

Eine Neudarstellung der Kernphysik für den Unterricht

Friedrich Herrmann

Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

A. Kritische und physikhistorische Bemerkungen zum traditionellen Kernphysik-Unterricht

Der Werdegang der Kernphysik war recht verwickelt. Die historischen Umwege wirken sich sehr stark auf den heutigen Kernphysik-Unterricht aus. Es werden einige historische "Altlasten" vorgestellt, und es wird versucht zu zeigen, wie diese Themen in das Lehrgebäude der Kernphysik hineingelangt sind.

1. Übertriebene Unterscheidung zwischen Prozessen

In der Kernphysik ist es üblich, Unterschiede zwischen Prozessen zu betonen, ohne das Gemeinsame anzusprechen. Eine Folge davon ist, dass der Lernende glaubt, es mit verschiedenen Vorgängen zu tun zu haben, wo es sich tatsächlich nur um wenig unterschiedliche Varianten ein und desselben Prozesstyps handelt.

So unterscheidet man zwischen Radioaktivität, Kernzerfall, Kernspaltung, Kernfusion und Kernreaktion. Jemand, der in der Chemie geschult ist, sieht hier einfach verschiedene Varianten von Stoffumwandlungen. Er würde alle diese Vorgänge Kernreaktionen nennen und würde sie alle mit denselben Regeln und Gesetzen beschreiben. Dass in manchen der Prozesse nur ein Edukt und zwei Produktstoffe, in anderen zwei Edukte und zwei oder drei Produkte etc. auftreten, würde er als ein für das allgemeine Verständnis unwesentliches Detail betrachten. Noch weniger wichtig ist aus dieser Sicht die Unterteilung in natürliche und künstliche Radioaktivität.

Die historischen Ursachen für diese Unterscheidungen sind leicht zu sehen: Die Vorgänge schienen ja tatsächlich ganz verschiedener Natur zu sein. Besonders deutlich ist das bei den sogenannten radioaktiven Prozessen. Was man feststellte, war zunächst nicht eine Reaktion, d.h. das Verschwinden oder Auftauchen neuer Stoffe, sondern man beobachtete Strahlungen. Die Natur dieser Strahlungen war zunächst noch nicht bekannt. Es war also natürlich, solchen Strahlungen als erstes Namen zu geben: α -, β - und γ -Strahlung. Erst später stellte sich heraus, dass es sich dabei um bekannte Stoffe handelte, und dass bei der Kernreaktion auch noch andere Stoffe entstanden waren, die sich allerdings nicht so auffällig bemerkbar gemacht hatten.

2. Neue Bezeichnungen für Konzepte, die es schon lange gab

Es gab sie schon in der Chemie. Das Rad wurde gewissermaßen zum zweiten Mal erfunden.

Was in der Kernphysik ein Kernzerfall oder eine spontane Kernspaltung ist, ist bei der Atomhülle eine monomolekulare Reaktion. Was in der Kernphysik Kettenreaktion heißt, ist bei den Chemikern eine autokatalytische Reaktion. Was in der Kernphysik ein Prozess mit γ -Strahlung genannt wird, heißt in der Chemie Lumineszenz.

Was in der Kernphysik Aktivität genannt wird und die Maßeinheit Becquerel hat, heißt in der Chemie Reaktionsgeschwindigkeit oder Umsatzrate und wird in mol/s gemessen.

Man betont in der Kernphysik besonders das exponentielle Abklingen von Stoffmengen, als wäre es in der Chemie nicht gang und gäbe.

Dass man Kernreaktionen mit denselben Methoden beschleunigen kann, wie Reaktionen der Atomhülle, nämlich erstens durch Erhöhen der Temperatur – wie im Fusionsreaktor – und zweitens durch Zugabe eines Katalysators – wie im normalen Kernreaktor –, wird dem Lernenden nicht bewusst gemacht.

Auch diese Mängel sind historisch begründet. Dass Kernreaktionen so perfekt, und nicht nur zufälligerweise mit chemischen Reaktionen übereinstimmen, ist erst am Ende eines längeren Entwicklungsprozesses klargeworden.

3. Kernreaktionen mit kleinen und mit großen Reaktionsgeschwindigkeiten

Diejenigen Kernreaktionen, die im Unterricht vorwiegend behandelt werden, sind aus heutiger Sicht eher die unwichtigen, und zwar deshalb, weil die Reaktionsumsätze so winzig sind. Es sind die Vorgänge, die man als Strahlungen bezeichnet. Dass man den Ablauf einer Reaktion überhaupt feststellt, verdankt man eigentlich nur einem Trick. Man benutzt zum Nachweis Geräte, die eine Verstärkung von etwa 10^9 bewirken. Der Eindruck, der entsteht, wenn das Zählgerät klickt, ist dem Effekt gar nicht angemessen.

Während man also die kleinen Effekte gewaltig hervorhebt, werden andere Anwendungen von Kernreaktionen, die wirklich eine große Rolle spielen, kaum angesprochen: die in der Sonne und in anderen Sternen.

Auch hier lässt es sich gut historisch verstehen, wie es zu dieser Gewichtung gekommen ist. Zum einen waren die Strahlungen diejenigen Kernreaktionen, die man als erste entdeckt hatte. Sie waren der erste Hinweis darauf, dass sich die Atomkerne, die man bis dahin für unveränderlich gehalten hatte, doch verändern können. Sie stellten damit natürlich etwas ganz Unerhörtes dar.

Zum zweiten waren neue Strahlungen zu dieser Zeit, d.h. etwa zur Jahrhundertwende ein Modethema. Bei einer neu entdeckten Strahlung konnte man auf den Nobelpreis hoffen. Abgesehen davon, dass Strahlungen auch heute noch eine irrationale Attraktivität haben. Wir kennen heute zwei Anwendungen von Kernreaktionen, bei denen die Umsatzraten groß sind: die Reaktionen, die in der Sonne und in anderen Sternen ablaufen, und die in Kernreaktoren und in Endlagern. Beide waren aber in der Anfangszeit noch nicht bekannt. Die Funktionsweise der Sterne begann man erst Ende der zwanziger Jahre zu verstehen, und Kernreaktoren gab es noch nicht.

4. Strahlungsmessgeräte

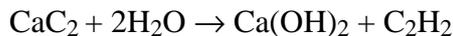
Eine weitere Unstimmigkeit des Kernphysikunterrichts ist, dass man der Funktionsweise von Strahlungsmessgeräten so viel Unterrichtszeit widmet. Wenn man die Wichtigkeit dieser Geräte als Allgemeinbildungsgut beurteilen will, muss man sie vergleichen mit anderen Messgeräten, Nachweisgeräten und Sensoren. Solche gibt es nun unzählige – unter ihnen sicher wichtigere als den Geigerzähler –, die mit keinem Wort erwähnt werden, z.B. die Quarzuhr, die digitale Waage oder das Thermoelement. Die unserer Meinung nach interessanteste Eigenschaft, der wichtigste Trick, des Geigerzählers und aller anderen Kernstrahlungsnachweisgeräte, nämlich der hohe Verstärkungsfaktor, wird gewöhnlich gar nicht erwähnt.

B. Eine Neudarstellung der Kernphysik

1. Ein Blick auf die Chemie der Hülle

Zunächst die Ziele, die wir im Unterricht erreichen wollen. Es sind im Wesentlichen dieselben wie die der Chemie. Der einzige wichtige Unterschied ist, dass die stofflichen Veränderungen, mit denen sich die Chemie befasst, auf Änderungen der Atomhüllen beruhen, während Kernprozesse, wie der Name sagt, mit Änderungen der Kernstruktur zu tun haben.

Wir wollen an die wichtigsten Aufgaben der Chemie erinnern. Eins der zentralen Anliegen der Chemie ist die Synthese von Stoffen. Das erste was man macht, wenn man einen neuen Stoff herstellen will, ist, eine Reaktionsgleichung einzurichten. Was tut man dabei eigentlich? Wir erläutern es an einem Beispiel. Wir wollen Ethin herstellen. Wir finden, dass es so gehen könnte:



Was haben wir beim Einrichten der Gleichung gemacht? Wir haben dafür Sorge getragen, dass bestimmte Erhaltungssätze befriedigt werden. Für die Reaktionen der Chemie gilt die Erhaltung der Stoffmengen aller chemischen Elemente. Es gibt also grob 100 Erhaltungssätze. Diese wurden beim Einrichten der Gleichung beachtet. Außerdem wurde noch einem weiteren Erhaltungssatz Rechnung getragen – der Ladungserhaltung. Man sieht es etwa an dieser Reaktionsgleichung:



Die nächste Frage, die sich gewöhnlich stellt, ist: In welche Richtung läuft die Reaktion? Läuft sie in die Richtung, die wir möchten? Diese Frage beantwortet die Chemie, indem sie die Änderung des chemischen Potentials berechnet.

Dann wird man danach fragen, wie schnell die Reaktion läuft. Läuft sie schnell genug für unsere Zwecke, wie kann man sie eventuell beschleunigen? Man fragt also nach dem Reaktionswiderstand.

Schließlich fragt man noch nach Energie- und Wärmebilanz der Reaktion.

Wir schlagen vor, dass genau diese auch die wichtigen Fragen im Zusammenhang mit Kernreaktionen sein sollten. Im folgenden wird gezeigt, wie wir sie im Unterricht beantworten.

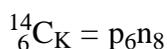
2. Der vorangegangene Unterricht

Der Kernphysikkurs, den wir hier vorstellen, wurde in mehreren zehnten und zwölften Klassen erprobt. Er dauert etwa 15 Unterrichtsstunden¹.

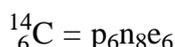
Den ersten Teil schildern wir nur in groben Zügen.

Wir beginnen mit dem Aufbau der Kerne aus Protonen und Neutronen und mit den Eigenschaften dieser Bausteine. Die Begriffe Element, Nuklid und Isotop werden eingeführt. Die Schüler lernen die symbolische Darstellung von Nukliden kennen, also etwa ${}^{14}_6\text{C}_K$ und ${}^{14}_7\text{N}_K$

Wir führen aber noch eine alternative Schreibweise ein, eine Darstellung, die sich an der Chemie orientiert – nämlich als Gehaltsformel. So schreiben wir für den C-14-Kern auch:



Für das ganze Atom kommt noch Elektronen hinzu:



Die Schüler lernen, dass man Kerne, genauso wie die Hülle, anregen kann, und dass bei der Rückkehr in den Grundzustand ein Photon emittiert wird.

Sie erfahren auch schon gleich zu Anfang des Kernphysikunterrichts, dass Reaktionen stattfinden können, bei denen sich die Kerne verändern. Sie kennen von früher her die Gleichheit von Masse und Energie, und sie kennen den Begriff Ruhenergie.

Wir diskutieren dann die Möglichkeit, einen Kern auseinanderzunehmen. Um ein Proton oder ein Neutron abzutrennen, braucht man eine bestimmte Energiemenge. Die Schüler bekommen eine Tabelle, in der für jedes Nuklid die "Trennenergie" aufgeführt ist: die Energie, die man braucht, um den Kern des Nuklids vollständig, d. h. in alle seine einzelnen Protonen und Neutronen zu zerlegen.

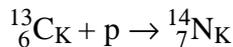
3. Der Unterricht

3.1 Erhaltungsgrößen

Von hier an wird die Unterrichtsbeschreibung etwas genauer.

Es ist unser Ziel, Kernreaktionen zu beschreiben. Die Fragen, die wir stellen, sind denen ganz ähnlich, die sich die Chemiker stellen. Welche Reaktionen sind möglich? In welche Richtung läuft eine Reaktion? Wie kann man die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen? Wie ist die Energiebilanz?

Wir beginnen damit, dass wir daran erinnern, wie man eine chemische Reaktionsgleichung einrichtet, und dass man sich dabei die Erhaltung bestimmter Größen zunutze macht. Wir betrachten eine Kernreaktion, von der wir wissen, dass sie geht:



und wir stellen fest, dass hier die Regel der Chemiker nicht gilt, derzufolge die Stoffmengen der Elemente links und rechts gleich sind. Welche Kernreaktionen sind denn nun erlaubt? Ist etwa jede beliebige Kernumwandlung möglich? Keineswegs! Die Beobachtung von Kernreaktionen hat gezeigt, dass manche Reaktionen möglich sind, viele andere aber nicht. Aus der systematischen Untersuchung solcher Reaktionen hat man geschlossen, dass auch für Kernreaktionen Erhaltungsgrößen zuständig sind. Zum einen muss auch hier die elektrische Ladung erhalten sein. Außerdem, so hat man festgestellt, sind noch zwei weitere Erhaltungsgrößen wirksam, die man bis dahin noch nicht kannte. Man hat sie erst beim Studium von Kernreaktionen entdeckt. Man nannte sie die *baryonische Ladung* und die *leptonische Ladung*.

Für jeden Kern oder jedes andere Teilchen hat sowohl die baryonische als auch die leptonische Ladung einen bestimmten Wert. Die baryonische Ladung muss nun für die Stoffe auf der linken Seite der Reaktionsgleichung denselben Wert haben wie für die Stoffe auf der rechten Seite, und das Analoge muß für die leptonische Ladung gelten. Man sieht: Es ist genauso wie bei der elektrischen Ladung, für die die Gleichheit natürlich nach wie vor gelten muss.

Bei chemischen Reaktionen sind die Anzahlen der Atome der Elemente und die elektrische Ladung Erhaltungsgrößen.

Bei Kernreaktionen sind elektrische Ladung, baryonische Ladung und leptonische Ladung Erhaltungsgrößen.

Bevor wir unser Ziel, d. h. das Einrichten einer Reaktionsgleichung, weiter verfolgen, müssen wir unsere Kenntnisse über Elementarteilchen erweitern.

3.2 Teilchen und Antiteilchen

Uns waren, als Bestandteile von Kern und Hülle, bisher drei verschiedene Arten von elementaren Teilchen begegnet: die Elektronen, die Protonen und die Neutronen. Man hat nun außer diesen dreien noch einige andere entdeckt. Der größte Teil der uns umgebenden Materie besteht allerdings aus diesen drei Teilchenarten, und die weiteren Teilchen, die wir jetzt kennenlernen werden, werden vorwiegend künstlich erzeugt.

Die Betrachtung dieser neuen Teilchen scheint unsere Aufgabe zunächst nur komplizierter zu machen. Wir werden aber schnell sehen, dass am Ende eine große Vereinfachung herauskommt. Alle Teilchen, mit denen wir es zu tun haben werden, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Name, Symbol	Ruhenergie	Ladung		
		elektrische	baryonische	leptonische
Photon γ	0 pJ	0	0	0
Elektron e	0,082 pJ	-1	0	1
Antielektron \bar{e}	0,082 pJ	1	0	-1
Neutrino ν	0 pJ	0	0	1
Antineutrino $\bar{\nu}$	0 pJ	0	0	-1
Proton p	150,320 pJ	1	1	0
Antiproton \bar{p}	150,320 pJ	-1	-1	0
Neutron n	150,525 pJ	0	1	0
Antineutron \bar{n}	150,525 pJ	0	-1	0

Tabelle 1

Diskussion der Tabelle:

Die alten Bekannten

In der linken Spalte stehen die Namen der Teilchen. Vier dieser Teilchen sind alte Bekannte: das Photon, das Elektron, das Proton und das Neutron.

Das Neutrino

Eigentlich sollte es auch ein alter Bekannter sein, denn die Welt ist voll davon. Es sind Teilchen, von denen sehr viele frei herumfliegen. Sie kommen vor allem von der Sonne. Man merkt von diesen Neutrinos so wenig, weil sie alle Materie fast ungehindert durchdringen. Es gibt daher fast keine Reaktion, mit der man sie nachweisen könnte. Die meisten der Sonnenneutrinos durchdringen die ganze Erde, ohne mit irgendeinem anderen Teilchen zu reagieren.

Neutrinos reagieren nur sehr schwach mit anderen Teilchen.

Antiteilchen

Die Tabelle enthält noch vier weitere Teilchen. Die Namen dieser Teilchen beginnen alle mit dem Bestimmungswörtchen "Anti-": das Antielektron, das Antineutrino, das Antiproton und das Antineutron. Man überzeugt sich leicht davon, dass sie eine große Ähnlichkeit mit den entsprechenden Teilchen ohne das Bestimmungswort haben: Sie stimmen mit diesen völlig überein, bis auf die Vorzeichen der drei Ladungen. So hat das Proton eine positive elektrische und eine positive baryonische Ladung, das Antiproton hat negative elektrische und baryonische Ladung.

Man sagt, das Antiproton ist das Antiteilchen zum Proton, und das Proton ist das Antiteilchen zum Antiproton. Teilchen und Antiteilchen bilden also ein Pärchen von zwei sehr ähnlichen Partnern.

Teilchen und Antiteilchen unterscheiden sich im Vorzeichen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung.

Außerdem entnehmen wir der Tabelle:

Elektronen und Neutrinos, sowie deren Antiteilchen tragen leptonische Ladung.

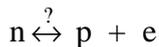
Protonen und Neutronen, sowie deren Antiteilchen tragen baryonische Ladung.

Zum Photon gibt es kein Antiteilchen.

3.3 Ladungsbilanzen – das Einrichten der Reaktionsgleichung

Wir sind nun in der Lage, eine Reaktionsgleichung einzurichten. Wir betrachten zunächst einige sehr einfache Beispiele.

Gibt es eine Reaktion

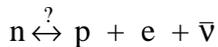


bei der sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron verwandelt? Wir machen die Bilanzen von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung:

	$n \overset{?}{\leftrightarrow} p + e$	
elektrische Ladung	0	$1 + (-1)$
baryonische Ladung	1	$1 + 0$
leptonische Ladung	0	$0 + 1$

Die elektrische Ladung von Edukten und Produkten ist dieselbe, nämlich null. Die Erhaltung der elektrischen Ladung wird also befolgt. Auch die baryonische Ladung hat links und rechts denselben Wert, nämlich 1. Die leptonische Ladung dagegen bliebe bei der Reaktion nicht erhalten: Sie ist null für die linke und eins für die rechte Seite. Die Reaktion kann daher nicht ablaufen, und zwar weder von links nach rechts, noch von rechts nach links.

Wir können die Reaktionsgleichung aber leicht reparieren, etwa indem wir rechts noch ein Antineutrino hinzufügen:



Diesmal stimmt die Bilanz:

	$n \overset{?}{\leftrightarrow} p + e + \bar{\nu}$		
elektrische Ladung	0	$1 + (-1) + 0$	
baryonische Ladung	1	$1 + 0 + 0$	
leptonische Ladung	0	$0 + 1 + (-1)$	

Auch die leptonische Ladung ist jetzt links und rechts gleich, nämlich null.

3.4 Die Reaktionsrichtung

Eine wichtige Frage ist noch offen: In welche Richtung läuft die Reaktion, die wir eingerichtet haben?

Die Entscheidung hierüber können wir wieder durch Anwendung eines Erhaltungsgesetzes treffen. Wir haben bis jetzt noch nicht die Energieerhaltung berücksichtigt. Auch die Energiebilanz einer Reaktion muß natürlich stimmen. Die Energie von Edukten und Produkten muß gleich sein. Wenn wir die Ruhenergie der Teilchen auf der einen Seite einer Reaktionsgleichung mit der der anderen Seite vergleichen, so werden wir es allerdings nie erleben, daß die Energien genau gleich sind. Tatsächlich brauchen aber die Ruhenergien auch gar nicht übereinzustimmen.

Wenn die Ausgangskerne oder -teilchen ruhen, so ist die Energie der Ausgangsteilchen gleich der Summe der Ruhenergien dieser Teilchen. Die gesamte Ruhenergie der entstehenden Teilchen darf sicher nicht größer sein als die der Ausgangsteilchen. Sie darf aber sehr wohl kleiner sein. In diesem Fall bliebe etwas Energie übrig. Diese übrige Energie lässt sich aber immer unterbringen: Sie kann den entstehenden Teilchen einfach als kinetische Energie mitgegeben werden. Also:

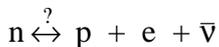
Eine Kernreaktion läuft so, daß die Ruhenergie der beteiligten Kerne und Teilchen abnimmt.

Um zu entscheiden, in welche Richtung eine Reaktion läuft, müssen wir daher die gesamte Ruhenergie der Teilchen der linken Seite mit der der rechten vergleichen.

Wir gehen nun mit unseren neuen Werkzeugen an die Arbeit. Wir wollen untersuchen, in welche Richtung eine Reaktion läuft.

Sind Neutronen stabil?

Die Reaktion



ist in Ordnung, was die Bilanz von elektrischer, baryonischer und leptonischer Ladung betrifft. Wir hatten uns davon schon überzeugt. Es fehlt noch die Energiebilanz. Wir fügen sie in die Tafel mit den Ladungsbilanzen ein: die Summe der Ruhenergien der linken Seite und die Summe der Ruhenergien der rechten Seite. Wir entnehmen die Ruhenergien der einzelnen Teilchen Tabelle 1.

	$n \overset{?}{\leftrightarrow} p + e + \bar{\nu}$	
elektr. L.	0	1 + (-1) + 0
baryon. L.	1	1 + 0 + 0
lepton. L.	0	0 + 1 + (-1)
Ruhenergie	150,525	150,320 + 0,082 + 0
Summe	150,525	150,402

Die Ruhenergie des Neutrons ist größer als die von Proton, Elektron und Antineutrino zusammen. Die Reaktion läuft also von links nach rechts.

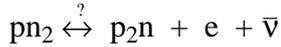
Tatsächlich beobachtet man, dass freie Neutronen, d.h.. Neutronen, die nicht in einem Kern gebunden sind, von selbst zerfallen. Man kann Neutronen künstlich erzeugen. Sie zerfallen aber, wenn man sie vorsichtig aufbewahrt, in wenigen Minuten. Tatsächlich ist ihre Lebensdauer meist viel kürzer, denn sie sind sehr reaktionsfreudig und verbinden sich schnell mit den verschiedensten Atomkernen, die sie antreffen.

Ist Tritium stabil?

Wir versuchen es mit einem Zerfall in einen Heliumkern, ein Elektron und ein Antineutrino:



Der Übersichtlichkeit halber tragen wir die Reaktionsgleichung in Zukunft immer als Gehaltsformel in die Tabelle ein.



Die Ladungsbilanzen sind in Ordnung.

	$\text{pn}_2 \overset{?}{\leftrightarrow} \text{p}_2\text{n} + e + \bar{\nu}$	
elektr. L.	1	2 + (-1) + 0
baryon. L.	3	3 + 0 + 0
lepton. L.	0	0 + 1 + (-1)
Ruhenergie Teilchen	150,320 + 2 · 150,525	2 · 150,320 + 150,525 + 0,082
- Trennenergie	1,36	1,24
Summe	450,01	450,007

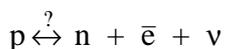
Wir berechnen die Ruhenergie eines Kerns, indem wir von der Ruhenergie der Teilchen, aus denen er besteht, die Trennenergie abziehen.

Die Trennenergien von pn_2 und p_2n wurden aus der Tabelle, die die Schüler haben, abgelesen. Die linke Summe ist größer als die rechte, die Reaktion kann also von links nach rechts laufen.

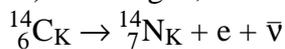
Tatsächlich ist Tritium instabil. Die Schüler lernen, dass Tritium in gewöhnlichem Wasser auftritt, und dass es durch die kosmische Strahlung entsteht.

Wir beherrschen jetzt das Verfahren, das uns gestattet, von jeder beliebigen Kernreaktion zu entscheiden, ob sie möglich ist oder nicht, und wir betrachten noch eine ganze Reihe von Beispielen:

1) Wir zeigen, dass Protonen stabil sind:



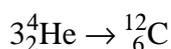
2) Wir zeigen, dass das Kohlenstoffisotop C-14 zerfällt:



3) Wir zeigen, dass U-235 zerfällt:



4) Wir untersuchen eine Reaktion, die in Sternen abläuft, und die für die Entstehung des Kohlenstoffs im Universum zuständig ist:



5) Wir untersuchen die Reaktionen, die man als Strahlungen bezeichnet, genauer, die Alpha-, die Betaplus- und die Betaminusstrahlung.

3.5 Die Umsatzrate von Kernreaktionen

Dass wir von Kernreaktionen im täglichen Leben so wenig merken, liegt daran, dass diese Reaktionen im Allgemeinen sehr langsam ablaufen. Wir vergleichen die Umsatzraten typischer Kernreaktionen mit denen typischer chemischer Reaktionen. In der Chemie misst man die Umsatzraten in mol pro Sekunde.

Bei Kernreaktionen sind die Umsatzraten oft so gering, dass man auch mit den bekannten Bestimmungswörtern wie nano, pico oder femto nicht mehr auskommt. Man gibt daher den Umsatz nicht mehr in mol/s an, sondern durch die Anzahl der Elementarreaktionen pro Sekunde: die Anzahl der Kerne die zerfallen sind, oder die gebildet worden sind. Wir führen das Becquerel ein und den Zusammenhang zum mol/s.

Oft möchte man eine chemische Reaktion beschleunigen, man möchte die Umsatzrate vergrößern. Man kann das mit zwei verschiedenen Methoden erreichen:

- durch Erhöhen der Temperatur;
- durch Zugabe eines Katalysators (eines Stoffs, dessen Menge sich beim Reaktionsablauf nicht ändert).

Genauso kann man nun bei Kernreaktionen verfahren.

Kernreaktionen lassen sich wie chemische Reaktionen beschleunigen durch

- *Temperaturerhöhung;*
- *Verwendung eines Katalysators.*

Um die Umsatzrate durch Temperaturerhöhung merklich zu vergrößern, braucht man allerdings Temperaturen die um einen Faktor von etwa einer Million höher sind, als die Temperaturen, die in der normalen Chemie wirksam sind. Die Energieproduktion in der Sonne und in anderen Sternen funktioniert über Kernreaktionen. Die Temperatur im Innern der Sonne beträgt etwa 15 Millionen Kelvin. Für eine Kernreaktion ist das eine recht niedrige Temperatur. Ein anderes Beispiel für die Erhöhung der Umsatzrate mit Hilfe hoher Temperaturen ist der *Fusionsreaktor*. Hier heizt man die Edukte auf eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin.

Die katalytische Beschleunigung einer Kernreaktion geschieht ebenfalls in der Sonne. Als Katalysator wirken hier Kohlenstoffkerne. Auch die Uranspaltung, die man in Kernreaktoren ausnutzt, würde unter normalen Umständen viel zu langsam laufen. Sie wird im Reaktor katalytisch beschleunigt. Als Katalysator wirken hier Neutronen.

3.6 Die Sonne

Es folgt unsere wichtigste Anwendung. Allerdings beschreiben wir sie hier nicht, da sie Gegenstand eines Vortrags auf einer anderen DPG-Tagung war^{2,3}.

3.7 Der Kernreaktor

Auch dem Kernreaktor wird recht viel Zeit gewidmet. Wir machen aber hier nur einige kurze Bemerkungen.

Eine Reaktion, bei der das Uran-235 unter Energieabgabe zerfällt, hatten wir schon kennengelernt:



Wir hatten auch schon gelernt, dass die Reaktion einen sehr hohen Reaktionswiderstand hat, und von selbst praktisch nicht abläuft. Nun lässt sich die Reaktion besonders be-

quem katalytisch beschleunigen, nämlich mit Neutronen. Eine Besonderheit dieser Reaktion besteht nun darin, dass der Katalysator bei der Reaktion selbst entsteht. Die Chemiker nennen eine solche Reaktion eine autokatalytische Reaktion.

C. Schlussbemerkungen

Die Kernphysik ist stärker als andere Unterrichtsthemen durch eine umwegreiche historische Entwicklung geprägt. Wir haben eine Neufassung vorgestellt, bei der versucht wurde, historische Altlasten weitgehend zu eliminieren. Einige Besonderheiten dieser Darstellung sind:

- Verschiedene Reaktionstypen (natürliche und künstliche Radioaktivität, Kernspaltung, Kernfusion) werden einheitlich beschrieben.
- Der Aufbau orientiert sich am Begriffssystem der Chemie.
- Zum Einrichten von Reaktionsgleichungen bilanziert man die elektrische, die baryonische und die leptonische Ladung.

Literatur

¹FRIEDRICH HERRMANN, Der Karlsruher Physikkurs, Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, AULIS Verlag Deubner, Köln, 1998.

²H. HAUPTMANN, F. HERRMANN, Was die Sonne im Innersten zusammenhält..., 60. Physikertagung, Jena 1996, Fachverband Didaktik der Physik, S. 407-410.

³F. HERRMANN, H. HAUPTMANN, Understanding the stability of stars by means of thought experiments with a model star, Am. J. Phys. **65** (1997), p. 292-295.