

Tunneleffekt - klassisch erklärt Der radioaktive Zerfall ist manipulierbar

Petra Schulz

D-38116 Braunschweig, Theodor-Francke-Weg 65

[SCHULZ, P.: Tunneleffekt - klassisch erklärt. In: *Willkommen auf der Tagungs-CD zur 62. Physikerstagung*, Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Regensburg 1998. Layout geändert, Zusammenfassung eingefügt.]

Zusammenfassung

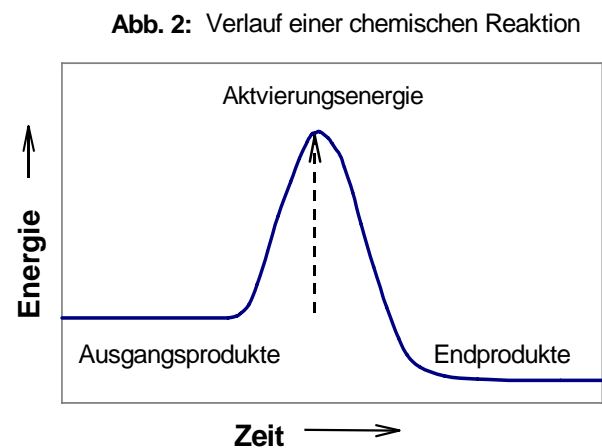
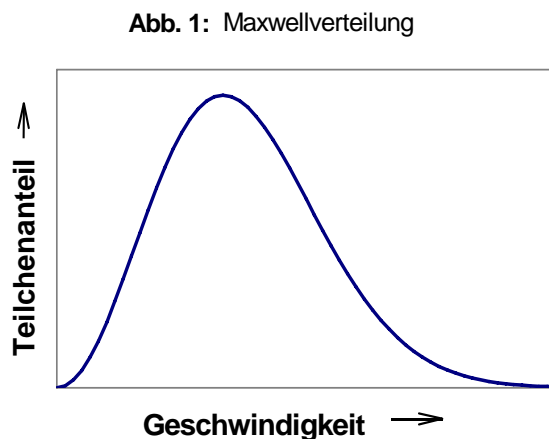
Der Tunneleffekt wird qualitativ über die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung erklärt. Die Zerfallsgeschwindigkeit von β - und α -Strahlern lässt sich geringfügig manipulieren, und zwar durch chemische Veränderung, durch Druck-, Temperaturvariation und durch elektrische sowie magnetische Feldeinflüsse.

Beim Tunneleffekt sollen Teilchen mit unzureichender kinetischer Energie Hinderniswände geisterhaft durchdringen können, weil es die quantenmechanische Argumentation erlaubt. Das bekannteste Beispiel für einen Tunneleffekt ist der radioaktive Zerfall, auf den ich mich im folgenden beschränken möchte.

Für die Fortentwicklung der Naturwissenschaft ist es schädlich zu glauben, daß der radioaktive Zerfall

- durch einen nichtdeterministischen Tunneleffekt vonstatten geht
- und deshalb sich prinzipiell nicht durch äußere Parameter manipulieren läßt.

Schauen wir uns statt der quantenmechanischen Deutung des Tunneleffektes doch lieber die **Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung** von Molekülen an (siehe Abb. 1). Damit ein Molekül, Atom oder allgemein - ein Teilchen - eine größere Energiebarriere überwinden kann, muß es besonders schnell und damit energiereich sein. So muß für das Gelingen einer chemischen Reaktion von den Ausgangs- zu den Endprodukten eine Aktivierungsenergie aufgebracht werden (siehe Abb. 2). Die meisten Partikel der Abb. 1 weisen kleinere Geschwindigkeiten auf, als zur erfolgreichen Reaktion erforderlich sind. Am Maximum der Kurve befinden sich die Teilchen mit der wahrscheinlichsten Geschwindigkeit. Weiter rechts vom Maximum, zu höheren Geschwindigkeiten verschoben, gibt es einige wenige Partikel, die ein größeres Energiehindernis wie die Aktivierungsenergie überwinden können und somit ein Beispiel für einen klassischen Tunneleffekt liefern.



Um den nahtlosen Anschluß von massiven Teilchen zu den Strahlungsteilchen zu erhalten, müssen wir für lichtschnelle Strahlungsteilchen statt der höheren Geschwindigkeit halt eine höhere Energie (Frequenz) abverlangen. Zu den Strahlungsteilchen gehören transversale Photonen, longitudinale Neutrinos und ihre Linearkombinationen. Alle diese Sorten werden im folgenden einfach nur Photonen genannt.

Nach dem vorangegangenen energetischen nun noch einen mechanistischen Aspekt: Chemische Reaktionen lassen sich klassisch erklären: Sie geschehen im allgemeinen, weil Moleküle /Atome oberflächlich mit ihren äußeren Elektronenhüllen zusammenstoßen und sich bei genügendem Energieübertrag (mindestens Aktivierungsenergie) umgruppieren und somit neue Teilchenstrukturen, d. h., neue Moleküle bilden.

Beim radioaktiven Zerfall dürften diese Stöße meistens heftiger sein, so daß ihre Wirkungen bis ins Kerninnere reichen. Als Stoßpartner werden außer den Molekülen und Atomen auch Photonen in Frage kommen. Die Photonen werden vom Energieüberschuß der Moleküle/Atome sowie auch von außen aus der kosmischen Strahlung herrühren.

Der radioaktive Zerfall ist eine Reaktion 1. Ordnung. Die Halbwertszeit ist daher unabhängig von der Konzentration des noch vorhandenen zerfallsfähigen Produktes. Sie ist für jedes radioaktive Isotop eine charakteristische Konstante.

Aller Lehrmeinung zum Trotz läßt sich die Halbwertszeit eines radioaktiven Zerfallsprozesses ein wenig manipulieren. Es liegt nahe, anzunehmen, daß der radioaktive Zerfall von der **Photonenkonzentration und -energie** abhängig ist. Diese beiden Größen kann man erhöhen durch

- Temperatur-,
- Druckerhöhung,
- Anlegen von Magnetfeldern,
- elektrischen Feldern
- oder durch Bestrahlen mit elektromagnetischen Wellen.
- Durch chemische Reaktionen oder auch nur durch Veränderung der chemischen Umgebung

wird indirekt ebenfalls die Photonenkonzentration oder/und -energie verändert.

Zum Glück existieren schon jetzt experimentelle Beweise dafür, daß der radioaktive Zerfall beeinflussbar ist. Hier zunächst eine Aufstellung der **radioaktiven Strahlungsarten**, die wir im folgenden behandeln werden: α -, β -Strahlung (und Verwandtes) sowie γ -Strahlung, s. Tabelle 1. Künstliche Radionuklide waren Hauptgegenstand der Untersuchungen. Deshalb müssen wir auch die weniger gängigen Strahlungsarten β^+ -Emission und β^- -Einfang berücksichtigen, die nur beim künstlichen radioaktiven Zerfall auftreten [5]. Da beim β^- -Einfang i. a. Elektronen aus der Schale eingefangen werden, die dem Kern am nächsten liegt, der K-Schale, nennt man diesen Prozeß auch K-Einfang. β^+ -Emission und β^- -Einfang treten meistens gleichzeitig auf [8].

Strahlungsart	direkt nachweisbar	Bemerkung	Energieverteilung
α -Strahlung	Helium-Kern		breite Linie
β -Strahlung u. ä.: β^- -Emission	Elektron	longitudinal polarisiert	Maxwell-Verteilung
β^+ -Emission *	Positron	longitudinal polarisiert	Maxwell-Verteilung
β^- -Einfang *	Röntgenlicht	K-Einfang	Linie
γ -Strahlung	Röntgenlicht		Linienpektrum

Tabelle 1: Radioaktive Strahlungsarten

* nur bei künstlichen Nukliden

Und nun zu den **experimentellen Beweisen**: Theoretische Berechnungen haben allerdings gezeigt, daß sich beim α -Zerfall äußere Manipulationen auf die Halbwertszeit erst im Bereich von weniger als $1 \cdot 10^{-7}$ auswirken würden, was außerhalb der Nachweisgrenze liegt [1, 2].

Einflußart	manipuliertes System	Zerfallsart	$\Delta\tau/\tau$	Bezugssystem
chemisch	^{90m}Nb -Fluorid	γ	$-3,9 \cdot 10^{-2}$	Metall
	$^{90m}\text{Nb}_2\text{O}_5$	γ	$1,9 \cdot 10^{-2}$	Metall
	$^{64}\text{CuSO}_4$ wäßrig	β^- , β^+ , K-Einfang	$1,7 \cdot 10^{-2}$	Metall
	$[\text{}^{64}\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ wäßrig	β^- , β^+ , K-Einfang	$-0,9 \cdot 10^{-2}$	Metall
	Na^{131}I wäßrig	β	$4,3 \cdot 10^{-2}$	Feststoff
Temperatur	^{99m}Tc bei 4,2 K	γ	$-1 \cdot 10^{-4}$	Metall bei 293 K
Druck	^{90m}Nb bei 0,1 Mbar	γ	$6,3 \cdot 10^{-3}$	Metall Normaldruck
	^{99m}Tc bei 0,1 Mbar	γ	$0,5 \cdot 10^{-3}$	Metall Normaldruck
Magnetfeld	^{90m}Nb bei 0,4 T	γ	$2 \cdot 10^{-3}$	Metall ohne Feld
	^{99m}Tc bei 0,53 T	γ	$-6 \cdot 10^{-3}$	Metall ohne Feld
elektr. Feld	^{99m}Tc bei $2 \cdot 10^4$ V/cm	γ	$1 \cdot 10^{-4}$	Metall ohne Feld
Chemie+ Temperatur	Ti + T ₂ bei 275 °C: T ₂ --> 2T _(in Ti)	β	0,67	Ti + T ₂ bei 115 °C

Tabelle 2: Zur Manipulierbarkeit der Halbwertszeit τ

$$\Delta\tau = \tau(\text{manipuliertes System}) - \tau(\text{Bezugssystem})$$

Etwas anders liegt die Situation beim β -Zerfall (einschließlich ähnlicher Prozesse) und bei der γ -Abstrahlung, die einzeln oder gemischt auftreten können. Bei diesen Prozessen läßt sich die Halbwertszeit durch äußere Parameter (Temperatur-, Druck-, elektromagnetische Feldänderung) bis in den Promillebereich manipulieren, wie im folgenden dargestellt wird, siehe auch Tabelle 2. Mit chemischen Eingriffen sind höhere Beeinflussungen möglich.

a) chemische Beeinflussung [2]

Es existieren zahlreiche Beispiele, aus denen hervorgeht, daß die Halbwertszeit chemisch beeinflussbar ist. Hier sollen nur diejenigen Experimente erwähnt werden, bei denen der Effekt relativ hoch ausgefallen ist, zumindest höher als erwartet.

^{90m}Nb : Durch Aussenden von γ -Strahlung fällt der metastabile Kern ^{90m}Nb in den Grundzustand, also zu ^{90}Nb . ^{90m}Nb -Fluorid strahlt fast 4 % schneller als das Metall, sein Oxid strahlt rund 2 % langsamer als das Metall.

^{64}Cu : ^{64}Cu ist ein sowohl ein β -Strahler, als auch ein Positronen-Strahler und Elektronen-Einfänger. Wäßriges $^{64}\text{CuSO}_4$ zerfällt um rund $2 \cdot 10^{-2}$ mal langsamer als das Metall, der stärkere Komplex $[\text{}^{64}\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{SO}_4$ zerfällt in wäßriger Lösung um rund $1 \cdot 10^{-2}$ mal schneller als das Metall.

^{131}I : ^{131}I ist ein β -Strahler. Na^{131}I zerfällt in wäßriger Lösung um 4 % mal langsamer als im wasserfreien, festen Zustand.

b) Temperatur-Einfluß [2]

Der γ -Strahler ^{99m}Tc gibt bei 4 K um 10^{-4} mal schneller als bei Raumtemperatur seine γ -Strahlung ab.

c) Druck-Einfluß [2]

Bei normalem Druck strahlt ^{90m}Nb um $6 \cdot 10^{-3}$ mal schneller, ^{99m}Tc um $0,5 \cdot 10^{-3}$ mal schneller als bei hohem Druck von 0,1 Mbar.

d) Magnetfeld-Einfluß [2]

Der Einfluß eines starken Magnetfelds wurde auf supraleitende Stoffe untersucht, um mit seiner Hilfe gerade die Supraleitung zu unterdrücken (0,4 T für ^{90m}Nb und 0,5 T für ^{99m}Tc). ^{90m}Nb und ^{99m}Tc zeigten dabei entgegengesetzte Wirkungen auf die Halbwertszeit im Promillebereich. ^{90m}Nb strahlt langsamer im supraleitenden Zustand ohne äußeres Feld, ^{99m}Tc hingegen schneller.

e) Einfluß eines elektrischen Feldes [2]

^{99m}Tc verliert zwischen zwei Kondensatorplatten unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes von $2 \cdot 10^4$ V/cm um $1 \cdot 10^{-4}$ mal langsamer als ohne Feld seine überschüssige γ -Strahlung.

f) Chemie + Temperatur [9]

Ein Experiment aus neuer Zeit ist unbedingt zu nennen: das Aufheizen von unterschüssigem Tritium über Titaneinkristallen. Beim Erwärmen von 115 °C auf 275 °C wurde Tritium in Atome gespalten, die sich in das Titan-Gitter einlagerten. Dadurch stieg die Halbwertszeit von Tritium auf den 1,7-fachen Wert.

g) Photonen-Bestrahlung

Jetzt folgt noch ein kleiner, überwiegend spekulativer Exkurs. Während die bisher genannten äußeren Einflüsse auf die Halbwertszeit wohl mehr oder weniger von Maxwell-verteilten Photonen stammten, so ist es besonders für die Zukunft interessant, die Einwirkung von intensiven elektromagnetischen Strahlen etwa gleicher Energie zu untersuchen.

Einwirkung von Laserstrahlen (wie von einem gepulsten Iod-Laser) soll die Halbwertszeit von β -Strahlern in beachtlichem Maße verkürzen, siehe die theoretischen Ausführungen von Becker und Mitarbeitern (1981) [6].

Des weiteren soll eine Bestrahlung mit intensiven Radiowellen im Fernen Infrarot vermehrt verbotene Spinübergänge verursachen, was gemäß den theoretischen Berechnungen von Reiss [3, 4] zur drastischen Reduzierung der Halbwertszeit radioaktiver Isotope führen müßte. So sollte sich für das natürliche Nuklid ^{113}Cd , ein extremes Beispiel, nach Einbringen von vier Spin-Einheiten die Halbwertszeit von $9,3 \cdot 10^{15}$ auf $1,3 \cdot 10^3$ Jahre reduzieren. Bisherige Untersuchungen an dem β -Strahler ^{137}Cs , der intensiven Radiowellen ausgesetzt wurde, verliefen wegen statistischer Schwankungen nicht eindeutig. Die große Sensation läßt immer noch auf sich warten.

Möglicherweise arbeitet zur Zeit niemand mehr auf diesem Forschungsgebiet, weil die Mehrheit der Forscher an die ewige Gültigkeit des Tunneleffekts glaubt. Bezeichnenderweise werden in einer neueren Auflage des Römpp'schen Chemie-Lexikons [7] die Arbeiten von Becker [6] und Reiss totgeschwiegen.

Ich hoffe nun zum **Schluß** trotz einiger Spekulationen, daß ich hinreichend beweisen konnte, 1. daß man den radioaktiven Zerfall durchaus klassisch erklären kann. 2. sollte gezeigt werden, daß die Halbwertszeit durch chemische und physikalische Einflüsse (Temperatur, Druck, elektromagnetisches Feld) in der Tat verändert werden kann.

Literatur

- [1] http://www.phys.unsw.edu.au/physoc/physics_faq/decay_rates.html
- [2] *Emery, G. T.*: Perturbations of Nuclear Decay Rates. In: Annual Review of Nuclear Science **22**, (1972), S. 165-202
- [3] Verkürzung der Zerfallszeit von Radionukliden. In: Naturwissenschaftliche Rundschau **38** (1985), S. 248
- [4] *Reiss, H. R.*: Nuclear beta decay induced by intense electromagnetic fields: Forbidden transition examples. In: Phys. Rev. C **27** (1985), S. 1229-1243
- [5] *Neumüller, O.-A.*: Römpps Chemie-Lexikon, 8. Auflage, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart 1987, S. 3467, Stichwort „Radioaktivität“
- [6] *Becker, W.; Louisell, W. H.; McCullen, J. D.; Scully, M. O.*: Laser Enhancement of Nuclear β Decay. In: Phys. Rev. Letters **47** (1981), S. 1262-1266
- [7] *Falbe, J; Regitz, M.* (Herausgeber): CD Römpp „Chemie-Lexikon von A-Z“, Version 1.0, Thieme-Verlag 1995
- [8] *Bröcker, B.*: dtv-Atlas zur Atomphysik, dtv GmbH & Co. KG, München 1976
- [9] *Reifenschweiler, O.*: Reduced radioactivity of tritium in small titanium particles. In: Phys. Lett. A, **184** (1994), S. 149-153