronen besetzte Energieband, das

Valenzband, vom nächst höheren, dem Leitungsband, trennt (siehe Abbildung 5.11).

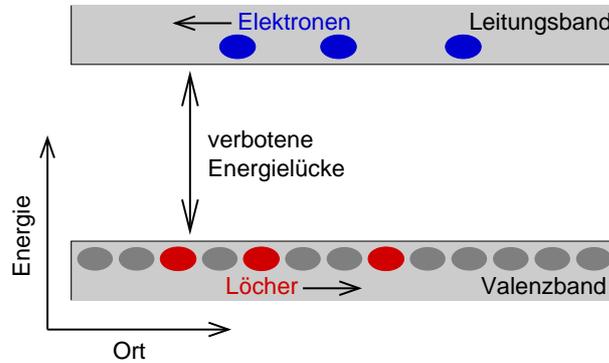


Abb. 5.11: Energieband-Modell eines Halbleiters. In der verbotenen Energielücke kann in Übereinstimmung mit der Quantenmechanik kein Elektron existieren. Diese Energielücke entspricht einem Potenzialberg, der bei ausreichender thermischer Energie übersprungen werden kann oder sonst nur durch Tunneln überwindbar ist. Nur Elektronen mit größerer oder geringerer Energie als die Energielücke können sich in einem Halbleiter aufhalten.

Bei niedrigen Temperaturen (d.h. kleiner Bewegungsenergie) besetzen die Elektronen der Halbleiteratome das Valenzband vollständig. Damit besteht für die Elektronen keine Bewegungsmöglichkeit, alle Plätze sind besetzt. Mit steigender Temperatur gelangen jedoch mehr und mehr Elektronen in das Leitungsband. Nun können sich die Elektronen im Leitungsband wie in einem Gas bewegen, und auch die freien Plätze im Valenzband (sie werden Löcher genannt) können durch ein elektrisches Feld bewegt werden.

Das Grundprinzip eines Halbleiters kann gut mit folgender Analogie erklärt werden. Man stelle sich ein Haus mit zwei Stockwerken, einem Eingang und einem gegenüberliegenden Ausgang vor. Das Erdgeschoss ist mit Menschen gefüllt, die Pakete vom

Eingang zum Ausgang transportieren sollen. Das Erdgeschoss entspricht in diesem Modell dem Valenzband, der erste Stock dem Leitungsband und die Menschen den Elektronen. Befinden sich nun nur wenige Menschen im Erdgeschoss, ist der Transport kein Problem, das Gebäude verhält sich wie ein guter Leiter. Ist das Erdgeschoss komplett mit Menschen gefüllt und der erste Stock gesperrt, kann kein Transport stattfinden, das Gebäude entspricht einem guten Isolator. Ist aber der erste Stock für die Menschen, die die Energie aufbringen, über ihn zum Ausgang zu gelangen, geöffnet, so kann doch ein Transport stattfinden. Im ersten Stock ist das Durchqueren kein Problem, und auch im Erdgeschoss wird wieder etwas mehr Platz für den Transport frei, denn im Halbleiter entsprechen die dort fehlenden Elektronen sogenannten *Löchern*, die auch zur Leitfähigkeit beitragen.

Wie schon erwähnt, gewinnen also einige Elektronen durch die Wärmebewegung der Atome die notwendige Energie, um die Energielücke zu überqueren und ins Leitungsband zu gelangen.

Um die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu erhöhen, fügt man ihm oft durch den Einbau von Fremdatomen zusätzliche Elektronen (n-Leitung = Menschen im ersten Stock) oder Löcher (p-Leitung = weniger Menschen im Erdgeschoss) hinzu. Kombiniert man n- und p-leitendes Material, so erhält man eine gleichrichtende Diode. Der Strom durch diese Halbleiterstruktur ist nun von der Polung der angelegten Spannung abhängig: Die Strom-Spannungs-Kennlinie ist jetzt unsymmetrisch<sup>1</sup>. Je

---

<sup>1</sup>Eine Strom-Spannungskennlinie gibt die Abhängigkeit des Stromes durch die Probe in Abhängigkeit von der Größe der angelegten Spannung an. Wächst der Strom proportional mit der angelegten Spannung, dann nennt man das Verhalten *ohmsch*. Ist der Strom nicht proportional zur angelegten Spannung, dann spricht man von *nicht-ohmschem* oder *nicht-linearem* Verhalten. Hängt die Stromgröße von der Spannungspolung ab, dann ist die Strom-Spannungskennlinie asymmetrisch. Eine solche Asymmetrie hatte bereits Karl Ferdinand Braun (1850-1918), der Erfinder der Elektronenstrahlröhre im 19. Jahrhundert entdeckt. Er untersuchte das Strom-Spannungsverhalten verschiedener halbleitenden Mineralien und beobachtete dabei die Stromabhängigkeit von der Polung der angelegten Spannung.

nach Dotierung der beiden Halbleiterstücke kann die in Abbildung 5.12 a dargestellte Energie-Bandstruktur entstehen. Im n-leitenden Gebiet ist die Energie des Leitungsbandes abgesenkt, im p-leitenden Gebiet ist dagegen die Energie des Valenzbandes angehoben worden. Den Elektronen des Leitungsbandes im n-Halbleiter stehen nun durch eine verbotene Energie-Zone (Potentialberg) getrennt, Löcher des Valenzbandes im p-Halbleiter gegenüber. Obwohl ihre Energie  $E_g$  nicht ausreicht, um vom Valenzband direkt ins Leitungsband aufzusteigen, sind die Elektronen jetzt in der Lage, durch diesen verbotenen Bereich, sowohl vom Leitungs- in das Valenzband als auch umgekehrt zu tunneln.

Der Tunnelstrom bewirkt eine stark nichtlineare Strom-Spannungskennlinie, wie sie für zahlreiche technische Anwendungen benötigt wird (siehe Abbildung 5.12 b).

### 5.1.2 Die Tunnelzeit

Nachdem wir den Prozess des Tunnelns näher betrachtet und sein häufiges Auftreten in Natur und Technik an einigen Beispielen besprochen haben, kommen wir nun zu einem weiteren erstaunlichen Aspekt des Tunnelvorganges. Der Tunnelprozess verblüffte zunächst dadurch, dass Teilchen Berge überwinden können, ohne die notwendige Energie zu besitzen. Die andere außergewöhnliche Eigenschaft betrifft sein Zeitverhalten. Erst in den letzten Jahren begann man mit der systematischen, experimentellen Untersuchung der Frage: „*Wieviel Zeit verbringt das Teilchen, also z.B. ein Elektron, ein  $\alpha$ -Teilchen oder ein Photon in dem Berg, d.h. wieviel Zeit benötigt das Teilchen zum Durchqueren des Tunnels?*“ Diese Frage hatte weniger Bedeutung für die Kernphysik als für die moderne Mikroelektronik und insbesondere für die Grundlagenforschung, d.h. für die Quantenmechanik: Sind ihre klassisch unphysikalischen Vorhersagen korrekt?

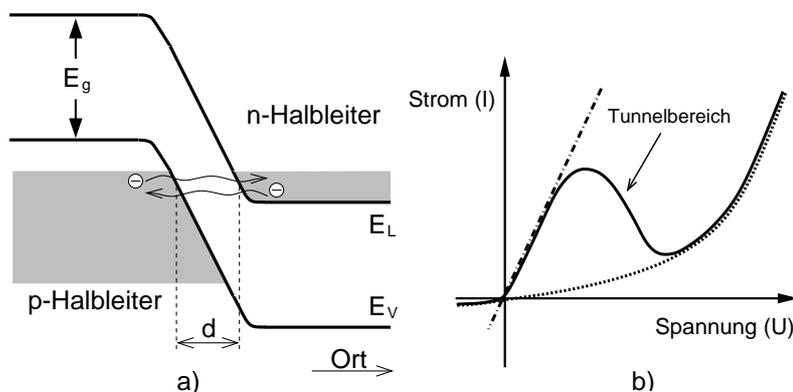


Abb. 5.12: a) Energiebänder-Schema und b) Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunneldiode (schwarze Linie) sowie einer normalen Diode (gepunktete Linie). Die Strich-Punkt-Linie zeigt das lineare Verhalten eines normalen elektrischen Widerstandes (*Ohmsches* Verhalten). Anders als bei einer normalen Diode taucht durch einen großen Dotierungssprung des Halbleiters bei der Tunneldiode im n-Halbleiter das Leitungsband unter die Valenzbandkante und die Elektronen können den Bandabstand  $E_g$  (entspricht einem Coulomb-Berg der Länge  $d$ ) durchtunneln. Bei zu hoher Spannung wird der Tunnelprozess abgebrochen und der Strom verhält sich wie bei einer normalen Halbleiterdiode.

Aus der berühmten Schrödinger-Gleichung folgt für den Aufenthalt in einem Tunnelraum eine *imaginäre* Zeit. Was ist eine imaginäre Zeit? Quantenmechanische Berechnungen des Physikers Thomas Hartman deuteten schon 1962 auf eine rein imaginäre, nicht messbare, also nicht reell erfahrbare Zeit in einem Tunnel hin [18]. Allerdings hatte bisher niemand diese Berechnungen der Zeitlosigkeit konsequent interpretiert oder gar ernst genommen. Hat die quantentheoretische Vorhersage recht, sollte es Räume geben, die in einer imaginären, d.h. nicht messbaren Zeit von Elektronen, Photonen, Atomen oder gar Molekülen durchheilt werden können?

Empirische Erkenntnisse über die Größe der Tunnelzeit gab es bislang nicht. Die experimentelle Bestimmung der Tunnelzeit von Elektronen in Halbleiter- oder in Supraleiter-Strukturen scheiterte bis heute an sogenannten parasitären Zeitverlusten. In den Halbleitern und den Supraleiterbauteilen gibt es chemische Verunreinigungen und strukturelle Defekte, mit denen die Elektronen zeitraubend wechselwirken. Diese parasitären Zeitverluste bestimmen bzw. täuschen eine große Tunnelzeit vor. Die sogenannten Halbleiter-Tunnel-Dioden werden also schon lange in der Mikroelektronik eingesetzt, ohne dass man weiß, wie schnell die Elektronen durch den Berg tunneln, und damit, wie schnell das elektronische Mikrobauelement letztlich schalten oder schwingen kann. Vor kurzem gelang nun den zwei russischen Forschern Sekatskii und Letokhov mit einem Elektronenmikroskop eine Elektronen-Tunnelzeit abzuschätzen. Wir kommen noch ausführlicher auf dieses erste erfolgreiche Elektronen-Tunnelzeit-Experiment zurück.

Eine Möglichkeit, die oben beschriebenen experimentellen Schwierigkeiten in elektronischen Systemen zu umgehen, liefert die Mathematik. Es zeigt sich, dass die mathematische Beschreibung des Tunnelns z.B. von Elektronen oder  $\alpha$ -Teilchen die gleiche ist, wie die des Tunnelns von Photonen, d.h. von Lichtteilchen bzw. Lichtwellen. (In der klassischen Physik wird das Tunneln von Licht als das Ausbreiten sogenannter *evaneszenter Moden* bezeichnet). Mathematisch formal gesehen sollten also die Messergebnisse der Tunnelzeiten von Photonen (d.h. von elektromagnetischen Wellen) auf die Tunnelzeiten von Elektronen und anderen Materieteilchen übertragbar sein.

Photonen können, wie schon erwähnt, sowohl als Lichtteilchen als auch als Lichtwellen bzw. allgemeiner als elektromagnetische Wellen beschrieben werden. Wärmestrahlung, Licht, Mikrowellen, Röntgenstrahlen oder Fernseh- und Radiowellen sind alles elektromagnetische Strahlen, die sich lediglich in ihrer Wel-

lenlängen unterscheiden. Die Wellenlänge  $\lambda$  der ausgesendeten Lichtwellen bzw. ihrer Quanten den Photonen, ist dabei umgekehrt proportional zur Frequenz  $f$  und damit auch zu ihrer Energie  $E = hf = hc/\lambda$ .  $h$  ist das zuvor eingeführte, konstante Plancksche Wirkungsquantum und  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Der Energiewert  $E = hf$  ist die kleinste Energie eines Feldes bei der Frequenz  $f$ . Dieser Wert wird im elektromagnetischen Feld Photon genannt. Die Energie eines Feldes kommt also nur in Vielfachen dieses Wertes (Quants) vor.

Die elektromagnetische Strahlung ist dabei um so energiereicher, je höher ihre Frequenz und desto geringer ihre Wellenlänge ist. Es gilt für die Frequenz  $f$  und die Wellenlänge  $\lambda$  über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  die eben schon verwendete, einfache Beziehung:  $f = c/\lambda$  bzw.  $\lambda = c/f$ . In Abbildung 5.13 ist das Spektrum der elektromagnetischen Wellen dargestellt.

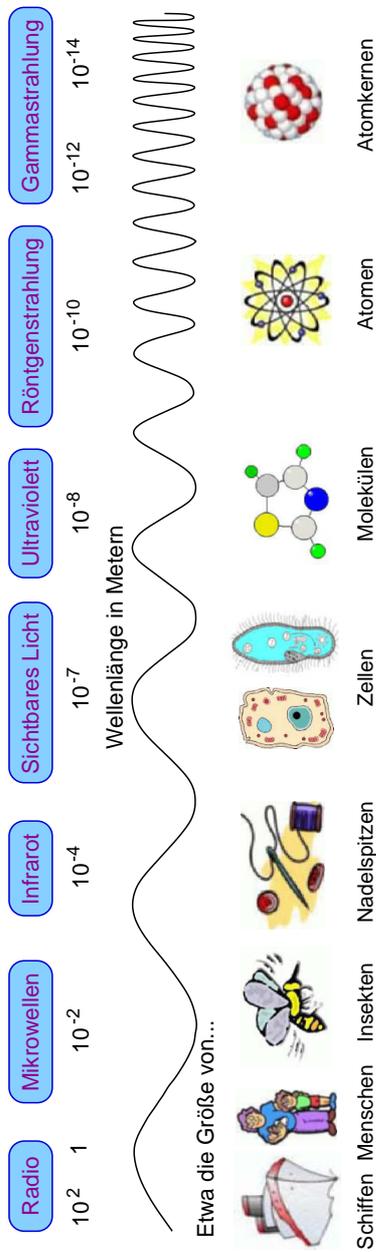


Abb. 5.13: Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen. Zum Größenvergleich der Wellenlängen  $\lambda$  sind Objekte aus dem Alltagsleben sowie aus der Biologie und der Atomphysik angegeben. Die Frequenz  $f$  der Wellen berechnet sich aus der Beziehung  $f = c/\lambda$ , wobei die Lichtgeschwindigkeit  $c = 300000000 \text{ m/s}$  beträgt. So entspricht der Wellenlänge von 30 m eine Frequenz von 10 MHz (KW-Frequenz) oder, anders formuliert, eine Anzahl von 10 000 000 Schwingungen pro Sekunde.

Bei noch relativ niedrigen Frequenzen strahlen Radiosender. Die Haushaltsspannung schwingt sogar bei nur 50 Hz. Radiowellen sind mehrere hundert Meter lang. Mikrowellen (oft auch Radarwellen genannt) haben dagegen Wellenlängen im Zentimeterbereich<sup>2</sup>. Nach der Infrarot-Strahlung im Bereich von einigen Mikrometern, die wir als Wärmestrahlung empfinden, folgt mit Wellenlängen zwischen  $0,4 \mu\text{m}$  und  $0,7 \mu\text{m}$  das für uns sichtbare Licht. Hier befindet sich das Strahlungsmaximum der Sonnenoberfläche entsprechend dem Wienschen Verschiebungsgesetz. Die Sonnenoberflächentemperatur beträgt rund  $6\,000^\circ\text{C}$ , offenbar hat sich das menschliche Auge diesem maximalen Strahlungsbereich angepasst. Betrachtet man noch kleinere Wellenlängen bzw. höhere Frequenzen, gelangt man über die ultraviolette Strahlung zur Röntgenstrahlung und schließlich zur hochenergetischen Gammastrahlung, wie sie beim Zerfall von Atomkernen entsteht.

Zum Vergleich werden hier Wellenlängen von Elektronen angegeben. Die Wellenlänge eines Elektrons ist von seiner Bewegungsenergie abhängig und beträgt z.B. bei einer Beschleunigungsspannung von einem Volt nur etwa  $0,001 \mu\text{m}$ . Hochenergetische Elektronen, wie sie in modernen Beschleunigern mit Beschleunigungsspannungen um 100 GV (=GigaVolt, 1 Giga = 1 000 000 000) vorkommen, haben Wellenlängen von weit weniger als  $10^{-17}$  m. Mit *Licht* dieser Wellenlänge könnten folglich Strukturen im Bereich von  $10^{-17}$  m betrachtet, d.h. *optisch* aufgelöst, werden. (Ein Gegenstand kann nur *gesehen* werden, wenn er größer als die Wellenlänge des *Lichtes* ist. Beim Elektronenmikroskop dient ein Elektronenstrahl als *Licht*.) Das positiv geladene Proton, Baustein des Atomkerns, hat einen Durchmesser von ca.  $10^{-15}$  m, so dass mit solch hochenergetischen Elektronen die inneren Strukturen des Protons untersucht werden können.

---

<sup>2</sup>Unsere Haushaltsmikrowelle arbeitet bei einer Schwingungsfrequenz von 2,45 GHz. Dies entspricht einer Wellenlänge von etwa 12,2 Zentimetern. Satelliten-Fernsehübertragung findet bei 10 GHz mit der entsprechenden Wellenlänge von 3 Zentimetern statt.

Tunnelexperimente mit Photonen im Mikrowellenbereich haben gegenüber dem Elektronentunneln mehrere entscheidende Vorteile. Zum einen besitzen Lichtteilchen keine Masse. Sie haben sehr kleine Energiequanten und sind im Gegensatz zu Elektronen einfacher erzeugbar und nachweisbar. Zum anderen tragen sie keine Ladung, d.h. sie wechselwirken weder untereinander noch mit anderen elektromagnetischen Störstellen. Verwendet man nun zum Tunneln statt sichtbarem Licht Photonen im Frequenzbereich von Mikrowellen, haben diese außerdem eine relativ große, handliche Wellenlänge (Zentimeterbereich), eine Eigenschaft, die das Messen wesentlich erleichtert. Messungen von Distanzen sind im Zentimeterbereich präziser durchführbar als im Mikrometerbereich. Die notwendige hochempfindliche Messtechnik für solche Mikrowellenexperimente zur Zeitauflösung steht seit rund 10 Jahren zur Verfügung.

Es war also sehr verlockend, statt des Elektronentunnelns Analogieexperimente zur Tunnelzeitbestimmung mit Mikrowellen durchzuführen, deren Ergebnisse aufgrund der mathematischen Äquivalenz auf Elektronen, ja ganz allgemein auf alle physikalischen Teilchen übertragbar sind. Wie in der Einleitung schon erwähnt, machten italienische Physiker und Ingenieure im Jahr 1991 den (zunächst fehlerbehafteten) Start hierzu.

## 5.2 Photonische Tunnelstrukturen

Für Elektronen entstehen Berge durch Kernkräfte die beim radioaktiven Kernzerfall durchtunnelt werden. Abstoßende elektrische Coulomb-Kräfte bilden Berge bei der Kernfusion und noch weniger anschaulich bilden beim Halbleiter quantenmechanische Interferenzeffekte verbotene Energielücken, die es zu überwinden gilt. Wie sehen nun Tunnelberge für die Lichtteilchen aus? In Abbildung 5.14 sind drei unterschiedliche photonische Tunnelbarrieren dargestellt.