Von den Röntgenstrahlen zum Fusionskraftwerk

Volkshochschule Rapperswil-Jona

30. September 2008

Arthur Ruh

Autor:
Dr. Arthur Ruh
Säntisweg 4
CH-8630 Rüti ZH
Switzerland

Copyright © Arthur Ruh 2008

Dieses Skript kann von der Webseite
www.twintech.ch/aruh/
heruntergeladen werden. Es darf nur als Ganzes und in unveränderter Form vervielfältigt und weitergegeben werden. Jede andere Verwendung, insbesondere die Übersetzung in andere Sprachen, das Zurverfügungstellen auf anderen Webseiten, die elektronische Verarbeitung und die Entnahme von Grafiken und Textstellen in irgendeiner Form ist ohne schriftliche Einwilligung des Autors nicht gestattet. Die Nutzung zu kommerziellen Zwecken ist untersagt.

Vorwort

Dieses Skript ist eine (beträchtlich) erweiterte und leicht modifizierte Fassung des Vortrags

„Von den Röntgenstrahlen zum Fusionskraftwerk“,

den ich am 30. September 2008 an der Volkshochschule Rapperswil-Jona gehalten habe.

Der Inhalt des Vortrags ist eine kurze und unvollständige Geschichte der Entwicklung der Kernphysik, wobei das Schwergewicht auf den technischen Anwendungen liegt. An einer Universität würde eine solche Vorlesung vielleicht unter dem Titel „Ausgewählte Kapitel zur Geschichte der Kernphysik“ angekündigt. Streng genommen gehören die Röntgenstrahlen nicht zur Kernphysik, sondern zur Atomphysik, aber wenn die Entdeckung der Radioaktivität geschildert wird, muss fast zwangsläufig vorher über die Entdeckung der Röntgenstrahlen berichtet werden.

Das Skript enthält einige Ergänzungen, die im Vortrag aus Zeitgründen nicht behandelt werden konnten. Andererseits fehlen die vielleicht spontanen Bemerkungen im Vortrag, da dieser frei gehalten wurde, ohne dieses Skript zu verwenden.

Ferner enthält das Skript einige einfache physikalische Gleichungen. Leserinnen und Leser, die nicht über die entsprechenden mathematischen Kenntnisse verfügen, können ohne weiteres über diese Formelzeilen hinweglesen. Alles Wesentliche ist auch in Worten ausgedrückt.

Die wichtigsten mathematischen und physikalischen Begriffe und Gesetze, die in diesem Skript verwendet werden, sind im Anhang kurz und einfach erklärt.

Ganz herzlich danke ich meiner Frau Katharina für ihre sorgfältige Überprüfung des Textes und ihre Verbesserungsvorschläge. Für alle noch vorhandenen Fehler bin jedoch ich allein verantwortlich.

Rüti ZH, September 2008

Arthur Ruh

Inhaltsverzeichnis

1 Röntgenstrahlen **1**

1.1 Gasentladungen 1

1.2 Entdeckung der Röntgenstrahlen 3

1.3 Anwendungen der Röntgenstrahlen 5

2 Radioaktivität **7**

2.1 Entdeckung der Radioaktivität 7

2.2 Medizinische Anwendungen radioaktiver Substanzen 11

2.2.1 Wundermittel 11

2.2.2 Radonkuren 13

2.2.3 Diagnostische Anwendungen 14

2.2.4 Therapeutische Anwendungen 14

2.3 Technische Anwendungen radioaktiver Substanzen 14

2.3.1 Glas und Keramik 14

2.3.2 Röntgenfluoreszenzanalyse 15

2.3.3 Diagnostische Anwendungen 16

2.3.4 Aktivierungsanalyse 16

2.3.5 Rauchmelder 17

2.3.6 Leuchtfarben 17

2.3.7 Radionuklidbatterien 18

2.3.8 Technische Bestrahlungen 18

3 Biologische Wirkungen ionisierender Strahlungen **20**

3.1 Strahlendosis 21

3.2 Äquivalentdosis 21

3.3 Strahlenbelastung 22

3.3.1 Natürliche Strahlenbelastung 22

3.3.2 Künstliche Strahlenbelastung 24

3.4 Biologische Effekte ionisierender Strahlung 25

3.5 Einfluss der Bestrahlungsweise . . . 25
3.6 Stochastische und nichtstochastische Strahlenschäden . . . 26
3.7 Hormesis . . . 28

4 Ein geisterhaftes Teilchen 30

4.1 Das Rätsel des Betazerfalls . . . 30
4.2 Die Neutrinohypothese . . . 31
4.3 Der Nachweis des Neutrinos . . . 31
4.4 Teilchen und Antiteilchen . . . 32

5 Atomkern 34

5.1 Thomsonsches Atommodell . . . 34
5.2 Rutherfordsches Streuexperiment . . . 35
5.3 Rutherfordsches Atommodell . . . 37
5.4 Erstes Modell des Atomkerns . . . 38
5.5 Entdeckung des Neutrons . . . 40
5.6 Kernkräfte . . . 41
5.7 Bindungsenergie . . . 42
5.8 Tröpfchenmodell . . . 43
5.9 Teilchenbeschleuniger und Teilchenphysik . . . 43

6 Kernspaltung und Kettenreaktion 45

6.1 Neue Isotope . . . 45
6.2 Entdeckung der Kernspaltung . . . 47
6.3 Kettenreaktion . . . 49
6.4 Kritikalität . . . 50

7 Atombomben 52

7.1 Einsteins Brief . . . 52
7.2 Uran-235 . . . 53
7.3 Plutonium . . . 55
7.4 Zwei Wege zur Atombombe . . . 55

7.5 Organisation des Atomwaffenprogramms 56
7.6 Los Alamos 59

8 Urananreicherung **61**

8.1 Gaszentrifugen 63
8.2 Elektromagnetische Separation 63
8.3 Gasdiffusion 68
8.4 Thermodiffusion 73
8.5 Trenndüsen 75
8.6 Laser 76

9 Erste Kernreaktoren **77**

9.1 Chicago-Pile 1 77
9.1.1 Bau des Chicago-Pile 1 77
9.1.2 Erste selbsterhaltende Kettenreaktion 79
9.1.3 Geheimhaltung 81
9.2 Clinton-Pile 81
9.3 Hanford-Reaktoren 83

10 Atomantriebe: Utopien und Realitäten **86**

10.1 Atomkraftwerke 86
10.2 Atomautos 88
10.3 Atomlokomotiven 90
10.4 Atomflugzeuge 92
10.5 Atomraketen 95
10.5.1 Nuklearthermische Raketen 95
10.5.2 Gepulste Nuklearantriebe 98
10.6 Atomschiffe 99
10.6.1 Unterseeboote 99
10.6.2 Flugzeugträger 100
10.6.3 Kreuzer 101

10.6.4 Eisbrecher . . . 101
10.6.5 Handelsschiffe . . . 101

11 Fusion **104**

11.1 Fusionsreaktionen . . . 104
11.2 Thermonukleare Plasmen . . . 105
11.3 Einschluss des Plasmas . . . 105
11.4 Magnetischer Einschluss . . . 106
11.4.1 Stellarator . . . 108
11.4.2 Tokamak . . . 109
11.4.3 Verluste und Instabilitäten . . . 110
11.4.4 JET . . . 112
11.4.5 ITER . . . 113
11.5 Trägheitseinschluss . . . 115
11.5.1 Kompression und Aufheizung des Fusionsbrennstoffs . . . 115
11.5.2 Pellets . . . 116
11.5.3 Shiva . . . 117
11.5.4 Nova . . . 118
11.5.5 National Ignition Facility . . . 118
11.6 Prinzip eines Fusionsreaktors . . . 120
11.7 Brennstoff . . . 120
11.8 Reaktorprobleme . . . 120
11.9 Sicherheitsprobleme . . . 121
11.10 Der lange Weg zum Fusionsreaktor . . . 121

Karten **124**

Anhang A
Statistische Schwankungen **130**

Anhang B

Mathematische und physikalische Begriffe und Gesetze 132

A . . . 132

allotrope Modifikationen . . . 132

Alphateilchen . . . 132

Ampere . . . 132

Äquivalentdosis . . . 132

Arbeit . . . 133

bar . . . 134

Baryonen . . . 134

Beschleuniger . . . 134

Beschleunigung . . . 134

Beugung . . . 135

Bosonen . . . 135

Brennstoff . . . 135

C . . . 135

Cockroft-Walton-Generator . . . 135

Coulomb . . . 135

Deuterium . . . 136

Deuteron . . . 136

Dosis . . . 137

Drehimpuls . . . 137

Drehimpuls(erhaltungs)satz . . . 137

Drehmoment . . . 138

Einheitenvorsätze . . . 138

elektrischer Dipol . . . 139

elektrisches Feld . . . 140

Elektrode . . . 140

elektromagnetische Welle . . . 141

Elektronvolt . . . 141

Elektroskop . . . 142
Elementarladung . . . 142
Elementarteilchen . . . 142
Energie . . . 143
kinetische Energie . . . 143
potentielle Energie . . . 144
elektrische Energie . . . 144
innere Energie . . . 145
chemische Energie . . . 145
Energiedosis . . . 145
Energie(erhaltungs)satz . . . 145
erg . . . 146
eV . . . 146
Exponentialfunktion . . . 146
Feld . . . 146
Feldlinien . . . 147
Fermionen . . . 147
Fluoreszenz . . . 147
freie Weglänge . . . 148
Funktion . . . 148
Geschwindigkeit . . . 149
GeV . . . 149
Gewicht . . . 149
Gray . . . 150
Gy . . . 150
h . . . 150
Hadronen . . . 150
Halbleiter . . . 150
Halbleiterdiode . . . 151
Halbwertszeit . . . 151

Impuls . . . 151
Impuls(erhaltungs)satz . . . 152
Induktion . . . 152
Isotop . . . 152
J . . . 152
Joule . . . 152
K . . . 152
Kelvin . . . 153
Kernbrennstoff . . . 153
keV . . . 153
Ladungen . . . 153
Leistung . . . 154
Leptonen . . . 154
Lichtjahr . . . 155
magnetischer Dipol . . . 155
magnetisches Feld . . . 156
magnetisches Moment . . . 156
Masse . . . 157
Massenträgheitsmoment . . . 158
Mesonen . . . 158
MeV . . . 158
μm . . . 158
Multiplikation . . . 159
Multiplikationsfaktor . . . 159
N . . . 159
Nebelkammer . . . 160
Neutron . . . 160
Newton . . . 160
Newtonsche Gesetze . . . 161
nichtrelativistisch . . . 162

nm . . . 162
Nuklid . . . 162
Nukleon . . . 162
Pa . . . 162
Partikelbeschleuniger . . . 162
Pascal . . . 162
Pauli-Prinzip . . . 163
Perpetuum mobile . . . 163
Phosphoreszenz . . . 164
Plasma . . . 165
Polymerisation . . . 165
Potenzen . . . 165
Produkt . . . 166
Proportionalität . . . 166
Proton . . . 167
Quantenchromodynamik . . . 167
Quantenelektrodynamik . . . 167
Quantenfeldtheorie . . . 167
Quantenmechanik . . . 167
Quantentheorie . . . 167
Quarks . . . 167
Reaktivität . . . 168
relativistisch . . . 168
schweres Wasser . . . 168
schwerer Wasserstoff . . . 169
Sievert . . . 169
Sperrschicht . . . 169
Spin . . . 169
Strahlendosis . . . 169
Sv . . . 170

Teilchenbeschleuniger . . . 170
TeV . . . 171
thermische Neutronen . . . 171
Thermoelement . . . 171
TNT . . . 171
Tritium . . . 171
V . . . 172
Van de Graaff-Generator . . . 172
Variable . . . 173
Vektoren . . . 173
Volt . . . 174
W . . . 175
Wärme . . . 175
Watt . . . 176
Wechselwirkung . . . 176
Wellen . . . 177
Winkel . . . 178
Winkelgeschwindigkeit . . . 178
Wirkung . . . 179
Wirkungsquerschnitt . . . 179
Wurzeln . . . 180
Zehnerpotenzen . . . 180
Zerfallsreihe . . . 182
Zoll . . . 186
Zyklotron . . . 186

Literatur **188**

Namen- und Sachverzeichnis **199**

Bildquellenverzeichnis **209**

1 Röntgenstrahlen

1.1 Gasentladungen

An den Enden eines zylindrischen Glasgefässes seien zwei metallische Elektroden eingeschmolzen und das Gefäss enthalte ein Gas bei einem Druck zwischen etwa 10 und 1000 Pa. Wird an diese beiden Elektroden eine Spannung von einigen tausend Volt angeschlossen, so fliesst durch das Gas ein elektrischer Strom, es bildet sich eine *Gasentladung* und es kommt zu spektakulären Leuchterscheinungen, deren Farben von der Gasart und vom Gasdruck abhängen.

Abbildung 1: Einfache Geissler-Röhre

Die ersten brauchbaren Gasentladungsröhren wurden 1857 von einem deutschen Glasbläser und Mechaniker, Heinrich Geissler (1814–1879), hergestellt. Geissler erfand auch eine Quecksilber-Vakuumpumpe, mit der die Röhren auf einen bisher unerreicht tiefen Druck evakuiert werden konnten. In den folgenden Jahren wurde von vielen Physikern intensiv mit den Geissler-Röhren experimentiert. Julius Plücker (1801–1868) entdeckte 1859 in einer Geissler-Röhre bei besonders tiefem Druck eine neue Art von Strahlen, die an den Glaswänden der Röhre und an in der Röhre eingeschlossenen Materialien Fluoreszenzerscheinungen erzeugten. Dieser Fluoreszenzeffekt wurde gelegentlich zur Gestaltung von kleinen Kunstwerken ausgenützt (Abbildung 2).

Abbildung 2: Links: Geissler-Röhre bei Tageslicht Rechts: Die gleiche Röhre in Betrieb

Diesen Strahlen wurde 1876 von Eugen Goldstein (1850–1931) der Name *Kathodenstrahlen* gegeben. Durch verschiedene Untersuchungen, insbesondere von Johann Wilhelm Hittorf (1824–1914), William Crookes (1832–1919), Cromwell Fleetwood Varley (1828–1883), Joseph

John Thomson (1856–1940) und Philipp Eduard Anton Lenard (1862–1947) stellte sich schliesslich heraus, dass die Kathodenstrahlen aus negativ geladenen Teilchen bestehen, die dann *Elektronen* genannt wurden.

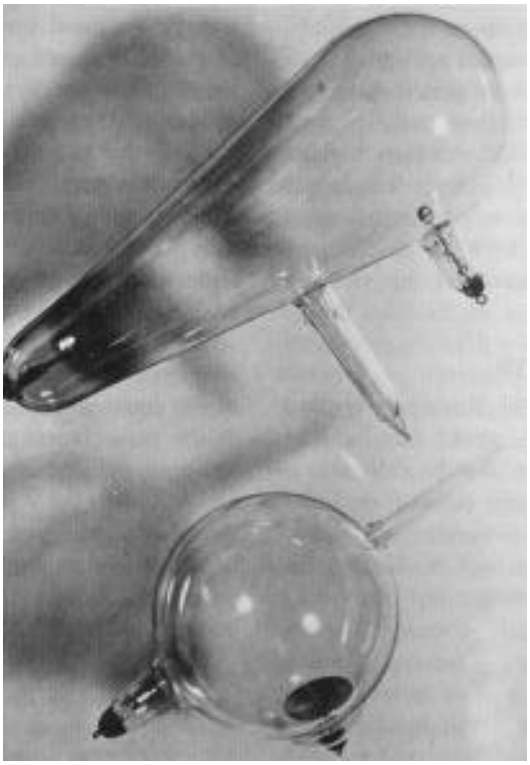

Abbildung 3: Hittorf-Röhren

Die Hochspannung für den Betrieb der Geissler- und Kathodenstrahl-Röhren wurde meist von *Funkeninduktoren* geliefert. Der Funkeninduktor wurde zwischen 1851 und 1855 von Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803–1877) entwickelt.

Abbildung 4: Funkeninduktor

Ein Funkeninduktor besteht aus einem zylindrischen Eisenkern und zwei darauf gewickelten Spulen. Durch die aus wenigen Windungen mit dickem Draht bestehende Primärspule fliesst ein hoher Strom, der von einer Batterie geliefert wird und der durch einen Unterbrecher zerhackt wird. Dadurch entsteht in der aus sehr vielen Windungen mit dünnem Draht bestehenden Sekundärwicklung eine sehr hohe Spannung. Kleine Induktoren lieferten Spannungen von einigen zehntausend Volt, während die grossen Induktoren Spannungen bis zu einigen hunderttausend Volt erreichten.

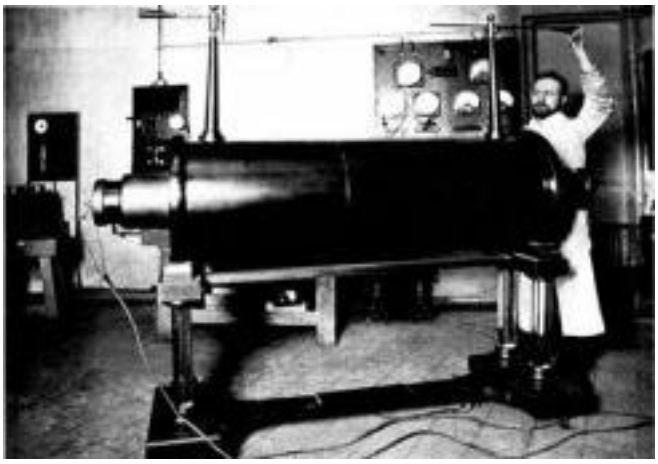

Abbildung 5: Grosser Funkeninduktor

1.2 Entdeckung der Röntgenstrahlen

Im Spätherbst 1895 experimentierte Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) mit Hittorf-Röhren.

Abbildung 6: W.C. Röntgen

Am Freitagnachmittag, 8. November, entdeckte Röntgen, dass eine mit schwarzem Karton umhüllte Gasentladungsröhre bei jeder Entladung einen Fluoreszenzschirm in einer Entfernung von bis zu zwei Metern zum Aufleuchten brachte. Röntgen konnte kaum glauben, was er sah. Für seine

Frau waren die diesem Freitag folgenden Tage und Wochen eine schreckliche Zeit. Röntgen kam zu spät zum Essen, war schlechter Laune, sprach kaum ein Wort und verschwand sofort wieder in seinem Laboratorium. Er sagte niemandem, was er machte. Nicht einmal seine beiden Assistenten wussten, was geschah. Einmal sagte er zu seiner Frau lediglich: „Wenn die Leute wüssten, was ich mache, würden sie sagen «Der Röntgen ist wohl verrückt geworden.»“.

Was er beobachtet hatte, war so erstaunlich, dass er den Versuch immer wieder von neuem durchführte, bis er endgültig überzeugt war, dass offenbar von der Gasentladungsröhre eine unsichtbare Strahlung emittiert wurde, die das Aufleuchten des Fluoreszenzschirms verursachte. Diese Strahlung durchdrang Holz nahezu ungeschwächt, während sie von Metallen stark absorbiert wurde. Als er seine Hand in den Strahlengang hielt, sah er deutlich seine Handknochen. Erst am 28. Dezember verfasste er einen Artikel mit dem Titel *Über eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mittheilung* für die Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft Würzburg und legte ihm Fotografien bei, die unter anderem einen Gewichtssatz in einem geschlossenen Holzkistchen und die Handknochen der Hand seiner Frau zeigten. Die neuen Strahlen bezeichnete er als „X-Strahlen“. Am 1. Januar sandte er Sonderdrucke an eine Reihe von Kollegen.

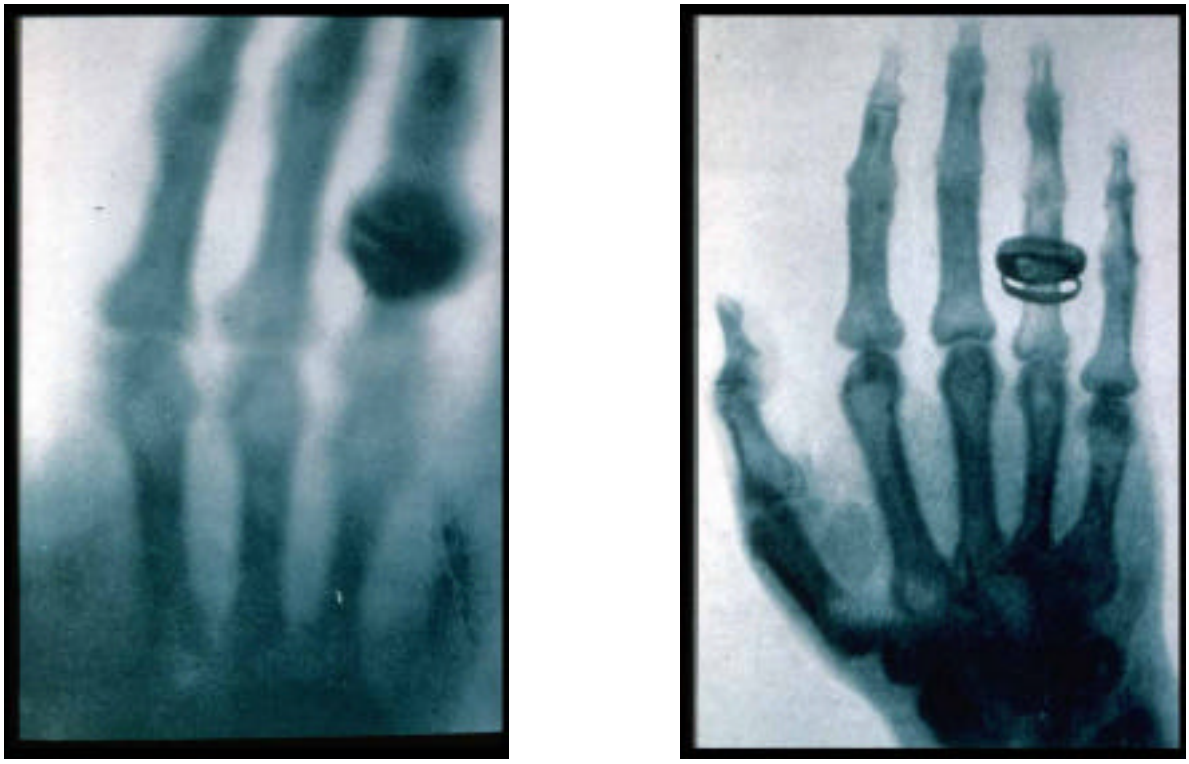

Abbildung 7: Links: Röntgenaufnahme von Anna Bertha Röntgens Hand, aufgenommen am 22. Dezember 1895 Rechts: Röntgenaufnahme von R.A. Köllikers Hand, aufgenommen am 23. Januar 1896. In vielen Quellen wird das rechte Bild (oft auch seitenverkehrt abgebildet) fälschlicherweise als Frau Röntgens Hand bezeichnet.

Nicht zuletzt wegen dieser Fotografien erregte seine Publikation ein grosses Aufsehen, nicht nur in der Fachwelt, sondern vor allem auch in der Presse. Bereits am 5. Januar berichtete die *Wiener Presse* über Röntgens Entdeckung und zwei Tage später folgten Berichte in der *Frankfurter Zeitung* und im *Standard* in London. Die Neuigkeit verbreitete sich schnell weltweit. Am 16. Januar publizierte die *New York Times* einen Artikel über die neuentdeckten Strahlen.

Als Röntgen am 23. Januar 1896 einen Vortrag über die X-Strahlen hielt, wurde von einem Hörer, dem Schweizer Anatom und Physiologen Rudolph Albert von Kölliker (1817–1905), die Bezeichnung „Röntgenstrahlen“ vorgeschlagen, die von den andern Zuhörern mit riesigem Applaus akzeptiert wurde. In der englischsprachigen Literatur wird aber noch immer die Bezeichnung „X-rays“ verwendet. Für seine Entdeckung wurde Röntgen 1901 der erste aller Nobelpreise verliehen.

Was jedoch X- oder Röntgenstrahlen tatsächlich sind, blieb lange Zeit unklar. Erst nachdem Max von Laue (1879–1960) 1912 die Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen gezeigt hatte, setzte sich die Erkenntnis durch, dass Röntgenstrahlen (elektromagnetische) Wellen von sehr kurzer Wellenlänge sind.

1.3 Anwendungen der Röntgenstrahlen

Bei kaum einem anderen Phänomen verging so wenig Zeit zwischen seiner Entdeckung und seiner weitverbreiteten praktischen Anwendung wie bei den Röntgenstrahlen. Schon die ersten „Röntgenbilder“ zeigten, dass Röntgenstrahlen ein äusserst wertvolles Hilfsmittel für die Medizin sind. Weltweit wurden überall Röntgenapparate in Betrieb genommen und für diagnostische Zwecke eingesetzt.

Schon im Februar 1896 wurden Röntgengeräte mit Fluoreszenzschirmen verwendet, mit denen das Röntgenbild direkt betrachtet werden konnte, ohne dass zuerst eine fotografische Aufnahme gemacht werden musste. Weil der apparative Aufwand relativ gering war, wurden nicht nur von Spitälern, sondern auch von vielen Privatärzten Röntgenanlagen angeschafft. Da in der Anfangszeit die Belichtungszeiten für Röntgenaufnahmen extrem lang (meist über eine Stunde) waren, wurden auch schon bald die ersten Strahlenschäden beobachtet. Bereits im April und Mai 1896 wurden in Amerika und England von Nebenwirkungen einer Röntgenaufnahme (Hautveränderungen und Haarausfall) berichtet. 1904 verfasste der Zahnarzt W.H. Rollins ein Buch über Strahlenfolgen und „Strahlenschutz“. Heute gilt der Autor als Pionier des Strahlenschutzes; damals wurde sein Buch leider kaum zur Kenntnis genommen, und lange Zeit blieben die möglichen Gesundheitsschädigungen durch zu grosse Strahlendosen kaum beachtet.

Bis Ende 1896 waren bereits mehr als 1000 wissenschaftliche und populärwissenschaftliche Artikel über Röntgenstrahlen publiziert worden, und schon in jenem Jahr wurden Röntgenstrahlen nicht nur für diagnostische, sondern auch für therapeutische Zwecke (wie Bestrahlungen von Krebsgeschwüren) eingesetzt.

Von 1926 bis anfangs 50er Jahre, vereinzelt bis 1970, wurden Röntgenstrahlen in Schuhdurchleuchtungsgeräten eingesetzt. Auf dem Leuchtschirm wurde sichtbar, wie gut der Schuh passte. Das Gerät enthielt eine Röntgenröhre, die bei einer Betriebsspannung von 50 kV einen Strahlstrom von 3 bis 8 mA aufwies. Um die Strahlenbelastung zu begrenzen, war ein Zeitschalter angebracht, mit dem die Durchleuchtung auf 5 bis 45 Sekunden eingestellt werden konnte. Normalerweise wurde eine Einstellung von 20 Sekunden gewählt. Es war aber durchaus üblich, dass die Verkäuferin nach Ablauf dieser Zeitspanne einfach erneut auf den Startknopf drückte – manchmal sogar mehrmals....

Die Strahlenbelastung für die einzelnen Kunden war relativ gering, für das Verkaufspersonal aber zum Teil nicht unbeträchtlich.

Abbildung 8: Schuhdurchleuchtungsgerät (Image courtesy of Oak Ridge Associated Universities)

Mit Röntgenstrahlung lassen sich natürlich nicht nur menschliche Körperteile, sondern auch Teile von Maschinen und Apparaten „durchleuchten“. Damit können zum Beispiel verborgene Defekte sichtbar gemacht werden. Zu diesem Zweck werden heute allerdings auch radioaktive Quellen, die Gammastrahlen emittieren, eingesetzt.

2 Radioaktivität

2.1 Entdeckung der Radioaktivität

In einer Sitzung der Académie des Sciences in Paris am 20. Januar 1896 berichtete Jules Henri Poincaré (1854–1912) über die Versuche mit Röntgenstrahlen. Antoine Henri Becquerel (1852–1908) wollte wissen, von welcher Stelle die Strahlen ausgesendet würden.

Abbildung 9: H. Becquerel

Poincaré informierte ihn, dass die Strahlung von denjenigen Stellen der Glaswand der Vakuumröhre abgestrahlt wurde, die von den Kathodenstrahlen getroffen wurden und deshalb ein Fluoreszenzleuchten emittierten. Becquerel zog den (falschen) Schluss, dass die Emission von Röntgenstrahlen eine Begleiterscheinung von Fluoreszenz- oder auch Phosphoreszenzleuchten sei. Poincaré erwähnte diese Idee in einem Artikel, ohne auf Becquerel Bezug zu nehmen, weshalb diese Anregung gelegentlich fälschlicherweise Poincaré zugeschrieben wird.

In den folgenden Wochen machte Becquerel eine grosse Zahl von Versuchen mit verschiedenen phosphoreszierenden Substanzen, ohne eine Röntgenstrahlung zu finden. Er wickelte jeweils eine Fotoplatte in dickes schwarzes Papier ein, legte die zu untersuchende Substanz darauf und setzte das Ganze während mehrerer Stunden dem Sonnenlicht aus. Anschliessend entwickelte er die Fotoplatte in der Hoffnung, eine Schwärzung zu finden, die durch eine Emission von Röntgenstrahlen verursacht worden war. Obwohl er mit vielen verschiedenen Substanzen keinen Effekt fand, setzte er seine Versuche fort. Als er das Experiment auch mit Kaliumuranylsulfat ($K_2UO_2(SO_4)_2{\cdot}2H_2O$) durchführte, erhielt er eine Schwärzung der Fotoplatte an den Stellen, auf denen das Uransalz gelegen hatte. Wenn eine Münze oder eine Metallplatte zwischen die Substanz und die Fotoplatte gelegt wurde, zeichnete sich eine entsprechende Silhouette ab, die ungeschwärzt blieb.

Als Becquerel in den folgenden Tagen die erfolgreichen Versuche wiederholen wollte, war der Himmel in Paris bedeckt. Er legte die verpackte Fotoplatte zusammen mit dem Uransalz in eine Schublade. Zwei Tage später entschloss er sich, die Platte zu entwickeln, obwohl er die Anordnung nicht hatte belichten können. Er erwartete, nur eine sehr schwache Schwärzung zu finden, und stellte zu seiner grossen Überraschung fest, dass die Schwärzung viel stärker war als bei den mit Sonnenlicht bestrahlten Proben. Ihm wurde sofort klar, dass das Uransalz auch ohne äussere Einwirkung eine durchdringende Strahlung aussandte.

Abbildung 10: Durch Kaliumuranylsulfat geschwärzte Fotoplatte

Becquerel stellte fest, dass alle Uranverbindungen, die er testete, diese Strahlung aussandten, und bemerkte ferner, dass die Strahlung ein Elektroskop entladen konnte. Erstaunlich war, dass die Strahlung des Urans auch nach langer Zeit (zwei Monaten) nicht schwächer wurde.

Das Ehepaar Marie (1867 - 1934) und Pierre (1859 - 1906) Curie untersuchte eine grosse Zahl von Substanzen und fand, dass ausser Uran auch Thorium „aktiv“ war, d.h. die neue Art von Strahlung emittierte. M. Curie führte dafür erstmals die Bezeichnung *Radioaktivität* ein. Sie entdeckte, dass die Stärke der Aktivität einer Probe proportional zu ihrem Urangehalt war und dass die Aktivität eine Eigenschaft der einzelnen Atome sein musste.

Abbildung 11: Marie und Pierre Curie

Als einige Mineralproben eine viel höhere Aktivität zeigten, als nach ihrem Urangehalt zu erwarten war, schloss M. Curie, dass diese Proben Spuren eines neuen Elements enthalten müssten, das viel stärker aktiv ist als Uran. Nach langen und mühevollen chemischen Trennungsarbeiten konnten 1898 M. und P. Curie zwei neue radioaktive Elemente identifizieren, die sie *Polonium* [1] und *Radium* [2] nannten.

[1] nach Polen, der Heimat von Marie Curie

[2] nach dem lateinischen Wort *radiare* für „strahlen“

1903 erhielt das Ehepaar Curie zusammen mit Becquerel den Nobelpreis für Physik. Marie Curie erhielt 1911 zusätzlich den Nobelpreis für Chemie.

Ernest Rutherford (1871–1937) entdeckte 1898, dass die „Becquerel-Strahlung“ inhomogen ist und aus mindestens zwei verschiedenen Anteilen besteht, die ein stark unterschiedliches Durchdringungsvermögen aufweisen.

Abbildung 12: E. Rutherford

Er nannte die Strahlenart mit dem geringeren Durchdringungsvermögen *Alphastrahlen* und die durchdringendere Strahlenart *Betastrahlen*. Zwei Jahre später entdeckte Paul Villard (1860–1934), dass Radium eine weitere, besonders stark durchdringende Art von Strahlen emittiert, die dann konsequenterweise *Gammastrahlen* genannt wurde.

Was Alpha-, Beta- und Gammastrahlen tatsächlich sind, blieb noch lange Zeit unklar. 1899 wurde die magnetische Ablenkbarkeit und 1900 die negative elektrische Ladung der Betastrahlen entdeckt (s. Abbildung 2.1). Walter Kaufmann (1871–1947) bestimmte die Masse der Betateilchen und stellte schliesslich 1902 fest, dass sie mit der Masse der Teilchen der Kathodenstrahlen übereinstimmt. Es wurde klar, dass Betatrahlen schnelle Elektronen sind. 1908 erkannte Rutherford, dass Alphateilchen nichts anderes sind als geladene Heliumatome (d.h. Heliumkerne – die Existenz der Atomkerne wurde jedoch erst drei Jahre später entdeckt). Als 1914 Reflexionen von Gammastrahlen an Kristalloberflächen beobachtet wurden, zeigte sich, dass Gammastrahlen extrem kurzwellige elektromagnetische Wellen sind.

Da die Wahrscheinlichkeit für einen Alphazerfall durch den Tunneleffekt[3] bestimmt wird, hängt die Halbwertszeit des Zerfalls extrem stark von der Zerfallsenergie ab. Das bewirkt, dass alphaaktive Nuklide, die Alphateilchen mit Energien von mehr als 8 MeV emittieren, eine praktisch unbeobachtbar kurze Lebensdauer haben, während Nuklide mit Zerfallsenergien von weniger als 4 MeV so langlebig sind, dass ihre Aktivität praktisch nicht mehr festzustellen ist. Daher liegt die Energie der Alphateilchen im Bereich zwischen 4 und 8 MeV. Betateilchen dagegen können Energien zwischen etwa 0.02 und 10 MeV haben. Noch grösser ist der mögliche Energiebereich bei den Gammastrahlen, er liegt zwischen etwa 0.002 und 7 MeV.

Die verschiedenen Strahlenarten werden durch Materie sehr unterschiedlich absorbiert. Alphastrahlen werden schon durch eine Schreibkarte vollständig aufgefangen, während Betastrahlen je

[3] Siehe z.B. im Skript zum Vortrag „Wellen oder Teilchen?“ das Kapitel „Tunneleffekt“.

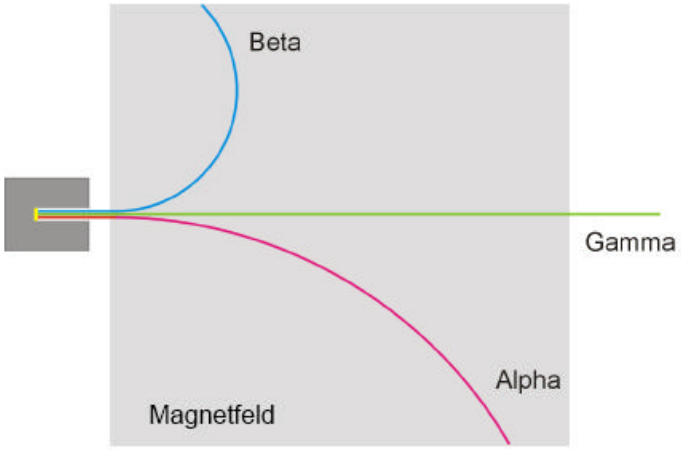

Abbildung 13: Drei Arten radioaktiver Strahlung. In einem Magnetfeld werden die elektrisch positiv geladenen Alphateilchen nach der einen Seite relativ schwach abgelenkt, während die elektrisch negativ geladenen Betateilchen nach der anderen Seite relativ stark abgelenkt werden. Die elektrisch neutralen Gammastrahlen werden im Magnetfeld gar nicht abgelenkt. Die Feldlinien, bzw. die Feldstärkevektoren des Magnetfeldes im grauen Bereich stehen senkrecht zur Zeichenebene.

nach ihrer Energie von einer mehrere Millimeter dicken Aluminiumplatte gestoppt werden. Das Durchdringungsvermögen von Gammastrahlen hängt ebenfalls stark von ihrer Energie ab und ist in Blei maximal für Gammastrahlen mit einer Energie von etwa 3 MeV. Die Intensität solcher Gammastrahlen wird durch eine 5 cm dicke Bleischicht auf etwa 10 Prozent reduziert (s. Abbildung 14).

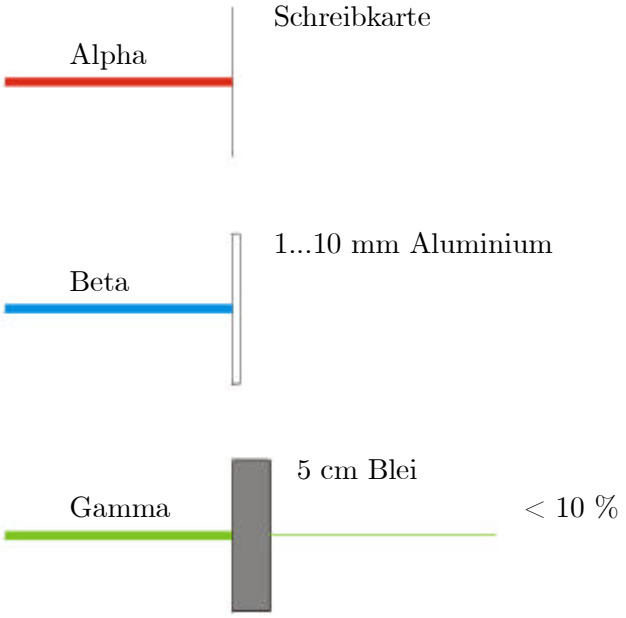

Abbildung 14: Absorption von Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

Die ersten radioaktiven Elemente, die entdeckt wurden, waren so „langlebig“, dass die Aktivität konstant zu sein schien. Erst 1900 bemerkte Rutherford bei der Untersuchung des Radon-Isotops ^{220}Rn, dass die Aktivität exponentiell mit der Zeit abnimmt. Von einer Anzahl gleicher radioaktiver Atome zerfallen in einer Halbwertszeit die Hälfte der Atome. In der folgenden Halbwertszeit zerfallen von den verbliebenen Atomen wieder die Hälfte und so fort.

Dabei drängen sich mehrere Fragen auf: Warum zerfällt ein bestimmtes Atom innerhalb der nächsten Sekunde, und ein anderes, genau gleiches Atom zerfällt erst in tausend Jahren? Warum gibt es Elemente mit ganz unterschiedlich langen Halbwertszeiten? Sind die Halbwertszeiten mancher Elemente so gross, dass die betreffenden Elemente stabil scheinen? Sind in Wirklichkeit restlos alle Elemente instabil? Diese letzte Frage hat in neuerer Zeit wieder an Bedeutung gewonnen, da auf Grund mancher Theorien die Protonen (und damit alle Atomkerne) eine endliche Lebensdauer haben müssten.

Die Frage, warum das eine Atom in der nächsten Sekunde und das andere Atom erst viel später zerfällt, konnte erst 1928, nach der Entstehung der Quantentheorie, beantwortet werden. Genauer gesagt, die Quantentheorie zeigte, dass es auf diese Frage keine Antwort gibt. Die Kausalität der klassischen Mechanik verliert im Bereich der Quantenobjekte ihre Gültigkeit.

Ein weiteres Rätsel war die Herkunft der Energie, die beim radioaktiven Zerfall frei wird. Stammt diese Energie aus dem Atom selbst und wandelt sich das Atom beim Zerfall in ein anderes um, oder ist der Raum erfüllt von einer Strahlung, für die die gewöhnliche Materie völlig transparent ist, aber die von den radioaktiven Atomen absorbiert und in die radioaktive Strahlung umgewandelt wird? Manche Physiker stellten sogar die Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes bei atomaren Prozessen in Frage.

Das Problem verschärfte sich, als die bei radioaktiven Zerfällen freigesetzte Energie 1903 tatsächlich gemessen wurde. Es wurde gefunden, dass diese Energie etwa eine Million mal grösser ist, als die Energien, die bei chemischen Prozessen von einer vergleichbaren Menge Materie freigesetzt werden. Die Idee, dass die freiwerdende Energie auf eine Atomumwandlung zurückzuführen ist, bedeutete einen radikalen Bruch mit der langgehegten Überzeugung, dass die Atome etwas Unzerstörbares und Unwandelbares seien. Deshalb tauchte während rund 20 Jahren immer wieder die andere Idee auf, nämlich dass die Energie nicht aus dem Atom, sondern aus dem umgebenden Raum stammt. Erst mit der Entwicklung der Quantentheorie festigte sich die Erkenntnis, dass die bei einem radioaktiven Zerfall freiwerdende Energie aus dem Atomkern stammt.

2.2 Medizinische Anwendungen radioaktiver Substanzen

2.2.1 Wundermittel

Die Begriffe „radioaktiv“ und „Radioaktivität“ bewirken heute bei vielen Menschen Reaktionen, die von Unbehagen bis zu grosser Angst reichen. Das war keineswegs immer so. Genauso übertrieben, wie viele der heutigen Angstreaktionen sind, waren von Anfang bis gegen Mitte des 20. Jahrhunderts die Erwartungen, die in die Heilkräfte radioaktiver Substanzen gesetzt wurden. Zwei Radium-Tabletten vor oder nach jeder Mahlzeit sollten bei rheumatischen Beschwerden, Nervenentzündungen, Neuralgien und Gicht Linderung bringen und ganz allgemein die Vitalität erhöhen (s. Abbildung 15).

Es war auch von Vorteil, wenn man sich die Zähne mit der radioaktiven Zahncreme „Doramad“ putzte (s. Abbildung 16).

Abbildung 15: Radiumhaltige Tabletten (Image courtesy of Oak Ridge Associated Universities)

Abbildung 16: Radioaktive Zahnpasta „Doramad“. (Image courtesy of Oak Ridge Associated Universities)

Auf der Rückseite der Tube war folgendes zu lesen:

> Was leistet Doramad? Durch ihre radioaktive Strahlung steigert sie die Abwehrkräfte von Zahn u. Zahnfleisch. Die Zellen werden mit neuer Lebensenergie geladen, die Bakterien in ihrer zerstörerischen Wirksamkeit gehemmt. Daher die vorzügliche Vorbeugungs- und Heilwirkung bei Zahnfleischerkrankungen. Poliert den Schmelz aufs Schonendste weiss und glänzend. Hindert Zahnsteinansatz. Schäumt herrlich, schmeckt neuartig, angenehm mild und erfrischend. Ausgiebig im Gebrauch.

Im Handel wurden spezielle Krüge angeboten, mit Hilfe derer Wasser „vitalisiert“ werden konnte, indem es mit Radon angereichert wurde. Das radioaktive Edelgas Radon ist ein Zerfallsprodukt von Radium, das seinerseits in den Zerfallsreihen von Uran und Thorium enthalten ist. Der abgebildete Wasserbehälter (s. Abbildung 17) enthält einen gelochten Aluminium-Zwischenboden, auf den 100 bis 200 Gramm uranhaltiges Erz eingefüllt wurden.

Dies sind nur einige wenige Beispiele einer grossen Anzahl von Präparaten und Geräten, mit Hilfe derer die wunderbaren gesundheitlichen Wirkungen von Radium und anderen radioaktiven Elementen genutzt werden konnten. Auf der Webseite der Oak Ridge Associated Universities[4] findet

[4] http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm

Abbildung 17: Radium-Vitalisator-Wasserkrug (Image courtesy of Oak Ridge Associated Universities)

man eine sehr eindrückliche Sammlung von Materialproben, Gegenständen, Geräten und Instrumenten mit ausführlichen Beschreibungen. Aus der heutigen Sicht und im Hinblick auf die heute gültigen Strahlenschutzvorschriften ist es kaum noch vorstellbar, dass Substanzen mit relativ hoher Radioaktivität als „Wundermittel“ verwendet wurden.

2.2.2 Radonkuren

Vielleicht ist aber die Idee, dass radonhaltiges Wasser „belebend“ wirken könne, doch nicht so völlig absurd. Auch heute noch werden in vielen Kurorten Radonkuren angeboten[5]. Die verschiedenen möglichen Formen der Radontherapie sind: Baden, Trinken und Inhalieren. Radonhaltiges Wasser wird entweder für Trinkkuren oder für Wannenbäder verwendet. In Kurorten mit radonhaltigen Quellen können die Gase aufgefangen und dem Patienten in Kabinen oder über Hauben zugeführt werden. Manche Kurorte verfügen auch über Heilstollen, in denen die Patienten die radonhaltige Luft einatmen.

Die Wirkung solcher Kuren ist umstritten. Während die eine Seite geltend macht, dass bei den Dosisbelastungen, die bei solchen Kuren auftreten, das Krebsrisiko vernachlässigbar klein sei und dass bei klinischen Studien die therapeutische Wirksamkeit dieser Kuren bewiesen worden sei, behauptet die andere Seite, es seien keine eindeutig besseren Heilerfolge im Vergleich zu Kuren ohne Radon nachgewiesen worden und die Strahlenbelastung bewirke ein erhöhtes Krebsrisiko.

[5] Radonheilbäder gibt es in den USA, in Japan, in Russland, in Tschechien, in Polen, in Italien (Meran, Ischia), in Österreich (Bad Gastein, Bad Hofgastein, Bad Zell) und in Deutschland (Bad Brambach, Bad Kreuznach, Bad Münster am Stein-Ebernburg, Bad Steben, Sibyllenbad, Schlema).

Bei diesem Streit geht es im wesentlichen um die alte Kontroverse, ob der Effekt *Hormesis* existiert oder nicht (s. Abschnitt 3.7).

2.2.3 Diagnostische Anwendungen

Die verschiedenen Isotope eines chemischen Elementes unterscheiden sich in ihrem chemischen Verhalten praktisch nicht und in ihrem physikalischen Verhalten nur sehr wenig. Darauf beruht die Indikator- oder Tracermethode. Sie erlaubt, Transportphänomene, in technischen, physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen mit hoher Empfindlichkeit zu studieren, da radioaktive Isotope sich in kleinsten, nicht mehr wägbaren Spuren leicht nachweisen lassen. Die Markierung erfolgt entweder durch Aktivierung (z.B. mittels Neutronenbestrahlung) des zu untersuchenden Stoffes oder durch Zugabe eines radioaktiven Stoffes gleicher Beschaffenheit. Mit Hilfe der Tracermethode lassen sich zum Beispiel Stoffwechselvorgänge studieren, die Wirkung von Medikamenten untersuchen und die Überlebenszeit roter Blutkörperchen bei Bluttransfusionen messen.

2.2.4 Therapeutische Anwendungen

Die Gammastrahlung radioaktiver Isotope (z.B. ^{60}Co) lässt sich in gleicher Weise wie Röntgenstrahlung zur Strahlentherapie einsetzen. Radioaktive Isotope, die Betastrahlen emittieren, können lokal zur Bestrahlung von Hautflächen oder hautnahen Zellbereichen verwendet werden. Zur Bestrahlung bestimmter Zielbereiche im Körper können auch radioaktive Quellen implantiert oder in geeigneter Form dem Blutkreislauf oder dem Stoffwechsel beigefügt werden

2.3 Technische Anwendungen radioaktiver Substanzen

2.3.1 Glas und Keramik

Eine Anwendung radioaktiver Substanzen, bei der die Radioaktivität nicht der Zweck, sondern eine unerwünschte Nebenerscheinung ist, besteht im Einsatz von Uranverbindungen zur Färbung von Gläsern und Glasuren. Der grösste Teil der Urangewinnung wurde im 19. Jahrhundert (bevor die Radioaktivität überhaupt bekannt war) in den Glashütten verarbeitet. Der Zusatz von Uranverbindungen zur Glasschmelze ergab grüngelbe Gläser (siehe Abbildung 18). Im ultravioletten Licht fluoreszierten die Gläser intensiv grün.

Mit Uransalzen wurden auch schwarze und leuchtend rote und orange Glasuren von Porzellan hergestellt (siehe Abbildung 19).

Die Strahlendosis solcher Glasuren kann beträchtlich sein. An einem Teeservice wurden Dosisleistungen zwischen 0,1 und 0,2 mSv/h gemessen. An den Fingern eines passionierten Teetrinkers kann dadurch eine Strahlendosis von 4 mSv/Jahr auftreten. Hinzu kommt die interne Strahlenbelastung durch das aus der Glasur herausgelöste (und mit dem Tee getrunkene) Uransalz. Die Strahlendosis beträgt für die Nieren etwa 0,1 mSv/Jahr und für die Knochen 0,6 mSv/Jahr.

Abbildung 18: Mit Uranverbindungen gefärbtes Glas (Image courtesy of Oak Ridge Associated Universities)

Abbildung 19: Mit Uranverbindungen gefärbte Glasur (Image courtesy of Oak Ridge Associated Universities)

2.3.2 Röntgenfluoreszenzanalyse

Die Röntgenfluoreszenzanalyse erlaubt sowohl eine qualitative („Welche Elemente?“) als auch eine quantitative („In welcher Konzentration ist das betreffende Element vorhanden?“) Analyse. Wird eine Materialprobe mit Röntgenstrahlen oder Gammastrahlen bestrahlt, so werden die Atome ionisiert und emittieren anschliessend bei der Rekombination die charakteristischen Röntgenlinien,

deren Spektren gemessen werden können. In stationären Anlagen werden in der Regel Röntgenröhren verwendet, während in tragbaren Geräten meist verschiedene Radionuklide als Strahlungsquelle dienen.

2.3.3 Diagnostische Anwendungen

Die Strahlung radioaktiver Isotope vermag einerseits Materie zu durchdringen und wird andererseits beim Durchgang durch eine Materieschicht geschwächt. Diese Eigenschaft ermöglicht es, mit Hilfe von Radionukliden Schichtdicken, Dichten, Feuchtigkeitsgehalte und Füllstände zu messen und Werkstücke zu prüfen.

Mit Hilfe von geeigneten Radionukliden und Strahlungsmessgeräten lässt sich die Dicke von Folien berührungslos und kontinuierlich messen. Die von der radioaktiven Quelle ausgehende Strahlung durchdringt die Folie und gelangt mehr oder weniger abgeschwächt in den Detektor. Der gemessene Ionisationsstrom ist ein Mass für die Dicke der Folie und kann auch direkt zur automatischen Regelung der Dicke bei der Folienherstellung benützt werden. Der Messbereich erstreckt sich von 1 mg/cm^2 bis 100 g/cm^2, wobei für die dünnsten Folien weiche Betastrahlen, für die dicksten dagegen harte Gammastrahlen verwendet werden.

Nach dem gleichen Prinzip lässt sich die Dichte von Flüssigkeiten in Rohren bestimmen. Bei einer Füllstandsüberwachung ist lediglich ein Signal erforderlich, dass ein bestimmtes Niveau über- oder unterschritten ist. Der Messeffekt ist meist sehr gross, und es genügt ein ganz einfaches Strahlenmessgerät. Soll ein festes Niveau überwacht werden, so genügt eine einfache Gammastrahlenschranke. Wird eine kontinuierliche Füllstandsüberwachung gewünscht, so kann zum Beispiel eine bewegliche Quelle mit Hilfe einer Automatik dem Niveau nachgefahren werden.

Die Gamma-Radiographie ist eine zerstörungsfreie Methode zur Prüfung von Werkstücken auf Fehlstellen. Bei der Durchstrahlung eines Werkstückes mit Gammastrahlen werden diese durch äusserlich nicht erkennbare Fehlstellen weniger geschwächt. Die dadurch bewirkten Intensitätsunterschiede können mit Hilfe eines Detektors nachgewiesen oder direkt auf einem Film abgebildet werden. Für dickere Werkstücke wird Röntgenstrahlung verwendet, die mit Hilfe von kleinen Elektronenbeschleunigern erzeugt wird. Die im Abschnitt „Medizinische Anwendungen radioaktiver Substanzen“ beschriebene Indikatormethode findet auch im technischen Bereich viele Anwendungen. Aus der grossen Zahl der Anwendungsmöglichkeiten sollen hier nur einige Beispiele genannt werden: Bestimmung von Durchlaufzeiten von Flüssigkeiten in Apparaten und Leitungssystemen, Lokalisierung von Undichtigkeiten, Prüfung des Abriebs an Maschinenteilen, Werkzeugen, Elektroden, Kontakten usw., Untersuchung von Durchmischungen, Lösungs- und Kristallisationsvorgängen und Diffusionsprozessen, Messung von extrem kleinen Löslichkeiten, Studium von chemischen Reaktionsmechanismen.

2.3.4 Aktivierungsanalyse

Durch Bestrahlen eines Stoffes mit Neutronen oder geladenen Kernteilchen werden radioaktive Nuklide erzeugt. Diese können durch die Art und Energie ihrer Strahlung und durch ihre Halbwertszeit identifiziert werden. Die aktiven Nuklide sind ihrerseits charakteristisch für die Elemente des bestrahlten Stoffes. Die Intensität der Strahlung ist ein Mass für die Menge des betreffenden Elementes. Gewisse Elemente können noch in Beimengungen von 10^{-4} Mikrogramm nachgewiesen werden. Die Aktivierungsanalyse findet Anwendung in den Bereichen analytische Chemie, Biochemie, Medizin, Festkörperphysik, Metallurgie, Geochemie, Archäologie und Kriminalistik.

2.3.5 Rauchmelder

Es gibt verschiedene Typen von Rauchmeldern. Bei den Ionisationsrauchmeldern wird der Ionisationsstrom in einem kleinen Luftvolumen gemessen. Die Ionen entstehen durch Bestrahlung mit einem radioaktiven Isotop, das Alphastrahlen emittiert. Wenn in die Luftkammer Rauch eindringt, lagern sich die Ionen an die Rauchpartikel an. Dadurch vermindert sich ihre Beweglichkeit, und der Ionisationsstrom sinkt, wodurch der Alarm ausgelöst wird.

2.3.6 Leuchtfarben

Als Leuchtfarbe für Zifferblätter und Zeiger von Uhren, für Kompasse und Anzeigeinstrumente bei Flugzeugen wurde bisher meist Zinksulfid verwendet. Zinksulfid phosphoresziert, d.h. wenn es mit Tages- oder Kunstlicht beleuchtet wurde, leuchtet es in der Dunkelheit nach. Das Leuchten klingt aber schon in einer Stunde so stark ab, dass die Lichtintensität nicht mehr hinreichend ist. Kurz nach dem ersten Weltkrieg wurde in der schweizerischen Uhrenindustrie begonnen, dem Zinksulfid radioaktive Elemente beizumischen, wobei meist Radium (^{226}Ra) verwendet wurde. Die vom radioaktiven Element emittierten Alphastrahlen regen das Zinksulfid zum Leuchten an, so dass die Leuchtfarbe auch ohne vorherige Belichtung beliebig lange im Dunkeln leuchtet. Radium als Aktivierungssubstanz für Leuchtfarben ist jedoch insofern problematisch, als es (genauer gesagt seine Zerfallsprodukte) eine durchdringende Gammastrahlung emittiert. Zudem zählt es zu den Radionukliden mit hoher Radiotoxizität[6].

Besonders gefährdet werden die Leute, die mit Leuchtfarben arbeiten. Beim Auftragen der Leuchtfarben war es am Anfang eine bewährte Methode, die Pinsel mit den Lippen zuzuspitzen. Nachdem es bei den betreffenden Arbeiterinnen und Arbeitern zu Krebserkrankungen und sogar zu Todesfällen gekommen war, wurde diese Praxis verboten. Auch die Träger von Uhren mit radiumaktivierten Leuchtfarben sind einer nicht ganz vernachlässigbaren Strahlenbelastung ausgesetzt (von etwa 0.04 bis zu 1 mSv/Jahr).

Ab 1950 standen aus den Spaltprodukten der Kernreaktoren preisgünstige Radionuklide zur Verfügung, und es wurde nach einem Ersatz für das Radium gesucht. Ein für die Aktivierung der Leuchtfarben geeignetes Radionuklid sollte (mitsamt seinen Zerfallsprodukten) keine Gammastrahlung emittieren, eine kleine Radiotoxizität aufweisen, eine hinreichend lange Halbwertszeit haben und in eine stabile chemische Form gebracht werden können, die mit dem Leuchtfarbstoff verträglich ist. Leider gibt es nur einige wenige Radionuklide, welche diese Forderungen erfüllen.

Heute wird praktisch nur noch Tritium verwendet. Tritium (^{3}H) emittiert keine Gammastrahlen, sondern nur Betastrahlen, deren maximale Energie so niedrig ist, dass sie das Uhrglas (geschweige denn den Stahlboden des Uhrgehäuses) nicht zu durchdringen vermögen. Jedoch hat sich herausgestellt, dass Tritium Plastik durchdringen kann. Billig-Uhren mit Plastikgehäusen und tritiumhaltigen Leuchtfarben können Tritium abgeben, das dann über die Haut aufgenommen werden kann. Die dadurch entstehende Strahlenbelastung beträgt nur etwa 5 Prozent der Belastung durch die natürliche Umweltstrahlung, ist jedoch völlig unnötig und vermeidbar. Ein Nachteil des Tritiums ist seine relativ kurze Halbwertszeit von 12.3 Jahren, d.h. nach 12.3 Jahren ist die Strahlungsintensität des Tritiums auf die Hälfte abgesunken. Die Helligkeit der mit Tritium aktivierten Leuchtfarbe nimmt jedoch noch schneller ab, da das Tritium allmählich aus dem Farbstoff entweicht.

[6] Die Radiotoxizität ist ein Mass für die Gesundheitsschädlichkeit eines Radionuklids. Massgebend sind dafür die Strahlenart (Alpha, Beta, Gamma), die Strahlenenergie, die Resorption im Organismus und die effektive Halbwertszeit.

2.3.7 Radionuklidbatterien

Da die von radioaktiven Nukliden emittierten Alpha- oder Betastrahlen elektrisch geladene Teilchen sind, kann elektrische Energie aus Radionukliden durch direkte Aufladung gewonnen werden. Dabei ergeben sich bei zwar hohen Spannungen (bis einige 100 kV) nur sehr kleine Ströme (10^{-11} bis 10^{-9} A). Grössere Ströme lassen sich durch die Erzeugung von Ladungsträgerpaaren in einer Sperrschicht erreichen. Das Prinzip ist dasselbe wie bei der Stromerzeugung einer mit Licht bestrahlten Photozelle. Es ergeben sich Ströme von einigen Mikroampere bei Spannungen von etwa 150 mV.

Bei thermoelektrischen Radionuklidbatterien (RTG, „radioisotope thermoelectric generator“) wird die bei der Absorption der radioaktiven Strahlung freiwerdende Wärme von Halbleiter-Thermoelementen ausgenützt. Solche Batterien werden zur Stromversorgung von Wetterstationen und Bojen und vor allem von Satelliten und Raumfahrzeugen eingesetzt. Es gibt RTGs mit Leistungen bis zu einigen hundert Watt. Die heute in der Raumfahrt verwendeten RTGs sind so ausgelegt, dass sie einen unkontrollierten Wiedereintritt des Raumfahrzeuges in die Erdatmosphäre unbeschädigt überstehen und dass auch beim Verglühen des Fahrzeuges kein radioaktives Material freigesetzt wird.

Bei thermionischen Radionuklidbatterien wird ein Emitter durch die Absorption der Strahlung auf eine hohe Temperatur gebracht. Er emittiert daher bedeutend mehr Elektronen als der ihm gegenüberstehende kalte Kollektor. Eine solche Diode liefert eine Klemmenspannung von etwa 0.7 Volt. Es existieren Batterien mit Leistungen von einigen Watt. Sie sind wesentlich leichter als thermoelektrische Batterien gleicher Leistung.

2.3.8 Technische Bestrahlungen

Für technische Bestrahlungen werden hauptsächlich Gammastrahlen und Elektronenstrahlen verwendet. Als Gammastrahlenquelle dient in der Regel das Kobalt-Isotop ^{60}Co. Für die Erzeugung der Elektronenstrahlen werden dagegen meist kleine Beschleuniger eingesetzt[7].

Durch Bestrahlung mit ionisierenden Strahlen können gewisse chemische Reaktionen ausgelöst oder beeinflusst werden. Interessante Anwendungen sind die Auslösung von Polymerisationen und die Vernetzung von Hochpolymeren. Die Vernetzung von Kunststoffen ergibt folgende Verbesserungen der Materialeigenschaften: Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit, Verbesserung der Abriebfestigkeit, Reduktion des Kaltflusses, Erhöhung der Spannungsrissfestigkeit, Reduktion des Quellverhaltens in organischen Lösungsmitteln, Erhöhung der Reiss-, Schlag- und Scherfestigkeiten, Reduktion der Bruchdehnung.

Bestrahlt werden: Kabelisolationen, Bodenheizungs- und Sanitär-Rohre, Folien, Schaumstoffe, Wärmeschrumpfartikel, Spritzgussteile, Elastomere. Bestrahlung wird auch eingesetzt zur Hygienisierung von Lebens- und Futtermitteln und zur Sterilisation von Medizinalartikeln und Pharmazeutika. Die Strahlensterilisation bietet gegenüber der klassischen Hitzebehandlung eine Reihe von Vorteilen. Es lassen sich thermolabile Substanzen sterilisieren, und es können auch pyrogene Bakterien abgetötet werden. Die zu sterilisierenden Produkte können nach dem Verpacken mitsamt der Verpackung bestrahlt werden. Die Haltbarkeit von Lebensmitteln kann durch Bestrahlung wesentlich erhöht werden. Eine gänzliche Sterilisation lässt sich mit den Strahlendosen, die noch keine Geschmacksveränderung bewirken, jedoch nicht erreichen.

[7] Auch wenn diese Methode streng genommen nicht unter den Titel dieses Abschnittes gehört, soll sie der Vollständigkeit halber doch hier erwähnt werden.

Bei vielen Verarbeitungsvorgängen in der Industrie treten elektrostatische Aufladungen auf, die sich stark störend auswirken können und sogar gefährlich sein können (Entzündung brennbarer Gase, Dämpfe oder Stäube durch Funkenüberschlag). Derartige Aufladungen lassen sich durch Ionisation der Luft mit Hilfe von radioaktiven Quellen weitgehend verhindern. Das gleiche Prinzip funktioniert auch im ganz Kleinen: Antistatikpinsel sind mit einer schwachen Alphaquelle versehen. Damit lassen sich Diapositive oder Kameraobjektive von Staub befreien.

Bestrahlung dient auch zur Rauchgasentschwefelung, zur Glasfärbung und zur Farbvertiefung von Edelsteinen.

3 Biologische Wirkungen ionisierender Strahlungen

Während also in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Radioaktivität wunderbare Heilwirkungen zugeschrieben wurden, entwickelte sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Begriff „Radioaktivität“ zu einem Schreckwort, das häufig zur Steigerung der Auflagen von Presseerzeugnissen und zur Erhöhung von Einschaltquoten von Radio- oder Fernsehsendungen missbraucht wird. Sind nun radioaktive Strahlen nützlich oder schädlich?

Gegenwärtig wird oft die Behauptung verbreitet: „Radioaktive Strahlung ist schon in kleinsten Dosen schädlich.“ Bereits die Formulierung dieser Behauptung ist unpräzise. Es geht nicht um *radioaktive*, sondern um *ionisierende* Strahlung. Wie bereits erwähnt, können hohe Dosen von Röntgenstrahlen zu schweren Schäden führen. Röntgenstrahlen sind aber keine „radioaktiven Strahlen“, sondern sie wirken – wie auch radioaktive Strahlen – ionisierend. Beim Durchgang ionisierender Strahlung durch Materie werden Atome ionisiert, d.h. es entstehen positiv geladene Ionen und (negativ geladene) freie Elektronen.

Korrekt wäre die *Frage*: „Ist ionisierende Strahlung schon in kleinsten Dosen schädlich?“

Die Antwort auf diese Frage wurde schon im 15. Jahrhundert von einem Mann gegeben mit dem wahrhaft bombastischen Namen „Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim“, besser bekannt unter dem Namen „Paracelsus“ (Ende 1493/Anfang 1494–1541).

Abbildung 20: Paracelsus

Paracelsus wuchs in Einsiedeln auf als Sohn eines schwäbischen Arztes und einer Schweizerin. Er sagte:

> „Alle Dinge sind Gift
> und nichts ist ohn Gift,
> allein die Dosis macht,
> dass ein Ding kein Gift ist!“

3.1 Strahlendosis

Da die primäre Strahlungswirkung in einer Ionisation oder Anregung von Atomen oder Molekülen besteht, werden solche Prozesse zur Festlegung der Strahlendosis herangezogen.

Das *Röntgen* (R) war die Einheit der Ionendosis für Röntgen- und Gammastrahlung. Es ist 1 R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Ckg^{-1}.

Die *absorbierte Dosis* oder *Energiedosis* ist die pro Masseneinheit der bestrahlten Materie durch Ionisations- und Anregungsprozesse abgegebene Energie. Die Einheit ist das *Gray* (Gy):

1 Gray entspricht der Energieabsorption von 1 Joule pro kg Substanz.

Früher wurde die Einheit rad (radiation absorbed dose, rd) verwendet. 1 rad entspricht der Energieabsorption von 100 erg pro g Substanz (10^{-2} Jkg^{-1}). Es gilt: 1 Gy = 100 rd.

Die *Dosisleistung* ist die pro Zeiteinheit aufgenommene Dosis.

3.2 Äquivalentdosis

Bei gleicher Energiedosis im lebenden organischen Gewebe hängt die biologische Wirkung einer Bestrahlung noch stark von der Strahlenart ab. Die biologische Wirkung, die durch eine bestimmte Strahlenart mit der Dosis D erzeugt wird, kann auch durch die Dosis D_v einer Vergleichsstrahlung hervorgerufen werden. Als Vergleichsstrahlung dient eine 200-keV-Röntgenstrahlung. Es wird definiert als *Qualitätsfaktor*:

$$Q = \frac{D_v}{D}\,. \tag{1}$$

Das Produkt der Energiedosis und des Qualitätsfaktors ist die Äquivalentdosis: $D_q = Q\,D$.

Die Energiedosis wird in Gray und die Äquivalentdosis in *Sievert* (Sv) angegeben. Früher wurde für die Äquivalentdosis die Einheit rem (röntgen equivalent man) verwendet. Es gilt: 1 Sv = 100 rem.

Die äusserst komplexen Vorgänge der Strahlenwirkung in einem lebenden Organismus lassen sich durch einen einfachen Bewertungsfaktor Q natürlich nur höchst unvollständig beschreiben. Trotzdem ist der Begriff der Äquivalentdosis für den praktischen Strahlenschutz sehr nützlich, da damit aus einer Dosismessung sofort ein Anhaltspunkt über die Gefährlichkeit einer Strahlung erhalten werden kann.

Für die verschiedenen Strahlenarten kann im allgemeinen mit folgenden Qualitätsfaktoren gerechnet werden:

Strahlenart	Q
Röntgen- und Gammastrahlen	1
Elektronen- und Betastrahlen	1
Langsame Neutronen	5
Schnelle Neutronen und Protonen (bis 1 MeV)	10
Alphastrahlen	10
Schwere Rückstosskerne	20

3.3 Strahlenbelastung

3.3.1 Natürliche Strahlenbelastung

Terrestrische Strahlung

Die natürliche Radioaktivität der Gesteine und die kosmische Strahlung bewirken eine unvermeidliche natürliche Strahlenbelastung. Die terrestrische Strahlung ist stark von der Bodenart abhängig und variiert in der Schweiz zwischen 0.3 und 2.1 mSv pro Jahr.

In einigen Gebieten der Erde ist aufgrund einer höheren Konzentration der natürlich radioaktiven Stoffe die Strahlungsdosisleistung jedoch wesentlich höher. In Kerala an der Südwestküste Indiens beträgt die terrestrische Strahlung über 10 mSv/a). An der brasilianischen Atlantikküste wurden bei Guarapari am Strand Dosisleistungen von 175 mSv pro Jahr gemessen, und in der Stadt Ramsar im Iran wurden Strahlungswerte von bis zu 450 mSv pro Jahr festgestellt (s. Abbildung 21). An den Orten mit diesen extrem hohen terrestrischen Strahlenbelastungen wurde keinerlei erhöhte Krebshäufigkeit gefunden.

Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlenbelastung hängt vor allem von der Höhe über Meer ab. In der Schweiz liegt sie für 95 % der Bevölkerung zwischen 0,35 und 0,5 mSv pro Jahr.

In den Häusern werden die terrestrische und die kosmische Strahlung durch den Abschirmeffekt der Wände etwas reduziert, aber die Radioaktivität des Baumaterials liefert eine zusätzliche Strahlenbelastung. Je nach Baumaterial kann der Abschirmeffekt überwiegen oder die Strahlenbelastung kann im Haus grösser sein als im Freien.

Körperinnere Strahlung

Zu diesen äusseren Bestrahlungen kommt eine innere Bestrahlung hinzu. Jeder Mensch ist nämlich natürlicherweise radioaktiv. Der menschliche Körper enthält eine ganze Reihe von radioaktiven Isotopen, die zusammen eine Strahlenbelastung von etwa 0,4 mSv pro Jahr bewirken.

Radon

Einen wesentlichen Beitrag zur inneren Strahlenbelastung liefert das Radon, ein natürliches radioaktives Edelgas, das aus den Gesteinen, aber auch aus den meisten Baumaterialien austreten kann. Durch Einatmen gelangt es in die Lunge und bewirkt so zusammen mit seinen ebenfalls radioaktiven Zerfallsprodukten eine zusätzliche innere Strahlenbelastung. Die Radonkonzentration in den Häusern ist deutlich höher als im Freien und hängt stark von der Luftaustauschrate ab. Die an sich wünschenswerte Energiesparmassnahme der Reduktion des Luftwechsels durch besser abgedichtete Fenster führt zu einer erhöhten Radonkonzentration. In der Schweiz beträgt die zusätzliche Strahlenbelastung durch das Radon und seine Zerfallsprodukte im Mittel etwa 1.6 mSv pro Jahr. Die Radonkonzentration weist jedoch starke örtliche Unterschiede auf. Etwa 1 bis 2 % der Bevölkerung sind durch das Radon einer jährlichen Strahlenbelastung von über 10 mSv ausgesetzt.

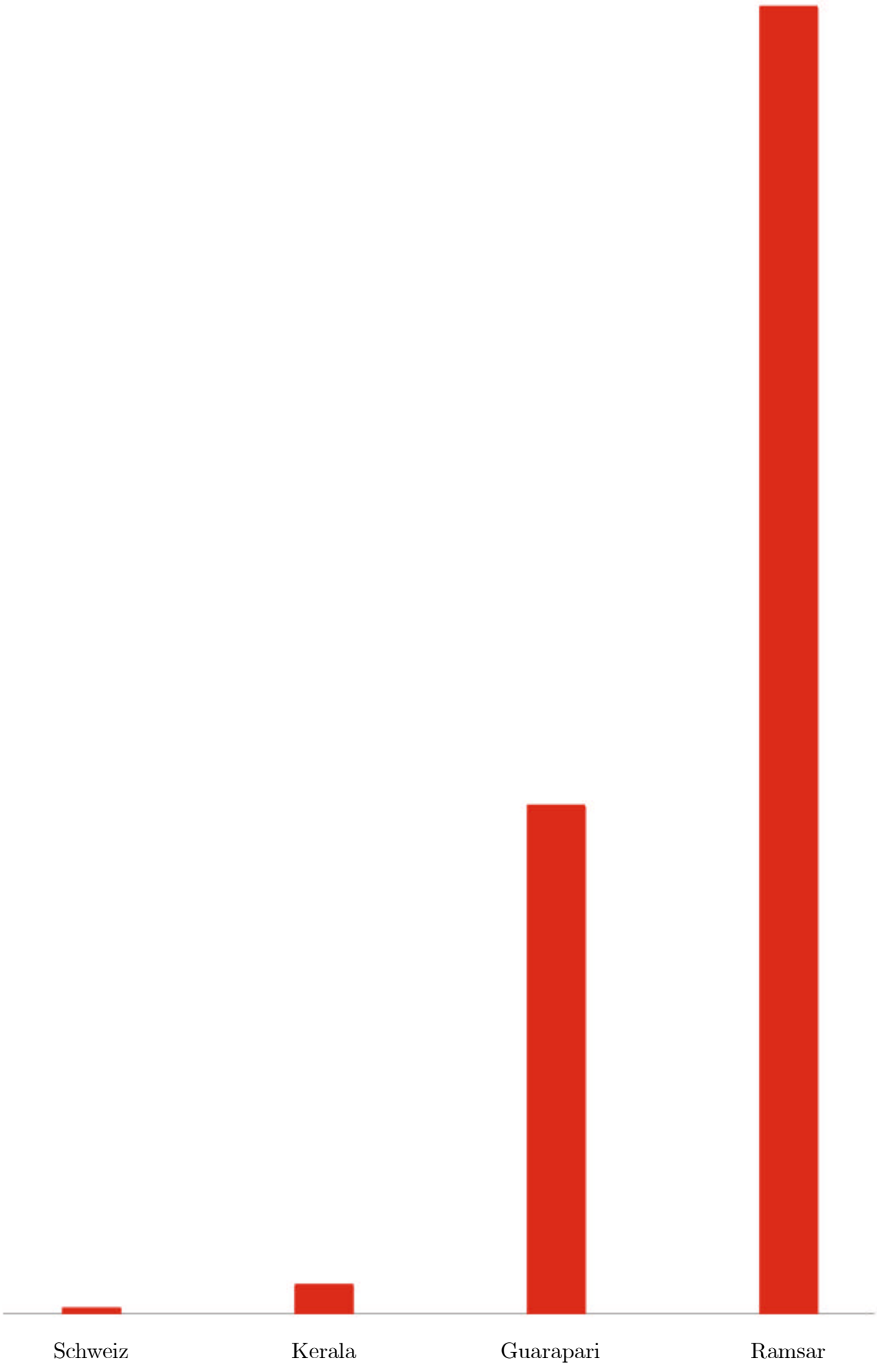

Abbildung 21: Maximale terrestrische Strahlung an verschiedenen Orten

3.3.2 Künstliche Strahlenbelastung

Der Hauptanteil der künstlichen Strahlenbelastung stammt aus der Medizin (Röntgendiagnostik, Strahlentherapie, Nuklearmedizin), wobei die individuellen Belastungen extrem unterschiedlich sind. Durch die Röntgendiagnostik ergibt sich eine mittlere jährliche Dosis von 1 mSv.

Die übrigen Beiträge zur künstlichen Strahlenbelastung sind gering. Der Fallout früherer Atomwaffentests und des Reaktorunfalls von Tschernobyl liefert zur Zeit noch weniger als 0,01 mSv pro Jahr. Technik, Forschung und Kernkraftwerke (im Normalbetrieb) ergeben zusammen ebenfalls weniger als 0,01 mSv pro Jahr und Kleinquellen (Leuchtzifferblätter, Fernsehgeräte, Rauchen) und Flüge liefern zusammen im Mittel weitere 0,01 mSv pro Jahr. Diese Beiträge sind nicht nur viel kleiner als die natürliche und die medizinische Strahlenbelastung, sondern sogar viel kleiner als die lokalen und individuellen *Unterschiede* der natürlichen und der medizinischen Strahlenbelastung.

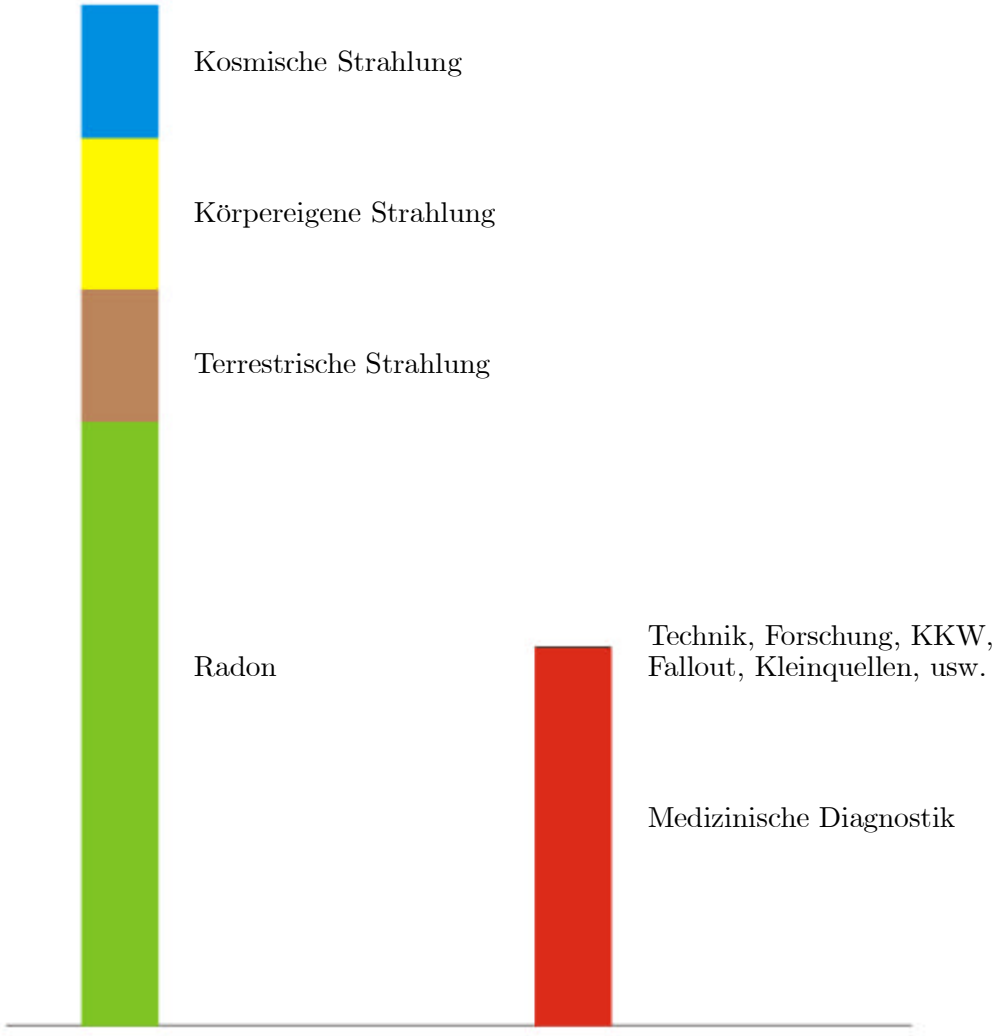

Abbildung 22: Natürliche und zivilisatorische Strahlenbelastung in der Schweiz. Die Strahlenbelastung durch Technik, Forschung, KKW, Fallout, Kleinquellen usw. wird durch den dünnen schwarzen Strich am oberen Ende des roten Balkens dargestellt.

3.4 Biologische Effekte ionisierender Strahlung

Die primären Prozesse, die sich bei der Absorption ionisierender Strahlung abspielen, sind rein physikalischer Art und unabhängig davon, ob die Absorption in einem lebenden Organismus oder in unbelebter Materie erfolgt. Diese primären Prozesse bewirken hauptsächlich eine Anregung oder Ionisation von Atomen oder Molekülen. In einem lebenden Organismus werden aber dadurch biochemische Reaktionen ausgelöst, die eine enorme Verstärkung der primären Strahlenwirkung zur Folge haben. Dies hängt damit zusammen, dass ein lebender Organismus als ein hochempfindliches kybernetisches System betrachtet werden kann. Wie empfindlich das System ist, zeigt sich an folgendem Beispiel: Bei einer kurzzeitigen Ganzkörperbestrahlung des Menschen mit der Semiletaldosis (50 % Todesfälle innerhalb von 30 Tagen) wird von je 25 Millionen Molekülen primär lediglich 1 Molekül verändert.

Die Strahlenschädigungen manifestieren sich erst nach einer von Art und Intensität der Bestrahlung abhängigen *Latenzzeit*. Diese kann bei kurzzeitiger Bestrahlung mit hoher Dosis Tage, Stunden oder gar nur Minuten betragen (*Frühschäden*), bei langzeitiger Bestrahlung mit geringer Dosis dagegen Jahre oder Jahrzehnte (*Spätschäden*). Es besteht auch die Möglichkeit, dass eine Bestrahlung Frühschäden bewirkt, die wieder abklingen, und dass dann nach einer Latenzzeit von Jahren oder Jahrzehnten noch Spätschäden anderer Art auftreten.

3.5 Einfluss der Bestrahlungsweise

Die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlungen werden im wesentlichen durch 3 Parameter bestimmt.

- Dosis
- Ganzkörper- oder Teilkörperbestrahlung
- Zeitdauer der Bestrahlung

Es ist offensichtlich, dass erstens einmal die Dosis der Strahlung massgebend ist, ob überhaupt eine Schädigung auftritt und wie schwerwiegend diese ist.

Jedoch kann eine Strahlungsdosis, die bei Ganzkörperbestrahlung bereits zu schweren Schäden führt, bei einer Teilkörperbestrahlung (z.B. Hände) relativ harmlos sein.

Ferner kann die gleiche Dosis, die in kurzer Zeit verabreicht zu Schäden führt, ohne Folgen bleiben, wenn sie übere längere Zeit gleichmässig verteilt wird oder in mehreren kleineren Portionen mit Unterbrüchen aufgenommen wird. Wird zum Beispiel die Dosis, die in 50 % der Fälle tödlich wirkt, wenn sie in kurzer Zeit appliziert wird, auf 50 Jahre gleichmässig verteilt, so treten mit grosser Wahrscheinlichkeit überhaupt keine Wirkungen auf.

All diese Effekte zeigen sich schon bei der Sonnenstrahlung.

Das Auftretem eines Sonnenbrandes und seine Schwere hängt ab von der empfangenen Dosis Sonnenstrahlung.

Eine Dosis, die lediglich unangenehme Wirkungen hat, wenn davon z.B. nur die Hände und Arme betroffen waren, kann bedrohliche Folgen haben, wenn der ganze Körper der Sonnenstrahlung ausgesetzt war.

Eine Dosis Sonnenstrahlung, die über drei Wochen Ferien verteilt, zu einer schönen(?) Hautbräunung führt, ergibt einen gefährlichen Sonnenbrand, wenn sie an einem einzigen Nachmittag (z.B. im Hochgebirge) aufgenommen wird.

Dass sich die Strahlenschädigungen durch Sonnenstrahlung genau gleich verhalten wie diejenigen durch radioaktive Strahlung, ist nicht besonders erstaunlich, denn in beiden Fällen handelt es sich um ionisierende Strahlung. Im Fall der Sonnenstrahlung werden die Strahlenschäden durch den ionisierenden Ultraviolett-Anteil der Strahlung verursacht, doch die primären elementaren Prozesse in den Körperzellen sind in beiden Fällen die gleichen. Der einzige wesentliche Unterschied zwischen Sonnen- und z.B. Gammastrahlen besteht darin, dass bei der Sonnenstrahlung die Wirkung auf die äussersten Hautschichten beschränkt ist, während bei Gammastrahlen auch das Körperinnere betroffen wird.

3.6 Stochastische und nichtstochastische Strahlenschäden

Es können zwei Arten von Strahlenschäden unterschieden werden:

Stochastische Strahlenschäden
Nichtstochastische Strahlenschäden .

Abbildung 23 zeigt den unterschiedlichen Verlauf der Eintrittshäufigkeit und der Schwere des Schadens für stochastische und nichtstochastische Schäden.

Bei nichtstochastischen Strahlenschäden spielt die Regenerationsfähigkeit der betroffenen Zellen eine wesentliche Rolle, und die Schädigung ist daher abhängig von der Dosis. Bei genügend niedriger Dosis hebt die Regeneration die Strahlenwirkung auf, und es tritt keine Schädigung auf. Somit ist eine Schädigung erst oberhalb eines bestimmten *Schwellenwertes* der Dosis feststellbar. Dieser Schwellenwert hängt auch von der Dosisleistung ab. Bei hohen Dosisleistungen kann die Regenerationsfähigkeit der Zellen überfordert werden. Eine bestimmte Dosis kann daher, wenn sie in kurzer Zeit (also mit hoher Dosisleistung) appliziert wird, zu Schädigungen führen, dagegen ohne Schadenfolgen bleiben, wenn sie über längere Zeit verteilt (also mit kleiner Dosisleistung) aufgenommen wird. Abgesehen davon nimmt die Schwere des Schadens mit der Dosis zu.

Bei stochastischen Schäden ist hingegen die Schwere des Schadens unabhängig von der Höhe der Dosis. Die Eintretenswahrscheinlichkeit des Schadens nimmt jedoch mit der Dosis zu.

Genau die gleichen Phänomene können auch bei der Sonnenstrahlung beobachtet werden. Sonnenbrand ist ein nichtstochastischer Schaden der Sonnenbestrahlung. Die gleiche Dosis Sonnenstrahlung, die in kurzer Zeit (Stunden) appliziert, einen (unter Umständen gefährlichen) Sonnenbrand verursacht, bewirkt nur eine harmlose Hautbräunung, wenn sie in kleiner Intensität über längere Zeit (Tage) verteilt aufgenommen wird.

Hautkrebs ist ein stochastischer Schaden der Sonnenbestrahlung. Das Risiko, an Hautkrebs zu erkranken, ist nur abhängig von der total aufgeommenen Strahlung und nicht abhängig von der zeitlichen Verteilung. Die Schwere des Schadens ist jedoch unabhängig von der Dosis.

Während sich bei relativ hohen Strahlendosen der Zusammenhang zwischen Dosis und Schadenswahrscheinlichkeit leicht feststellen lässt, ist es sehr schwierig, bei niedrigen Dosen nachzuweisen, ob ein Schaden auftritt. Dies hat zwei Gründe.

Erstens gibt es keine strahlenspezifischen stochastischen Schäden. Ein Krebs, der durch Strahlung verursacht wurde, lässt sich nicht von einem natürlicherweise auftretenden Krebs unterscheiden. Das Gleiche gilt für genetische Schäden.

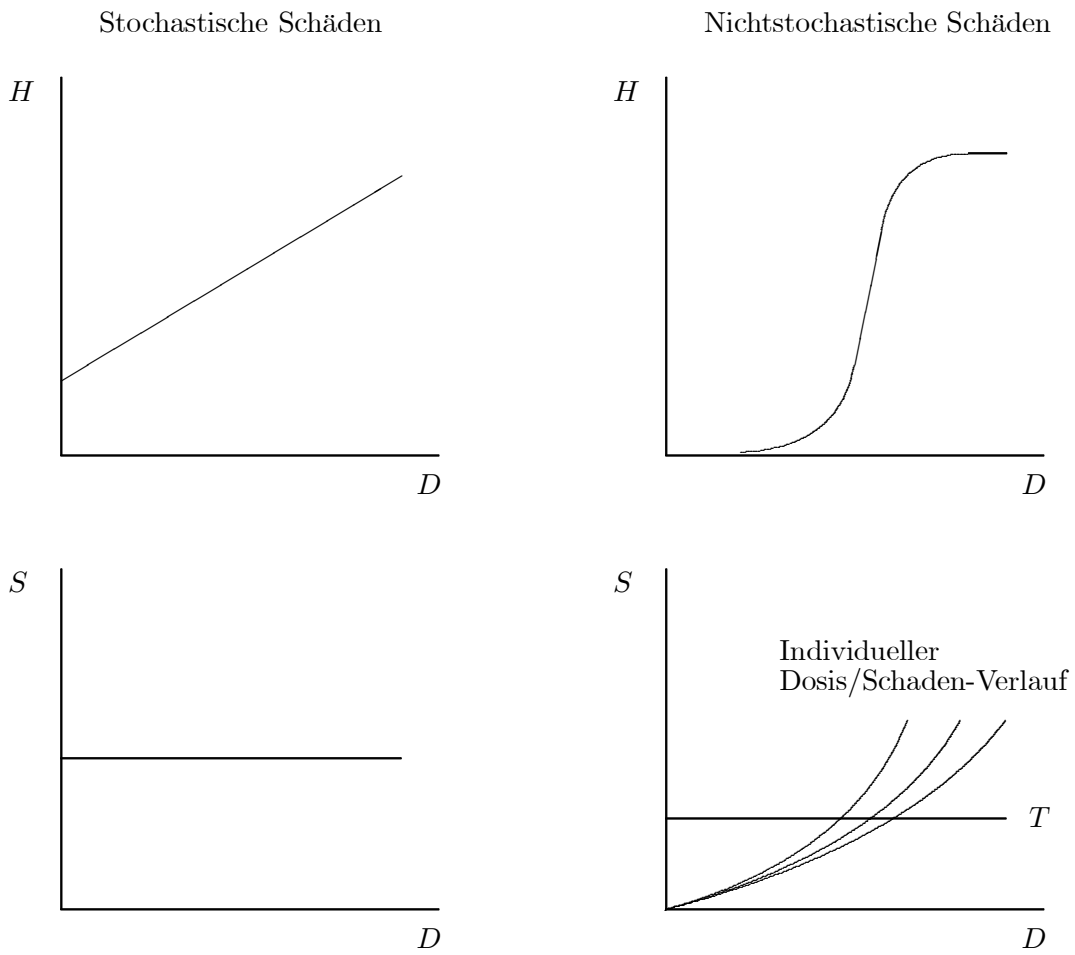

Abbildung 23: Stochastische und nichtstochastische Schäden

D	=	Dosis
H	=	Eintrittshäufigkeit
S	=	Schwere des Schadens
T	=	Schwelle der Schadenserkennung

Zweitens muss wegen der statistischen Schwankungen eine Stichprobe unrealisierbar gross sein, damit sich ein Effekt, der mit kleiner Wahrscheinlichkeit auftritt, sicher nachweisen lässt (s. Anhang A).

Hautverbrennungen und die *akute Strahlenkrankheit* sind typische nichtstochastische Wirkungen, während Krebsentstehung und genetische Schäden die wichtigsten stochastischen Wirkungen sind.

Die Symptome der Strahlenkrankheit sind: Übelkeit, Erbrechen, Diarrhö, Blutungen, Ausschlag, Entzündungen von Mund und Rachen, Haarausfall, Fieber, Kräftezerfall. Die ersten leichteren Symptome erscheinen ab etwa 0.8 Sv, und mit zunehmender Dosis treten immer mehr der schwereren Symptome auf.

Im allgemeinen ist die *Strahlenresistenz* umso höher, je weniger hoch entwickelt der Organismus ist. Die *Semiletaldosis* für Menschen beträgt 5 Sv, für Schnecken 200 Sv und für Amöben 1000 Sv. Für Schweine und Ziegen ist sie jedoch kleiner als 5 Sv.[8]

3.7 Hormesis

Schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts wurden immer wieder Hinweise darauf gefunden, dass bei sehr kleinen Dosen die Schadenswahrscheinlichkeit nicht nur völlig verschwindet, sondern dass im Gegenteil eine positive Wirkung auftritt.

Der Effekt, dass ein Agens, das in hohen Dosen schädlich wirkt, in kleinen Dosen eine positive Wirkung haben kann, wird *Hormesis* genannt. Dieses Phänomen ist keineswegs völlig neu, sondern in der Medizin längst bekannt. Ein typisches Beispiel sind die Spurenelemente. Viele chemische Elemente, wie zum Beispiel Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän, die in grösseren Mengen für den menschlichen Organismus giftig wirken, sind als Spurenelemente nicht nur nicht schädlich, sondern sogar lebensnotwendig.

Neuere Studien zeigen nun deutlich, dass auch bei ionisierender Strahlung Hormesis auftritt. Zum Beispiel wurde die Sterblichkeit von amerikanischen, kanadischen und britischen Arbeitern in der Nuklearindustrie untersucht. Die Sterblichkeit der mit niedrigen Dosen strahlungsexponierten Arbeiter ist statistisch signifikant kleiner als die der nicht exponierten Arbeiter.

Das gleiche Resultat ergab sich bei der Untersuchung der Sterblichkeit von rund 70'000 Arbeitern in acht US-Schiffswerften. Dabei wurden 38'230 exponierte mit 32'510 nichtexponierten Arbeitern verglichen. Diese Resultate blieben natürlich nicht unwidersprochen und werden zum Teil heftig angegriffen. Die Argumentation der Kritiker wirkt jedoch wenig überzeugend. Zum Beispiel wird geltend gemacht, die geringere Sterblichkeit der Arbeiter in Nuklearanlagen sei auf den „Healthy-Worker-Effect“ zurückzuführen, d.h. auf die selektive Rekrutierung von im Mittel erheblich gesünderen Personen aus der Gesamtbevölkerung und auf die ständig verfügbare besonders gute Gesundheitsvorsorge. Dieses Argument ist jedoch überhaupt nicht stichhaltig. Es geht völlig an der Tatsache vorbei, dass die miteinander verglichenen Gruppen von Arbeitern a) im gleichen Werk arbeiteten, b) die gleichen Aufnahmebedingungen erfüllten und c) die gleiche medizinische Vorsorge erhielten.

Manche Kritiker bestreiten nicht nur die Existenz des Hormesis-Effekts, sondern behaupten auch, die allgemein als konservative Extrapolation angesehene lineare Dosis-Wirkung-Beziehung sei eine zu optimistische Einschätzung und bei kleinen Dosen sei die Wirkung sogar überproportional. Diese Behauptung widerspricht allen bisherigen Erkenntnissen und trägt nicht zur Überzeugungskraft ihrer Argumente bei. Selbstverständlich bezweifeln die Vertreter der Hormesis-Hypothese keineswegs die Schädlichkeit hoher Strahlungsdosen.

Wohl eines der eindrücklichsten Beispiele von Strahlen-Hormesis wurde gegen Ende des 20. Jahrhunderts in Taiwan gefunden. In einer in den Jahren 1982 bis 1984 erstellten Überbauung mit 180 Mehrfamilienhäusern war rezyklierter Stahl verwendet worden, dem illegal entsorgtes Kobalt-60 beigemischt worden war.

Kobalt-60 ist radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5.3 Jahren durch Betazerfall in Nickel-60, wobei eine harte Gammastrahlung auftritt.

[8] Ist das jetzt eine Ausnahme der erwähnten Regel, oder heisst das, dass Schweine und Ziegen höher entwickelt sind als Menschen?

1992 wurde die Kontamination der Gebäude entdeckt. In den folgenden Jahren wurde in mehr als 1600 Wohnungen die Strahlung gemessen. 1996 wurde mit der Evakuation der Bewohner der Wohnungen mit den höchsten Strahlenbelastungen begonnen.

Insgesamt 10'000 Bewohner lebten in diesen Häusern zwischen 9 und 20 Jahren. Mit verschiedenen Methoden wurden die Strahlungsdosen in den Wohnungen gemessen und auf Grund der Halbwertszeit von Kobalt-60 auf 1983 zurückgerechnet. Es zeigte sich, dass zu dieser Zeit 8000 Personen eine Dosis von 18 mSv pro Jahr erhielten, 900 Personen eine Dosis von 60 mSv pro Jahr und 1100 Personen eine Dosis von 525 mSv pro Jahr. Die zwischen 1983 und 2003 akkumulierte Dosis variierte zwischen 120 und 4000 mSv und betrug im gewichteten Mittel über alle Gruppen 400 mSv.

Trotz dieser zusätzlichen Strahlenbelastung wurden bei den Bewohnern keinerlei Gesundheitsschäden festgestellt und die Krebshäufigkeit war nicht etwa erhöht, sondern im Gegenteil deutlich tiefer als bei der übrigen Bevölkerung. Abbildung 24 zeigt die Krebshäufigkeit bei den Bewohnern der Wohnungen im Vergleich zu derjenigen der übrigen Bevölkerung [7].

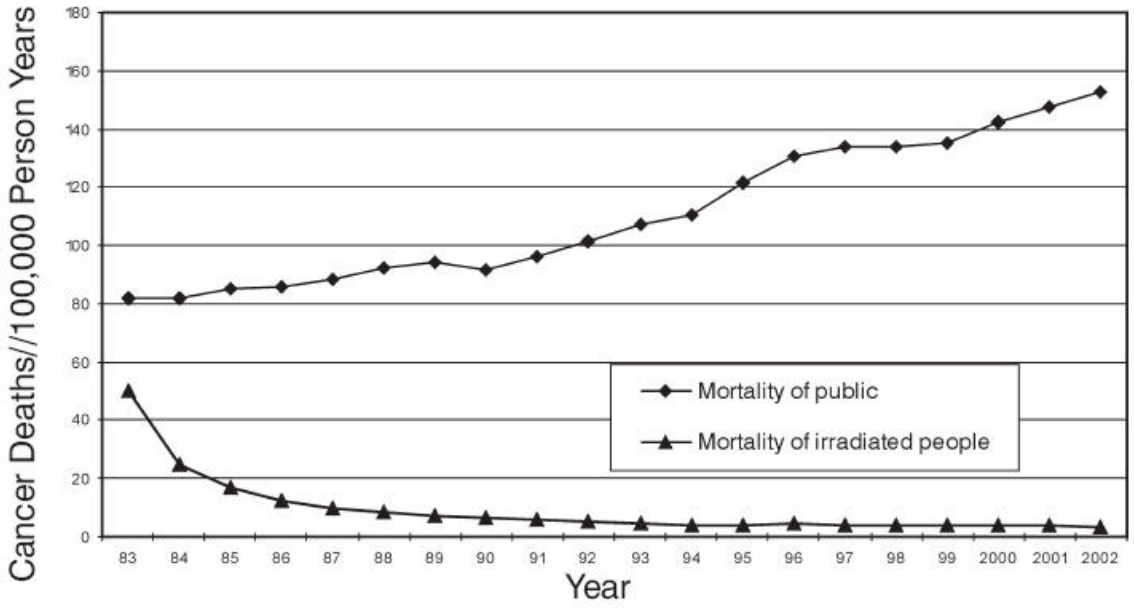

Abbildung 24: Krebshäufigkeit bei den Bewohnern der Wohnungen und bei der übrigen Bevölkerung

Die durch die Rhomben (◊) gehende ansteigende Kurve zeigt die Zahl der Krebstodesfälle der übrigen Bevölkerung, die durch die Dreiecke (△) laufende absinkende Kurve gibt die Zahl der Krebstodesfälle der bestrahlten Bewohner.

4 Ein geisterhaftes Teilchen

4.1 Das Rätsel des Betazerfalls

In den Jahren 1920 bis 1927 zeigte eine grosse Zahl von Experimenten, dass die Elektronen beim Betazerfall ein kontinuierliches Energiespektrum aufweisen, d.h. die Energie der einzelnen Betateilchen liegt zwischen Null und einem bestimmten Maximalwert. Bei einem Alphazerfall $A \rightarrow B + \alpha$ hingegen haben alle Alphateilchen die gleiche Energie und diese ist genau gleich der Energiedifferenz der beiden Kerne A und B.

Bei einem Betazerfall $X \rightarrow Y + \beta$ ist nur die Maximalenergie der Betateilchen gleich der Energiedifferenz der beiden Kerne X und Y. Für alle anderen Betateilchen scheint der Energieerhaltungssatz verletzt zu sein. Wenn die Spins des Elektrons und der Kerne X und Y verglichen werden, scheint auch der Drehimpulserhaltungssatz verletzt zu sein.

In den folgenden Jahren wurde das Problem des Betazerfalls intensiv diskutiert. Einige Physiker, insbesondere auch Niels Bohr (1885–1962), zogen in Betracht, dass die Erhaltungssätze vielleicht nur im makroskopischen Mittel gelten würden, während sie für die einzelnen mikroskopischen Elementarprozesse verletzt sein könnten.

Abbildung 25: N. Bohr und W. Pauli

Mit diesem Gedanken konnte sich Wolfgang Pauli (1900–1958) gar nicht befreunden. Er kritisierte Bohr, er sei auf einem „völlig falschen Gleis“. Er war damals überzeugt, dass Gammastrahlen die Ursache für das kontinuierliche Betaspektrum seien – womit er sich jedoch ebenfalls auf einem falschen Gleis befand.

Pauli stellte 1925 sein Ausschliessungsprinzip auf, wofür er 1945 den Nobelpreis erhielt. Das Ausschliessungsprinzip besagt (vereinfacht ausgedrückt), dass zwei Fermionen (d.h. Teilchen mit halbzahligem Spin) niemals den selben Quantenzustand besetzen können. Das Ausschliessungsprinzip erklärt den Schalenaufbau der Atomhüllen und damit das Periodische System der chemischen Elemente.

Es gibt (inoffiziell) noch ein zweites Paulisches Ausschliessungsprinzip: „Wolfgang Pauli und ein funktionierendes Gerät können sich niemals im gleichen Raum befinden.“ Es gibt zahllose Anekdoten, dass sich kleinere oder auch grössere Katastrophen ereignet haben sollen, sobald Pauli ein Labor betreten habe. Das Phänomen war berühmt – oder berüchtigt – unter dem Namen „Pauli-Effekt“.

4.2 Die Neutrinohypothese

Gegen Ende November 1930 kam Pauli auf eine Idee, die er jedoch so revolutionär fand, dass er es zunächst nicht wagte, sie zu publizieren. Statt dessen sandte er einen Brief an die Teilnehmer einer Physiker-Tagung in Tübingen, der mit den folgenden Worten begann:

> Liebe Radioaktive Damen und Herren!
> Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der falschen Statistik der N- und Li6-Kerne, sowie des kontinuierlichen Betaspektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um den Wechselsatz der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. [...] Das kontinuierliche Betaspektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim Betazerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Der Brief schloss mit den Worten:

> Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren, und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde wie ein Gamma-Strahl [...] Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin. . . .
> Euer untertänigster Diener W. Pauli

Pauli versuchte mit seiner kühnen Hypothese zwei Probleme zu lösen, einerseits das Problem des kontinuierlichen Energiespektrums beim Betazerfall und andererseits das Problem der „falschen Statistik“. Zu dieser Zeit glaubte man noch, der Atomkern sei aus Protonen und Elektronen aufgebaut. Diese Annahme führte jedoch auf Widersprüche zu den beobachteten Eigenschaften gewisser Kerne, u.a. Stickstoff (N) und Lithium (Li6). Später stellte sich tatsächlich heraus, dass die Atomkerne neutrale Teilchen, die sog. *Neutronen*, enthalten, aber es zeigte sich schnell, dass diese nicht identisch sind mit den neutralen Teilchen, die beim Betazerfall zusätzlich zum Elektron emittiert werden. Nachdem das Neutron entdeckt worden war, taufte Enrico Fermi (1901–1954) das beim Betazerfall emittierte neutrale Teilchen in *Neutrino* („kleines Neutron“) um. Um die beiden von Pauli erwähnten Probleme zu lösen, brauchte es also nicht nur *ein* neues Teilchen, sondern sogar *zwei* neue Teilchen.

4.3 Der Nachweis des Neutrinos

Neutrinos haben eine extrem kleine Wechselwirkung mit Materie. Pauli unterschätzte ihr Durchdringungsvermögen gewaltig. Während – wie bereits erwähnt – 5 cm Blei ausreichen, um die Intensität eines Gammastrahls auf 10 Prozent zu reduzieren, wäre eine Bleischicht mit einer Dicke von 9 Lichtjahren erforderlich, um für einen Neutrinostrahl die gleiche Abschwächung zu erreichen.

Die verschwindend kleine Wechselwirkung zwischen Neutrinos und Materie kann auch durch die Tatsache veranschaulicht werden, dass jeder Mensch dauernd von rund 65 Milliarden Neutrinos

pro Quadratzentimeter und Sekunde durchdrungen wird, ohne dass er etwas davon merkt oder gar dadurch geschädigt wird. Diese Neutrinos stammen von den Kernprozessen im Sonneninneren. Dabei spielt es überhaupt keine Rolle, ob die Sonne über oder unter dem Horizont steht; die Erde ist für Neutrinos rund 5 Millionen mal „durchsichtiger“ als eine 4 mm dicke Fensterscheibe für sichtbares Licht.

Da die Funktion eines Teilchendetektors stets auf der Wechselwirkung des betreffenden Teilchens mit der Materie des Detektors beruht, bedeutet die extrem kleine Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie, dass es äusserst schwierig ist, Neutrinos nachzuweisen.

Erst als sehr intensive Neutrino-Quellen in Form von grossen Kernreaktoren zur Verfügung standen, rückte der Nachweis der Neutrinos in den Bereich des Möglichen. 1956, also 26 Jahre nach der Aufstellung der Neutrino-Hypothese durch Pauli, gelang es Frederick Reines (1918–1998) und Clyde Cowan (1919–1974) mit einem raffinierten Experiment, die durch die Betazerfälle in einem Kernreaktor emittierten Neutrinos nachzuweisen. Reines erhielt dafür 1995 den Nobelpreis – für Cowan kam diese Ehrung leider 20 Jahre zu spät.

Abbildung 26: Reines und Cowan an ihrem Neutrino-Experiment

Es ist gewissermassen typisch für die Denkweise der Physiker, dass sie während 26 Jahren lieber an die Existenz eines „geisterhaften“ Teilchens, als wirklich an die Verletzung des Energieerhaltungssatzes glaubten.

4.4 Teilchen und Antiteilchen

Zu jedem Elementarteilchen gibt es ein *Antiteilchen*. Dieses hat die gleiche Masse und den gleichen Spin wie das zugehörige Teilchen, aber entgegengesetzte elektrische Ladung (und ladungsabhängige Quantenzahlen). Manche, aber nicht alle elektrisch neutralen Teilchen sind identisch mit ihrem Antiteilchen (z.B. unterscheidet sich das Antineutron vom Neutron durch das umgekehrte Vorzeichen seines magnetischen Moments).

Das Antiteilchen des Elektrons ist das *Positron*. Es gibt einerseits die sog. β^--Zerfälle, bei denen

ein Elektron emittiert wird, und andererseits gibt es aber auch die sog. β^+-Zerfälle, bei denen ein Positron emittiert wird.

Es zeigt sich, dass den Teilchen gewisse Quantenzahlen zugeordnet werden können, und dass dann Erhaltungssätze für diese Quantenzahlen gelten. Wenn dem Elektron die *Leptonenzahl* 1 gegeben wird, muss dem Positron die Leptonenzahl -1 zugeordnet werden. Da die Leptonenzahl erhalten bleibt und sie vor dem Betazerfall null ist, muss sie auch nach dem Zerfall null sein. Das bedeutet, dass das mit dem Elektron zusammen emittierte Neutrino die Leptonenzahl -1 haben muss. Es wird daher als *Antineutrino* bezeichnet. Entsprechend wird beim β^+-Zerfall zusammen mit dem Positron (Leptonenzahl: -1) ein Neutrino (Leptonenzahl: $+1$) emittiert.

Das Positron wurde 1928 von Paul A.M. Dirac (1902–1984) auf Grund seiner Dirac-Gleichung vorausgesagt und 1932 von Carl David Anderson (1905–1991) in der kosmischen Strahlung entdeckt. 1936 fanden Anderson und Seth Henry Neddermeyer (1907–1988) ebenfalls in der kosmischen Strahlung ein weiteres Teilchen, das später *Myon* genannt wurde.

Das Myon hat im wesentlichen die gleichen Eigenschaften wie das Elektron, aber eine rund 207mal grössere Masse. Es ist jedoch instabil und zerfällt (mit einer mittleren Lebensdauer von 2.2 μs) in ein Elektron, ein Myonneutrino und ein Antielektronneutrino: $\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$. Dieser Zerfall ist ein schönes Beispiel für die Leptonenzahlerhaltung. Da vor dem Zerfall die Elektronenzahl gleich null ist und beim Zerfall ein Elektron e mit der Elektronenzahl 1 entsteht, muss gleichzeitig ein Antielektronneutrino $\bar{\nu}_e$ mit der Elektronenzahl -1 gebildet werden, damit die Elektronenzahl erhalten bleibt. Da ferner vor dem Zerfall ein Myon mit der Myonenzahl<indexMyonenzahl 1 vorhanden ist, muss beim Zerfall ein Myonneutrino mit der Myonenzahl 1 entstehen, damit auch die Myonenzahl erhalten bleibt.

1975 wurde von Martin L. Perl (*1927) und seinen Mitarbeitern ein noch schwereres „Elektron“ entdeckt, das *Tauon* oder *Tau-Lepton* genannt wurde. Seine Masse ist das 3477fache der Elektronenmasse und seine Lebensdauer beträgt $3 \cdot 10^{-13}$ s. Zum Tauon gehört auch eine weitere Art von Neutrino.

Elektron, Myon und Tauon unterscheiden sich nur in der Masse voneinander, und es ist bis heute nicht klar, warum die „schwereren Elektronen“ überhaupt existieren. Das Problem wird besonders schön ausgedrückt durch die berühmt gewordene verzweifelte Frage, die Isidor Isaac Rabi (1898–1988) nach der Entdeckung des Myons stellte: „Who ordered that?“ [9]

[9] Wer hat das bestellt?

5 Atomkern

5.1 Thomsonsches Atommodell

J.J. Thomson bestimmte 1897 die spezifische Ladung (e/m) der Teilchen der Kathodenstrahlen und machte 1899 erste Messungen[10] der elektrischen Ladung dieser Teilchen.

Abbildung 27: J.J. Thomson

Die Experimente von Michael Faraday (1791–1867) hatten gezeigt, dass bei der Elektrolyse ein Zusammenhang zwischen der zugeführten elektrischen Ladung und der abgeschiedenen Stoffmenge besteht. Da die Materie aus kleinsten Bausteinen, den Atomen, aufgebaut ist, muss es wegen dieses Zusammenhangs auch kleinste Teile für die elektrische Ladung geben. Für diese Ladungseinheit wurde bereits 1891 von George Johnston Stoney (1826–1911) der Name „Elektron“ vorgeschlagen. Da die Teilchen der Kathodenstrahlen offenbar nichts anderes waren als diese Ladungseinheit, wurden sie Elektronen genannt (vgl. Abschnitt 1.1).

Auf Grund der Erkenntnis, dass in der elektrisch neutralen Materie elektrisch geladene Elektronen enthalten sind, entwickelte Thomson 1903 ein Atommodell.

Das Atom bestand aus Elektronen, die sich in einer gleichmässig verteilten „Wolke“ aus positiver Ladung bewegten. Der positiven Ladung wurde keine Masse zugeordnet, sondern die ganze Masse des Atoms wurde auf die Masse der Elektronen zurückgeführt. Zuerst war man noch der Meinung, dass die Zahl der Elektronen gross sei, z.B. etwa 500 für Wasserstoff und etwa 8000 für Sauerstoff. Erst um 1906 realisierte man, dass die Zahl der Elektronen gleich der Ordnungszahl des chemischen Elements im periodischen System der chemischen Elemente ist.

Schon bei den ersten Atommodellen zeigte sich eine grundsätzliche Schwierigkeit. Ruhende Elektronen können kein stabiles System bilden, und in einem begrenzten Raum bewegte Elektronen müssen sich beschleunigt (z.B. auf Kreisbahnen) bewegen und daher nach den Gesetzen der Elektrodynamik ständig elektromagnetische Wellen und somit Energie abstrahlen. Dieses Problem wurde erst 1926 durch die Quantenmechanik gelöst.[11]

[10] Diese Messungen waren noch nicht so genau wie diejenigen von Robert Andrews Millikan (1868–1953) in den Jahren 1909 bis 1913, aber für eine neue Messmethode war die Genauigkeit respektabel.

[11] Siehe z.B. Skript des Vortrags „Wellen oder Teilchen?“

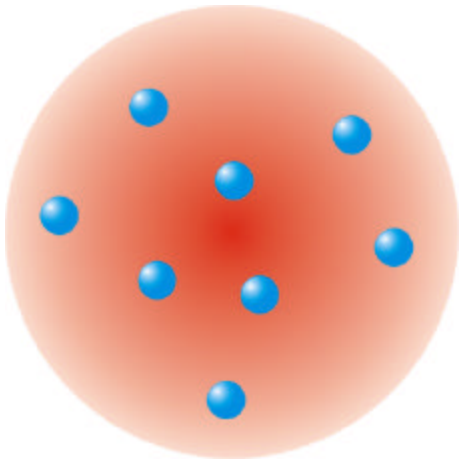

Abbildung 28: Thomsonsches Atommodell

5.2 Rutherfordsches Streuexperiment

Zwei Mitarbeiter von Rutherford Hans Wilhelm Geiger (1882–1945) und Ernest Marsden (1889–1970), machten 1909 Messungen der Streuung von Alphateilchen an dünnen Metallfolien.

Abbildung 29: H. Geiger und E. Marsden

H. Geiger entwickelte 1928 zusammen mit seinem Assistenten, Walther Müller (1905–1979), das *Auslösezählrohr*, das auch *Geiger-(Müller-)Zählrohr* genannt wird.

Die schematische Abbildung 30 zeigt die experimentelle Anordnung. Die Alphateilchen, die von der radioaktiven Quelle R emittiert werden, werden durch die Blende D in Form eines feinen Strahls auf die Metallfolie F gerichtet. Die von den Metallatomen gestreuten Alphateilchen, die den Zinksulfid-Leuchtschirm S treffen, erzeugen dort kleine Lichtblitze, die mit dem Mikroskop M beobachtet werden können. Da Alphateilchen schon beim Durchgang durch die Luft stark abgebremst würden, wird die mit einem Glasdeckel P verschlossene Streukammer B durch das Rohr T mit Hilfe einer Vakuumpumpe evakuiert. Um den Streuwinkel (d.h. den Winkel zwischen dem einfallendem Strahl und den beobachteten gestreuten Teilchen) zu verändern, wird der mit einem Teilkreis versehene

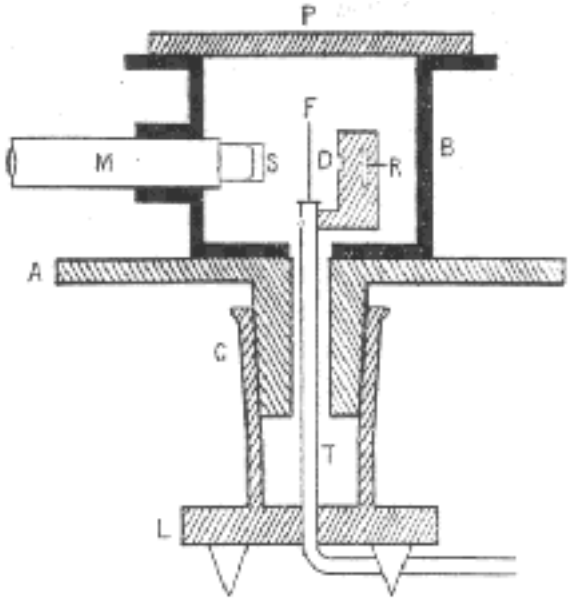

Abbildung 30: Streu-Experiment mit Alphateilchen

Tisch A mitsamt der Kammer B gegenüber der mit dem feststehenden Rohr T verbundenen Quelle R verdreht. Der konische vakuumdichte Schliff C ermöglicht diese Drehung.

Abbildung 31 zeigt schematisch die Geometrie des Experiments.

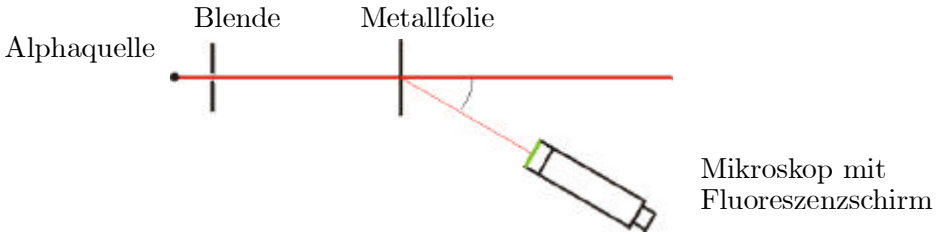

Abbildung 31: Geometrie des Streuexperiments. Messung der unter dem Streuwinkel ϑ gestreuten Alphateilchen

Die Metallfolien waren so dünn, dass sie von den Alphateilchen mit nur geringem Energieverlust durchdrungen wurden. Die Dicke der dünnsten Goldfolie betrug nur 0.2 Mikrometer.

Nur ein ganz geringer Bruchteil der Alphateilchen wird überhaupt gestreut. Wenn 10 Millionen Alphateilchen auf eine 0.2 μm dicke Goldfolie treffen, so werden unter einem Streuwinkel ϑ von 45° in einem Abstand von 1 cm auf einem 1 mm^2 grossen Leuchtschirm nur 3 bis 4 gestreute Alphateilchen beobachtet.

Eines Tages kam Rutherford in das Labor, in dem Geiger und Marsden ihre Messungen machten. Nachdem er ihnen kurz zugeschaut hatte, schlug er plötzlich vor, sie sollten doch einmal versuchen, ob sie auch an der Goldfolie *reflektierte* Alphateilchen beobachten könnten (s. Abbildung 32).

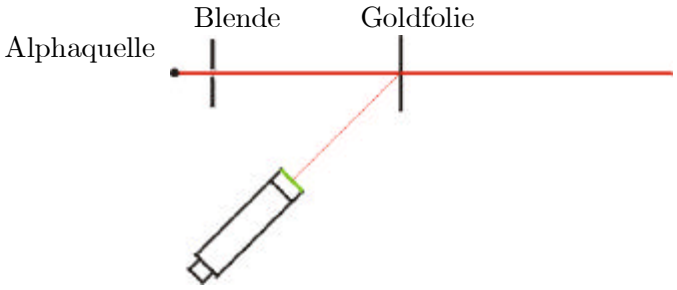

Abbildung 32: Rückwärtsstreuung der Alphateilchen

Rutherford erwartete vermutlich nicht wirklich, dass Alphateilchen unter Winkeln von mehr als 90° gestreut würden. Jedenfalls war er sehr überrascht, als Geiger und Marsden tatsächlich nach rückwärts gestreute Teilchen beobachteten. In einer seiner letzten Vorlesungen beschrieb er rückblickend seine Reaktion auf die beobachtete Rückwärts-Streuung mit den Worten:

> „It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.“[12]

Nach langem Überlegen kam Rutherford schliesslich zur Erkenntnis, dass die beobachtete Rückwärts-Streuung nur möglich ist, wenn nahezu die ganze Masse des Atoms in einem sehr kleinen Volumen konzentriert ist. 1911 stellte er ein neues Atommodell vor zusammen mit einer Theorie, die die Streuung der Alphateilchen erklärte. Die mit der *Rutherfordschen Streuformel* berechneten Werte (der Wirkungsquerschnitte) waren in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Beim Erfolg der Rutherfordschen Theorie spielte auch das Glück eine gewisse Rolle. Wären die Streuversuche mit Alphateilchen höherer Energie oder mit leichteren Elementen durchgeführt worden, so wären die Alphateilchen den Atomkernen so nahe gekommen, dass sie nicht allein durch die elektrischen Kräfte abgelenkt, sondern auch durch die (damals noch völlig unbekannten Kernkräfte) beeinflusst worden wären. Andererseits war die Energie der Alphateilchen gross genug, dass die Streuung an den Elektronen vernachlässigbar war. Zudem stimmt für ein Coulomb-Potential die klassische und die quantenmechanische Berechnung des Wirkungsquerschnittes überein. Ohne diese glücklichen Umstände hätte Rutherford mit den damaligen Kenntnissen wohl kaum eine Streuformel herleiten können, durch die die experimentellen Resultate so gut wiedergegeben wurden.

5.3 Rutherfordsches Atommodell

Im *Rutherfordschen Atommodell* ist nahezu die ganze Masse des Atoms in einem kleinen positiv geladenen *Atomkern* [13] konzentriert. Um diesen Kern ist die (gleich grosse) negative Ladung in Form von Elektronen gleichmässig verteilt.

Abbildung 33 zeigt eine übliche Darstellung dieses Atommodells. Dazu sind einige Bemerkungen angebracht.

1. Das Bild ist überhaupt nicht maßstäblich. In einer maßstäblichen Darstellung eines Wasserstoffatoms, in der der Atomkern einen Durchmesser von 2.5 cm hätte, würde das Atom einen Durchmesser von 945 m aufweisen.

[12] „Es war fast so unglaublich, wie wenn du eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier geschossen hättest und die Granate wäre zurückgekommen und hätte dich getroffen.“

[13] Der Begriff „Atomkern“ wurde erst 1912 zum erstenmal verwendet.

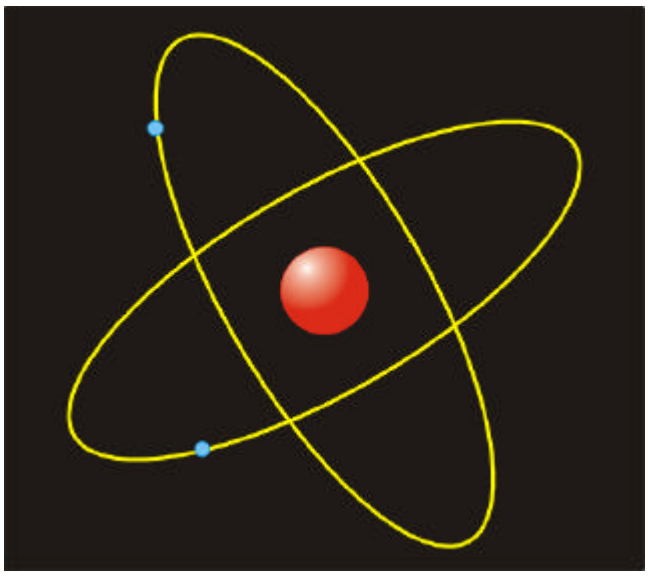

Abbildung 33: Rutherfordsches Atommodell

2. Der Kern und die Elektronen sind keine Kugeln mit scharf definierter Oberfläche. Es sind Objekte, die sich eben nicht verhalten wie kleine Kugellagerkugeln.[14]

3. Selbstverständlich sind der Kern und die Elektronen auch nicht farbig. Die Farben wurden entsprechend den Konventionen der Elektrotechnik gewählt (positiver Pol rot und negativer Pol blau).

4. Sowohl der Kern als auch die Elektronen wären im normalen Sinn gar nicht sichtbar. Es gibt zwar eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon des sichtbaren Lichts an einem Elektron gestreut wird, aber diese aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkte Lichtwelle liefert kein „Bild“ des Elektrons.

Die Frage nach der „Struktur“ der „Atomhülle“, d.h. die Frage nach der Verteilung der Elektronen um den Kern liess Rutherford offen. Ebenso blieb das Problem der Stabilität der Elektronenbahnen ungelöst.

5.4 Erstes Modell des Atomkerns

Aus der Rutherfordschen Streuformel liess sich die elektrische Ladung des Atomkerns bestimmen, an dem die Alphateilchen gestreut wurden. Wird diese Ladung als Vielfaches der Elementarladung ausgedrückt, so ergibt sich die *Kernladungszahl* Z. Es zeigte sich bald, dass diese Kernladungszahl identisch ist mit der Ordnungszahl des betreffenden chemischen Elements im periodischen System der chemischen Elemente. Die *Massenzahl* A ist bei den leichteren Elementen (mit Ausnahme des Wasserstoffs) jedoch etwa doppelt so gross wie die Kernladungszahl. Die Massenzahl ist gleich der gerundeten relativen Atommasse.

J.J. Thomson zeigte 1910 durch Ablenkung von Ionenstrahlen in einem elektrischen und magnetischen Feld, dass viele stabile Elemente aus verschiedenen Atomsorten gleicher Kernladungszahl,

[14] Siehe z.B. Skript des Vortrags „Wellen oder Teilchen?“

aber unterschiedlicher Masse bestehen, womit die von W. Crookes bereits 1886 geäusserte Vermutung bestätigt wurde. Frederick Soddy (1877–1956) gab 1913 diesen Atomsorten den Namen *Isotope*. Die übliche Schreibweise für ein Isotop des chemischen Elementes X mit der Kernladungszahl Z und der Massenzahl A ist:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \ . $$

Da die Zuordnung zwischen chemischem Element X und seiner Ordnungszahl Z eindeutig ist, wird diese auch oft weggelassen: ${}^{A}\mathrm{X}$.

Beispiele

Das Atom des Kohlenstoffisotops ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ hat eine Masse, die gleich 12mal der Masse des Atoms des Wasserstoffisotops ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ ist. Die Kernladung ist gleich 6 Elementarladungen, und Kohlenstoff ist das sechste Element im periodischen System. Kohlenstoff (${}^{12}_{6}\mathrm{C}$) hat daher die Kernladungszahl $Z = 6$ und die Massenzahl $A = 12$.

Das Atom des Sauerstoffisotops ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ hat eine Masse, die gleich 16mal der Masse des Atoms des Wasserstoffisotops ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ ist. Die Kernladung ist gleich 8 Elementarladungen, und Sauerstoff ist das achte Element im periodischen System. Sauerstoff (${}^{16}_{8}\mathrm{O}$) hat daher die Kernladungszahl $Z = 8$ und die Massenzahl $A = 16$.

Wasserstoffisotope: ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ normaler Wasserstoff; ${}^{2}_{1}\mathrm{H} = \mathrm{D}$ schwerer Wasserstoff, Deuterium; ${}^{3}_{1}\mathrm{H} = \mathrm{T}$ Tritium

Der Kern des Wasserstoffatoms wurde anfänglich als „H-Teilchen“ bezeichnet. Rutherford prägte dafür den Ausdruck *Proton*, ein Name, der ab etwa 1920 allgemein verwendet wurde.

Da die Massen der Atome der Isotope zwar nahezu ganzzahlige Vielfache der Masse des Wasserstoffatoms sind, aber diese Vielfache stets grösser sind als die Ordnungszahlen, wurde zuerst angenommen, dass die Atomkerne aus Protonen und Elektronen aufgebaut seien. Die Elektronen würden die überschüssige Ladung der Protonen kompensieren. Ein Atomkern der Massenzahl A und der Kernladung Z würde nach dieser Vorstellung aus A Protonen und $A - Z$ Elektronen bestehen.

Für dieses Modell sprach die Tatsache, dass von gewissen radioaktiven Kernen Elektronen emittiert werden. Jedoch traten bald verschiedene Schwierigkeiten auf.

Aus dem Spektrum des Stickstoffmoleküls folgt, dass der Stickstoffkern ganzzahligen Spin haben muss, während er halbzahligen Spin haben müsste, wenn er aus 14 Protonen und 7 Elektronen aufgebaut wäre[15]. Zudem sind die gemessenen magnetischen Momente der Kerne um etwa drei Zehnerpotenzen kleiner als das magnetische Moment eines Elektrons. Es blieb unverständlich, wie sich die magnetischen Momente der Elektronen zu den viel kleineren Kernmomenten zusammensetzen konnten.

Eine weitere Schwierigkeit ergab sich aus der Heisenbergschen Unschärferelation und aus der Schrödingergleichung[16]. Je kleiner das Volumen ist, in das ein Teilchen eingesperrt wird, desto grösser wird seine Energie. Wenn ein Elektron sich innerhalb eines Stickstoff-Atomkerns befinden würde, hätte es eine Energie von rund 25 MeV. Ein Elektron mit dieser Energie könnte im Kern gar nicht in einem gebundenen Zustand sein. Zudem ist diese Energie viel grösser, als die Elektronenenergien, die bei radioaktiven Zerfällen beobachtet werden. Zum Beispiel haben die Elektronen, die beim Zerfall von ${}^{14}\mathrm{C}$ emittiert werden, eine Maximalenergie von 0,158 MeV.

Das Problem wurde erst 1932 mit der Entdeckung des *Neutrons* gelöst.

[15] Die Protonen haben ebenso wie die Elektronen einen Spin $\frac{1}{2}\,\hbar$.
[16] Siehe z.B. Skript des Vortrags „Wellen oder Teilchen?“

5.5 Entdeckung des Neutrons

Beim Beschuss von Beryllium mit Alphastrahlen entstand eine sehr durchdringende Strahlung, die die Eigenschaft hatte, in wasserstoffhaltigen Substanzen Protonen-Strahlen von relativ hoher Energie zu erzeugen. Diese „Beryllium-Strahlung“ trug keine elektrische Ladung, denn sie erzeugte in einer Nebelkammer keine Spuren. Aus der Vermutung, die Beryllium-Strahlung könnte eine energiereiche Gammastrahlung sein, ergab sich eine unwahrscheinlich hohe Energie der Gammaquanten von etwa 55 MeV. Ausserdem wurden nicht nur Protonen, sondern auch schwere Rückstosskerne, wie Stickstoff oder Argon, beobachtet, was Gamma-Energien von 90 und 155 MeV erfordert hätte.

Sir James Chadwick (1891–1974) interpretierte daher die durchdringende Strahlung als eine Korpuskularstrahlung von Teilchen der Ladung null und der Masse eines Protons. Damit war das bereits 1920 von William Draper Harkins (1873–1951) und Rutherford vermutete neutrale Teilchen gefunden. Harkins und Rutherford hatten angenommen, dass in einem Atomkern ein Proton und ein Elektron sich zu einem neutralen Teilchen verbinden könnten. Diesem hypothetischen Teilchen gaben sie den Namen „Neutron“.

Abbildung 34: J. Chadwick

Mit dem Neutron liessen sich alle Beobachtungen zwanglos erklären. Werner Karl Heisenberg (1901–1976) und Dmitrij Dmitrijewitsch Iwanenko (1904–1994) zeigten noch im Jahr 1932, dass sich Spin und magnetisches Moment der Atomkerne problemlos mit der Annahme erklären lassen, dass der Atomkern aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist (s. Abbildung 35). Protonen und Neutronen werden deshalb als *Nukleonen* [17] bezeichnet.

Der Atomkern eines Nuklids ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ mit der Ordnungszahl Z und der Massenzahl A besteht also aus insgesamt A Nukleonen, nämlich Z Protonen und $A - Z$ Neutronen.

Zwischen 1932 und 1934 existierte aber weiterhin die Vorstellung, dass im Kern Elektronen enthalten seien. Obwohl zwar bereits die Idee geäussert wurde, das Neutron sei ein Elementarteilchen, wurde es in dieser Zeit noch meistens als gebundener Zustand eines Protons und eines Elektrons aufgefasst, denn nur so konnte man die Emission von Elektronen bei radioaktiven Zerfällen leicht verstehen. Die Vorstellung, dass ein Atomkern aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist, setzte sich erst endgültig durch, nachdem 1933 Fermi seine Theorie des Betazerfalls entwickelt hatte. Diese Theorie zeigte, dass das Elektron (und das Antineutrino) erst beim Zerfall entsteht, so wie das Photon erst beim Übergang eines Atoms in einen energetisch tieferen Zustand entsteht.

[17] Das lateinische Wort „nucleus“ bedeutet „Kern“.

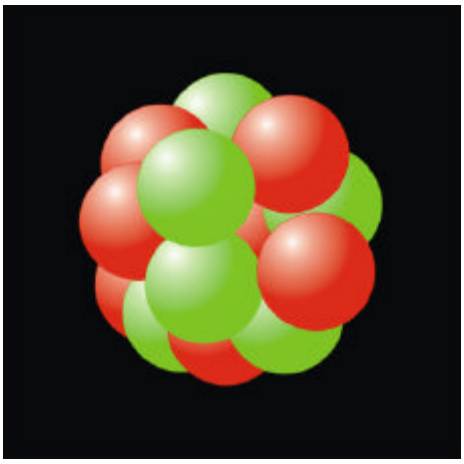

Abbildung 35: Atomkern. Die Protonen sind rot und die Neutronen sind grün dargestellt.

Die zuerst beobachteten Neutronen entstanden bei der Bestrahlung von Beryllium mit Alphastahlen durch die Reaktion

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}\,.$$

Ferner wurden sie auch bei der Bestrahlung von Bor gefunden:

$$^{11}_{5}\mathrm{B} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}\,.$$

Chadwick und Maurice Goldhaber (*1911) bestimmten 1934 die Masse des Neutrons indirekt aus der Masse des Protons und der des Deuterons[18] und aus der Bindungsenergie des Deuterons, die sich zum Beispiel durch Photospaltung bestimmen lässt.

Da das Neutron eine grössere Masse als das Proton aufweist, kann ein freies Neutron durch Betazerfall in ein Proton und ein Elektron (und ein Antineutrino) zerfallen. Die Halbwertszeit dieses Zerfalls beträgt 616 Sekunden.

5.6 Kernkräfte

Mit der Vorstellung, dass ein Atomkern aus Protonen und Neutronen besteht, ergab sich jedoch ein neues Problem. Da sich gleichnamige elektrische Ladungen gegenseitig abstossen, wirken auf die Protonen in einem Atomkern starke abstossende Kräfte. Warum ist ein Atomkern überhaupt stabil, und warum fliegen die Protonen nicht sofort nach allen Seiten weg?

Offenbar müssen zwischen den Nukleonen ausser den elektrischen Kräften noch andere Kräfte wirken. Die Erforschung dieser *Kernkräfte* war lange Zeit eines der Hauptziele der Kernphysik. Es stellte sich heraus, dass zwischen zwei Nukleonen eine anziehende Kraft wirkt, die sehr stark ist, aber im Gegensatz zur elektrischen Kraft eine nur sehr kurze Reichweite hat. Die Kraft zwischen zwei Nukleonen ist unabhängig davon, ob es zwei Protonen, zwei Neutronen oder ein Proton und ein Neutron sind (Abbildung 36).

[18] Das Deuteron ist der Kern des schweren Wasserstoffisotops $^{2}_{1}\mathrm{H}$.

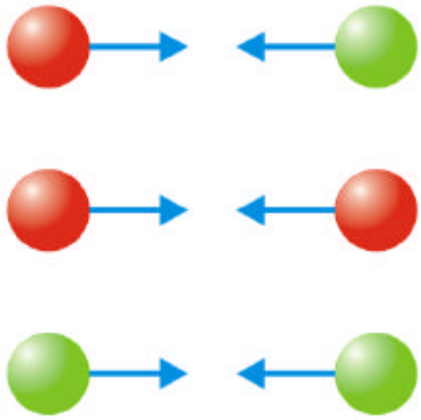

Abbildung 36: Kernkräfte

5.7 Bindungsenergie

Da zwischen den Nukleonen eine starke anziehende Kraft wirkt, muss Energie aufgewendet werden, wenn ein Nukleon aus einem Atomkern entfernt werden soll. Die *Bindungsenergie* eines Atomkerns ist die Energie, die aufgewendet werden müsste, um den Kern in einzelne Nukleonen zu zerlegen. Durch Division der Bindungsenergie B mit der Massenzahl A ergibt sich die *Bindungsenergie pro Nukleon*:

$$B_N = \frac{B}{A}\,. \tag{2}$$

In Abbildung 37 ist die Bindungsenergie pro Nukleon der häufigsten Nuklide dargestellt.

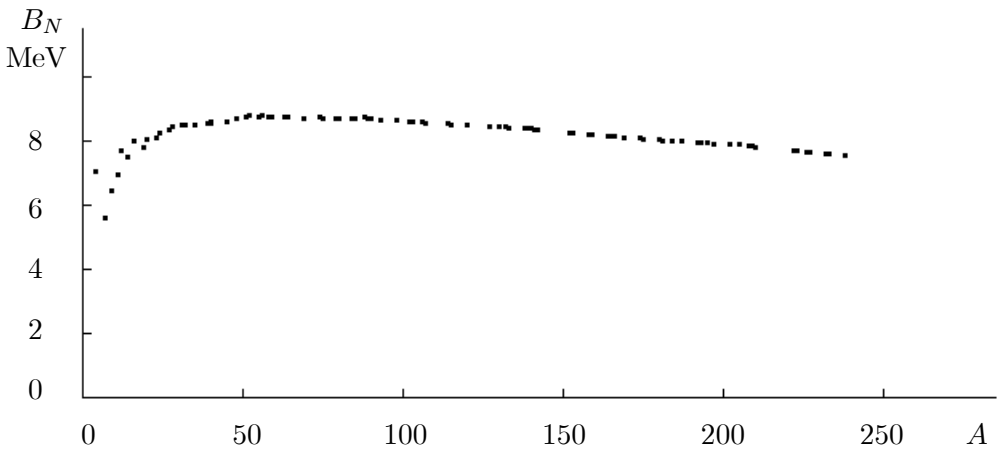

Abbildung 37: Bindungsenergie pro Nukleon

In Kernen der Massenzahl $A \approx 60$ sind die Nukleonen am stärksten gebunden. Sehr leichte und sehr schwere Kerne sind schwächer gebunden. Aus diesem Grund kann einerseits durch *Fusion* (Verschmelzung leichter Kerne) und andererseits durch *Fission* (Spaltung schwerer Kerne) Energie freigesetzt werden.

5.8 Tröpfchenmodell

Die Eigenschaften der Atomkerne können durch verschiedene Kernmodelle beschrieben werden. Die einzelnen Modelle ergänzen sich, da jedes Modell nur bestimmte Eigenschaften erklären kann. Ein besonders einfaches, aber trotzdem erfolgreiches Modell ist das *Tröpfchenmodell*.

Die Kernkräfte wirken ebenso wie die Molekularkräfte nur auf kurze Distanzen und nur zwischen wenigen Teilchen. Daher verhält sich ein Kern in vieler Hinsicht analog zu einem Flüssigkeitstropfen, der durch die Oberflächenspannung zusamengehalten wird. Auf Grund dieser Vorstellung leitete 1935 Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) eine *semiempirische Massenformel* [19] ab.

Es ist evident, dass das Tröpfchenmodell für Kerne mit sehr kleinen Nukleonenzahlen nicht geeignet ist. Für stabile Kerne mit Massenzahlen $A > 10$ sind jedoch die Abweichungen der mit der Massenformel berechneten Massen von den experimentell bestimmten Massen kleiner als 0.35 Promille.

5.9 Teilchenbeschleuniger und Teilchenphysik

Im Jahr 1932, unmittelbar nachdem Chadwick das Neutron entdeckt hatte (s. Abschnitt 5.5), schien die Welt besonders einfach und übersichtlich. Die Atome bestanden aus Elektronen und dem Atomkern, der seinerseits aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt war. Ausser diesen drei Bausteinen, Elektronen, Protonen und Neutronen, existierten noch die Photonen, die Lichtquanten.

Mit diesen vier Teilchen schienen alle Erscheinungen erklärt werden zu können. Allerdings wurde dieses schöne einfache Bild bereits dadurch etwas getrübt, dass Carl David Anderson (1905–1991) etwa zur gleichen Zeit die Positronen entdeckte und dass Pauli schon 1930 die Existenz der Neutrinos postuliert hatte (s. Abschnitt 4.2). Es sollte bald noch viel schlimmer kommen.

Hideki Yukawa (1907–1981) entwickelte 1934 eine Theorie der Kernkräfte, auf Grund derer er die Existenz eines mittelschweren Teilchens annahm, das *Meson* genannt wurde. Zwei Jahre später entdeckten Neddermeyer und Anderson in der kosmischen Strahlung ein Teilchen, dessen Masse 1939 bestimmt werden konnte. Es ergab sich ein Wert von etwa dem 200-fachen der Elektronenmasse, und damit schien zunächst dieses Teilchen das von Yukawa postulierte Meson zu sein. Es zeigte sich jedoch bald, dass das neu entdeckte Teilchen nicht die von der Theorie erwarteten Eigenschaften hatte. Erst 1947 wurde in der kosmischen Strahlung ein weiteres Teilchen gefunden, das die richtigen Eigenschaften hatte. Dieses Teilchen wurde π-*Meson* genannt und das von Neddermeyer und Anderson entdeckte Teilchen μ-*Meson*. Heute werden diese Teilchen *Pion* und *Myon* genannt.

In den Jahren 1931 und 1932 wurden die ersten Teilchenbeschleuniger gebaut, und in den folgenden Jahren machte die Technik dieser Maschinen rasche Fortschritte. Um 1948 erreichten die Maschinen Energien, die ausreichten, um neue Teilchen, wie die Pionen, die vorher nur in der kosmischen Strahlung gefunden worden waren, künstlich herzustellen. In den fünfziger Jahren kam es zu einer wahren „Teilchen-Inflation“, und es wurden schliesslich über 200 „Elementarteilchen“ gezählt.

Es lassen sich drei Arten von Teilchen unterscheiden. Teilchen, die nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen, werden *Leptonen* genannt, stark wechselwirkende Teilchen dagegen werden als

[19] Die Massenformel wird „semiempirisch“, d.h. halbempirisch genannt, weil die Gestalt der Formel theoretisch begründet wird, aber die Grössen der Konstanten empirisch bestimmt werden müssen.

Hadronen bezeichnet. Diese lassen sich in zwei weitere Klassen unterteilen. Teilchen mit halbzahligem Spin heissen *Baryonen*, und Teilchen mit ganzzahligem Spin sind *Mesonen*.

Es wurde aber bald klar, dass nicht alle diese Teilchen wirklich „elementar“ sind. Viele der neu entdeckten Teilchen waren offenbar nur angeregte Zustände von anderen Teilchen, und es war so wenig sinnvoll, diese als unabhängige neue Teilchen zu betrachten, wie die angeregten Zustände des Wasserstoffatoms als verschiedene Atome anzusehen. Solche angeregten Zustände wurden daher in Analogie zur Atom- und Kernphysik, wo sich angeregte Zustände zum Beispiel durch Maxima in der Anregungsfunktion (Wirkungsquerschnitt der inelastischen Streuung als Funktion der Energie) manifestieren, als „Resonanzen“ bezeichnet.

Nur die Grundzustände konnten als individuelle Teilchen aufgefasst werden. Diese liessen sich auf Grund ihrer Eigenschaften, wie Masse, Spin und gewissen Quantenzahlen in ein Ordnungsschema einreihen, wobei zunächst die Ursachen für die Gültigkeit dieses Schemas nicht klar waren.

Das Ordnungsschema für die Teilchenphysik wurde 1961 von Murray Gell-Mann (*1929) und Yuval Ne'eman (*1925) entdeckt.

Die Situation war ganz analog zu derjenigen bei der Entdeckung des Periodensystems der chemischen Elemente. Die Chemiker Dmitri Ivanovich Mendelejew (1834–1907) und Julius Lothar Meyer (1830–1895) entdeckten 1869 unabhängig voneinander, dass die chemischen Elemente sich in ein periodisches Schema einordnen lassen. Der Grund dafür wurde aber erst nach 1925, nach der Aufstellung der Bohrschen Postulate und der Entdeckung des Pauli-Prinzips, verstanden.

Die Analogie reicht sogar noch weiter. Im Periodensystem von Mendelejew und Meyer waren einige leere Stellen, es fehlten einzelne Elemente. Auf Grund der chemischen Eigenschaften der benachbarten Elemente konnten die Eigenschaften der fehlenden Elemente vorausgesagt werden, und daraufhin wurden diese Elemente gefunden. Genau so gab es im Ordnungsschema der Teilchen eine Lücke. Mit Hilfe des Schemas konnten die Eigenschaften des fehlenden Teilchens vorausgesagt werden, und bei der anschliessenden gezielten Suche wurde das Teilchen, das $^-$, gegen Ende des Jahres 1963 gefunden.

Während das Periodensystem der chemischen Elemente über fünfzig Jahre auf seine Erklärung warten musste, kam es bereits 1964 zu einem tieferen Verständnis des Teilchenschemas, als Gell-Mann und George Zweig (*1937) unabhängig voneinander postulierten, dass die Protonen und Neutronen (allgemeiner: die Hadronen) aus noch elementareren Teilchen aufgebaut seien. Diese Teilchen wurden von Gell-Mann *Quarks* genannt.

Die Geschichte der Technik der Teilchenbeschleuniger und die Entwicklung der Teilchenphysik sind zwei eigene, umfangreiche und interessante Themen für sich, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird.

6 Kernspaltung und Kettenreaktion

6.1 Neue Isotope

Becquerel entdeckte die natürliche Radioaktivität. Die künstliche Radioaktivität wurde 1934 vom Ehepaar Jean Frédéric (1900–1958) und Irène [20] (1897–1956) Joliot-Curie entdeckt. Durch die Bestrahlung von Aluminium mit Alphateilchen hatten sie das radioaktive Phosphorisotop ^{30}P erzeugt.

Das Ehepaar Joliot-Curie war in einem gewissen Sinn vom Pech verfolgt. 1931 hätten sie beinahe das Neutron entdeckt, 1931 übersahen sie das Positron und 1937 entging ihnen die Kernspaltung. Sie erhielten jedoch für ihre Entdeckung der künstlichen Radioaktivität 1935 den Nobelpreis für Chemie.

Als Fermi von der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität erfuhr, erkannte er sofort, dass Neutronen viel besser als Alphateilchen geeignet sind, um künstliche Kernumwandlungen auszulösen. Weil sie elektrisch neutral sind, werden sie – im Gegensatz zu den positiv geladenen Alphateilchen – vom positiv geladenen Atomkern nicht abgestossen. Neutronen können daher auch mit verschwindend kleiner Energie in Atomkerne eindringen und so Kernreaktionen auslösen, während geladene Teilchen eine umso grössere Energie brauchen, um die elektrische Abstossung des Zielkerns zu überwinden, je grösser dessen Ordnungszahl ist.

Abbildung 38: E. Fermi

Fermi begann systematisch nach neuen radioaktiven Isotopen zu suchen, indem er der Reihe nach alle chemischen Elemente mit Neutronen bestrahlte. Dabei entdeckte er im Herbst 1934, dass Neutronen, die durch eine Paraffinschicht abgebremst worden waren, viel stärker aktivierend wirkten, als die schnellen Neutronen, die von der Neutronenquelle emittiert wurden. Neutronen, die durch Zusammenstösse mit Atomen der umgebenden Materie abgebremst werden, bis ihre mittlere Energie der mittleren Energie der Wärmebewegung der Atome der Umgebung entspricht, werden *thermische Neutronen* genannt.

In den nächsten drei Jahren intensiver Arbeit fanden Fermi und seine Mitarbeiter rund vierzig neue radioaktive Substanzen, was einerseits zum besseren Verständnis der Kerneigenschaften beitrug und andererseits praktisch für alle chemischen Elemente radioaktive Tracer lieferte. Dabei bestrahlten sie auch Uran mit Neutronen und schlossen aus ihren Untersuchungen, dass sie *Trans-*

[20] Tochter von Marie Curie

urane (Elemente mit Ordnungszahlen grösser als 92) gefunden hätten. Zwar entstanden tatsächlich Transurane, aber nicht alle Reaktionsprodukte waren Transurane.

Abbildung 39: I. Noddack

Die Chemikerin Ida Noddack (1896–1979) wies bereits 1934 darauf hin, dass die Versuchsresultate auch so interpretiert werden könnten, „dass bei der Beschiessung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere grössere Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der bestrahlten Elemente sind“. Da dies jedoch drei Jahrzehnten Erfahrung mit radioaktiven Prozessen widersprach, blieb leider Noddacks Einwand unbeachtet.

Auch Irène Joliot-Curie in Paris hatte bei ihren Experimenten seltsame Resultate erhalten, die sich nicht so richtig einordnen liessen. In Berlin untersuchten darauf Otto Hahn (1879–1968), Lise Meitner (1878–1968) und Fritz Strassmann (1902–1980) systematisch mit chemischen Methoden die Produkte, die beim Neutronenbeschuss von Uran entstanden. Die österreichische Physikerin Meitner war jüdischer Abstammung und musste deshalb nach dem Anschluss Österreichs an das Dritte Reich im Juli 1938 nach Stockholm fliehen.

Abbildung 40: Hahn, Meitner und Strassmann

6.2 Entdeckung der Kernspaltung

Im Herbst 1938 erhielten Hahn und Strassmann Resultate, die sie erst nicht verstehen und dann kaum glauben konnten. Am 17. Dezember schrieb Hahn einen Brief an Meitner und teilte ihr die merkwürdigen Ergebnisse mit. Hahn hatte erst gehofft, von Meitner sofort eine befriedigende physikalische Erklärung zu erhalten und hätte sie damit zur Mitautorin seiner Publikation machen können. Da er aber befürchten musste, dass andere Physiker, die an den gleichen Problemen arbeiteten, ihm zuvorkommen könnten, hielt er die Veröffentlichung nicht mehr länger zurück, sondern reichte sie am 22. Dezember ein. Sie war äusserst vorsichtig formuliert:

> Als Chemiker müssten wir aus den kurz dargelegten Versuchen das oben gebrachte Schema eigentlich umbenennen und statt Ra[dium], Ac[tinium] Th[orium] die Symbole Ba[rium], La[nthan] Ce[rium] einsetzen. Als der Physik in gewisser Weise nahestehende Kernchemiker können wir uns zu diesem, allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden Sprung noch nicht entschliessen. Es können doch noch eine Reihe seltsamer Zufälle unsere Ergebnisse vorgetäuscht haben.

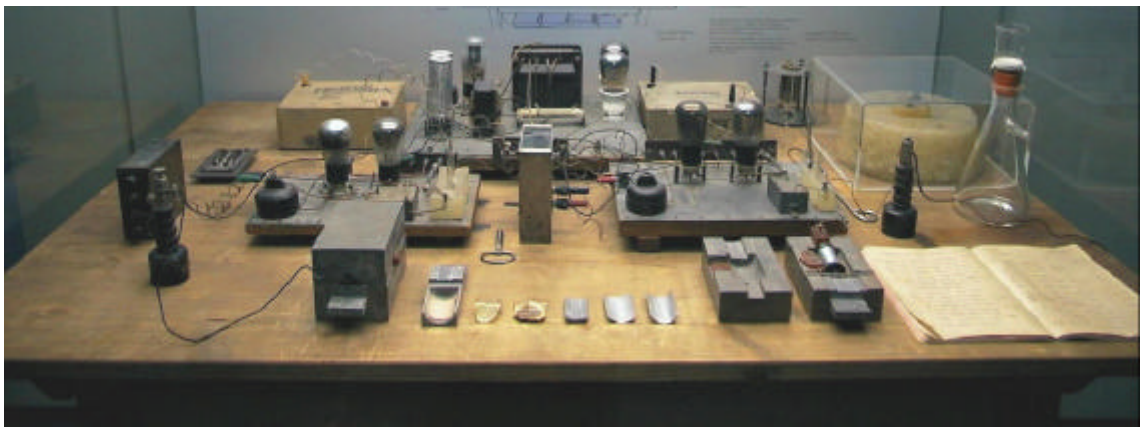

Abbildung 41: Arbeitstisch von O. Hahn

In den Weihnachtsferien besuchte Otto Frisch (1904–1979) seine Tante, Lise Meitner, die sich bei Freunden in Kungälv (rund 15 km nördlich von Göteborg) aufhielt. Sie hatte eben den Brief von Hahn erhalten, in dem er ihr von seinen unglaublichen Ergebnissen berichtete. Meitner und Frisch diskutierten darüber während eines Spaziergangs am 23. Dezember durch den verschneiten Wald (Frisch fuhr auf seinen Langlaufski, und Meitner bewies ihm, dass sie zu Fuss ebenso schnell vorwärts kam).

Frisch konnte sich nicht vorstellen, wie bei Hahns Experimenten Barium entstehen konnte, und meinte, es müsse ein Fehler vorliegen. Meitner dagegen war überzeugt, dass Hahn ein viel zu guter Chemiker war, als dass er sich bei seiner Feststellung, er habe bei seinen Versuchen Barium gefunden, getäuscht haben könnte.

Meitner und Frisch versuchten zu verstehen, was beim Beschiessen des Urankerns mit Neutronen geschehen sein könnte. Es war unmöglich, dass auf einen Schlag 100 Nukleonen miteinander herausgeschossen wurden, und der Kern konnte auch nicht einfach in der Mitte entzwei gebrochen worden sein.

Abbildung 42: O. Frisch

Da erinnerten sich Meitner und Frisch an das Tröpfchenmodell des Kerns. Die durch das Neutron zugeführte Energie könnte den Kern in Schwingungen versetzen und der „Flüssigkeitstropfen“ könnte sich dabei in der Mitte so einschnüren, dass die Abstossungskräfte der Protonen die „Oberflächenspannung“ überwinden würden und die beiden Fragmente mit grosser Geschwindigkeit auseinanderfliegen würden.

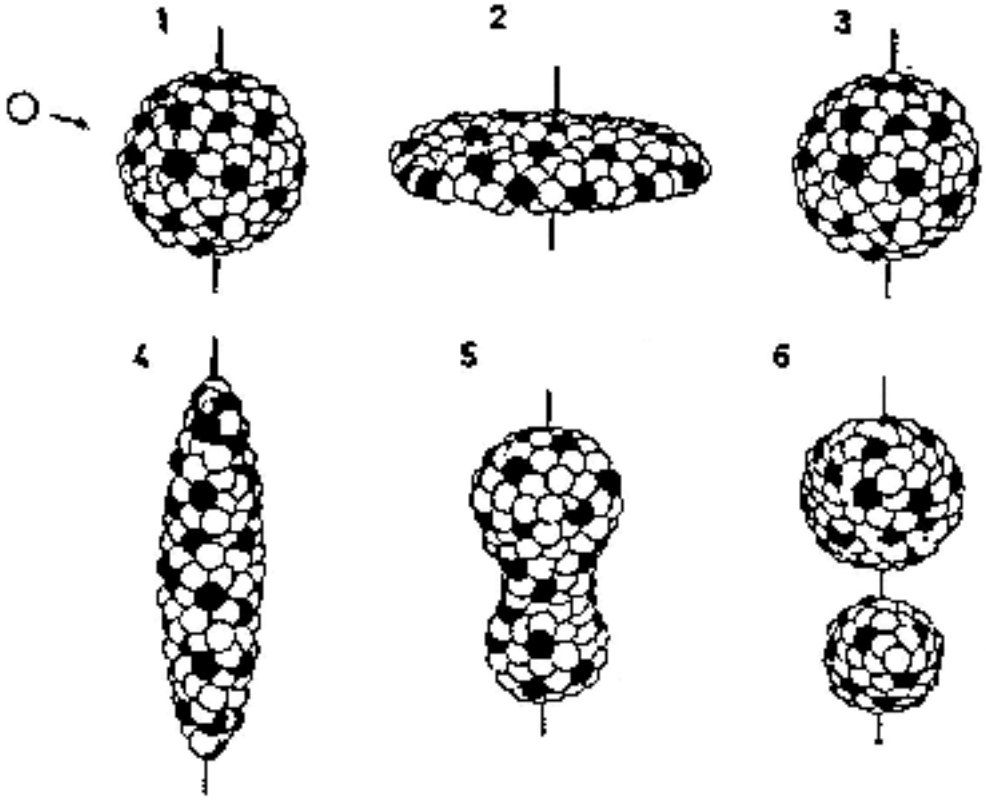

Abbildung 43: Kernspaltung

Die beiden setzten sich auf einen Baumstamm und begannen zu rechnen. Sie berechneten die Energie, mit der die beiden Bruchstücke wegfliegen würden, und kamen auf 200 MeV. Woher kam jedoch diese riesige Energie? Meitner erinnerte sich an die Massenformel von Weizsäcker und so konnten Meitner und Frisch die Massen des Urankerns und die Massen der beiden entstehenden Kerne berechnen. Mit der Beziehung $E = mc^2$ konnte aus der Massendifferenz die freiwerdende Energie berechnet werden. Die Rechnung ergab 200 MeV – es stimmte wunderbar.

Nach Kopenhagen zurückgekehrt, informierte Frisch am 3. Januar 1939 Bohr über die neue Erkenntnis. Bohr reagierte begeistert: „Ach, was für Idioten wir doch alle waren! Ach, das ist ja wunderbar! Genau so muss es sein!“

Am 6. Januer erschien die erwähnte vorsichtige Mitteilung von Hahn und Strassmann in der Zeitschrift „Naturwissenschaften“, und am 13. Januar gelang es Frisch, die Spaltung experimentell direkt nachzuweisen und die Energie der Spaltbruchstücke zu messen. Das Resultat stimmte mit den theoretischen Berechnungen überein. Am 17. Januar sandte Frisch zwei Artikel an die Zeitschrift *Nature*, einen mit der Erklärung der Spaltung durch Meitner und Frisch und einen mit einem Bericht über seine Experimente. Am 26. Januar gab Bohr in einer Physiker-Konferenz an der George Washington University in Washington die Entdeckung der Kernspaltung bekannt.

Die Nachricht, dass eine Kernspaltung möglich sei, verbreitete sich schnell und weckte bei den Kernphysikern grosses Interesse.

6.3 Kettenreaktion

Überall bauten die Kernphysiker Versuchsanordnungen auf, um sich selber von der Existenz der Kernspaltung zu überzeugen und diese genauer zu untersuchen. Als Louis Alvarez (1911–1988) Julius Robert Oppenheimer (1904–1967) am 29. Januar von der Kernspaltung erzählte, wollte dieser erst nicht glauben, dass so etwas möglich sei. Als Alvarez ihm etwas später jedoch das Experiment vorführte, kam Oppenheimer innert wenigen Minuten zur Einsicht, dass erstens der Effekt real war, dass zweitens bei der Reaktion etliche Neutronen frei werden konnten, dass drittens dadurch eine Kettenreaktion möglich sei und dass man deshalb viertens mit Uran Kraftwerke betreiben und Bomben bauen könne.

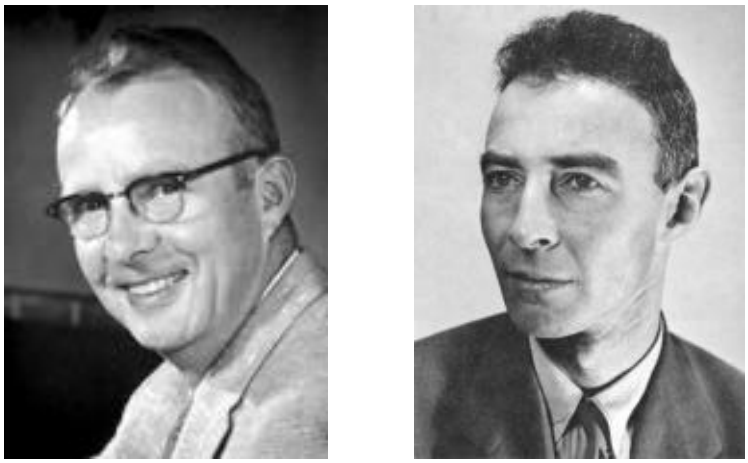

Abbildung 44: L. Alvarez und J.R. Oppenheimer

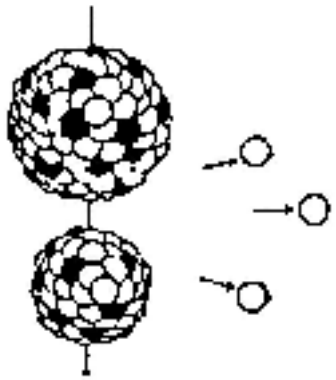

Abbildung 45: Spaltneutronen

Wenn durch ein Neutron ein Urankern gespalten wird und dabei zugleich mehrere Neutronen freigesetzt werden, können diese weitere Urankerne spalten, wobei wieder Neutronen frei werden, die ihrerseits Uranspaltungen verursachen, und so fort. Ein solcher Prozess wird *Kettenreaktion* genannt.

Wenn der Prozess in einer grösseren Menge Uran sehr schnell abläuft, ergibt sich eine „Atomexplosion“. Wird die Reaktion dagegen so kontrolliert, dass die Zahl der Neutronen, die Spaltungen verursachen, konstant bleibt, kann die freiwerdende Energie in einem Kernreaktor ausgenützt werden.

Ende Februar und Anfangs März 1939 gelang es verschiedenen Forschergruppen, die *Spaltneutronen* nachzuweisen und vielen Physikern wurde klar, dass die Möglichkeit der Nutzung der „Atomenergie“ – auch in Form von Bomben – nicht mehr nur Science Fiction war. Albert Einstein (1878–1955) hatte 1932 gemeint, es gebe nicht den geringsten Hinweis, dass Kernenergie je genutzt werden könne, und 1933 hatte Rutherford die Meinung geäussert, wer glaube, aus der Umwandlung von Atomen könne Energie gewonnen werden, rede Unsinn.

> „The energy produced by the breaking down of the atom is a very poor kind of thing. Anyone who expects a source of power from the transformation of these atoms is talking moonshine.“

6.4 Kritikalität

Bei der durch die Absorption eines Neutrons ausgelösten Spaltung eines Urankerns werden ein bis drei Neutronen frei, die ihrerseits wieder Spaltungen verursachen können. Andererseits kann ein Urankern auch ein Neutron absorbieren, ohne gespalten zu werden. Wenn zum Beispiel ein Uran-238-Kern ($^{238}_{92}$U) ein Neutron absorbiert, kann der so entstandene Uran-239-Kern entweder sich spalten, oder er kann sich durch Betazerfall in einen Neptunium-239-Kern umwandeln. Dieser wiederum zerfällt durch einen weiteren Betazerfall in Plutonium-239.

Ein Neutron kann ferner auch von einem Urankern einfach „elastisch“ abprallen, ohne irgendeine Reaktion zu verursachen. Wenn eine gegebene Anzahl Neutronen in einer bestimmten Anordnung Spaltungen von Urankernen verursacht, entstehen im Mittel zwischen zwei- und dreimal so viele Neutronen. Ein Teil dieser Neutronen wird von Urankernen absorbiert, ohne eine Spaltung zu bewirken, ein Teil wird vielleicht von anderen Kernen absorbiert, ein weiterer Teil kann aus der Anordnung entweichen und nur eine gewisse Anzahl der neuen Neutronen wird wieder Spaltungen

verursachen. Wenn diese Anzahl gleich der ursprünglichen Anzahl ist, wird die Anordnung *kritisch* genannt und der sogenannte Multiplikationsfaktor ist genau gleich eins. Die Kettenreaktion ist selbsterhaltend und die Anzahl Spaltungen pro Zeiteinheit ist konstant. Dementsprechend bleibt die erzeugte Energie pro Zeiteinheit, die Leistung, konstant. Das ist der Zustand, in dem sich ein Kernreaktor im normalen Betrieb befindet.

Wenn n_i die Zahl der Neutronen in der i-ten „Generation“ und n_{i+1} die Zahl der Neutronen in der „Generation“ $i+1$ bedeutet, ist der Multiplikationsfaktor definiert durch die Beziehung

$$k = \frac{n_{i+1}}{n_i}\,. \tag{3}$$

Wenn der Multiplikationsfaktor kleiner ist als eins, wird die Anordnung *unterkritisch* genannt. Die Zahl der Neutronen und damit auch die produzierte Leistung nimmt mit der Zeit (exponentiell) ab. In diesem Zustand befindet sich ein Reaktor, wenn er abgeschaltet wird.

Ist der Multiplikationsfaktor grösser als eins, so wird von einem *überkritischen* Zustand gesprochen. Ein Reaktor, der angefahren wird, muss leicht überkritisch gemacht werden. Der Multiplikationsfaktor ist dabei aber nur ganz wenig über eins. Häufig wird statt mit dem Multiplikationsfaktor k mit der *Reaktivität* ϱ gerechnet, die durch $\varrho = (k-1)/k$ definiert ist.

Die Neutronen, die die Oberfläche einer Anordnung von spaltfähigem Material verlassen, gehen verloren und können keine Spaltung mehr auslösen. Je kleiner die Anordnung ist, desto grösser ist der relative Anteil des Volumenbereichs, der sich so nahe an der Oberfläche befindet, dass die dort entstehenden Neutronen entweichen können. Daher muss die Anordnung eine gewisse Mindestgrösse haben, damit sie überhaupt überkritisch werden kann. Die Masse dieser Mindestgrösse wird als *kritische Masse* bezeichnet.

Natürliches Uran besteht zu 99,27 % aus Uran-238, 0,72 % Uran-235 und 0,0056 % Uran-234. Es stellte sich heraus, dass Uran-238 nur durch schnelle Neutronen gespalten werden kann, während Uran-235 sich sowohl durch schnelle als auch durch thermische Neutronen spalten lässt.

In natürlichem Uran werden die ursprünglich schnellen Neutronen durch elastische Zusammenstösse mit den Urankernen schnell so weit abgebremst, dass sie bei der Absorption durch die Uran-238-Kerne diese nicht mehr spalten können. Eine Kettenreaktion ist daher in natürlichem Uran nicht möglich.

Eine „Atombombe“ ist eine überkritische Anordnung mit einem möglichst grossen Multiplikationsfaktor. Es sollen möglichst viele Urankerne gespalten werden, bevor die freiwerdende Energie die Anordnung auseinanderreisst und diese dadurch unterkritisch wird, weil zu viele Neutronen entweichen können. Für eine Bombe muss daher das Uran hoch angereichert werden, d.h. der Prozentsatz des Urans-235 muss möglichst weit erhöht werden.

Bei einem Reaktor gibt es jedoch noch eine andere Möglichkeit, Kritikalität zu erreichen. Da es in diesem Fall nicht auf die Geschwindigkeit des Reaktionsablaufs ankommt, kann ein Reaktor statt mit schnellen auch mit thermischen Neutronen betrieben werden. Wenn dafür gesorgt wird, dass die Spaltneutronen durch elastische Zusammenstösse mit leichten Atomkernen sehr schnell auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst werden, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron von einem Uran-235-Kern eingefangen wird und diesen spaltet, grösser als die Wahrscheinlichkeit, dass es von einem Uran-238-Kern eingefangen wird und keine Spaltung bewirkt. Eine Substanz, die Neutronen gut abbremst, aber dabei nur wenig absorbiert, wird *Moderator* genannt. Als Moderator sind vor allem Graphit und schweres Wasser geeignet.

7 Atombomben

7.1 Einsteins Brief

Vielen Physikern, vor allem aber den aus Europa stammenden, die zum Teil vor dem Nationalsozialismus nach Amerika geflohen waren, machte der Gedanke, dass ihre deutschen Kollegen die neuen Erkenntnisse dazu verwenden könnten, Atombomben zu entwickeln, grosse Angst. Es war nicht auszudenken, was geschehen würde, wenn Hitler Atomwaffen zur Verfügung ständen.

Leo Szilard (1898–1964) hatte bereits 1933 eine Vision, dass es möglich sein könnte, Atomenergie in Form einer Kettenreaktion freizusetzen und dass dadurch Bomben von gewaltiger Zerstörungskraft gebaut werden könnten.

Szilard, ein Ungar jüdischer Abstammung, fuhr wenige Tage, bevor am 1. April 1933 in Berlin die Verfolgung der Juden begann, von Berlin nach Wien, praktisch mit dem letzten Zug, mit dem das noch möglich war. Anfangs Mai fuhr er nach England und 1937 reiste er nach Amerika.

Als Szilard 1939 erfuhr, dass in Uran eine Kettenreaktion ablaufen könnte, sah er seine Vision verwirklicht und war sehr besorgt. Wenn eine Kettenreaktion möglich war, dann könnte auch eine Bombe gebaut werden und sicher würden auch die deutschen Physiker diese Möglichkeit erkennen. Es musste unbedingt etwas unternommen werden.

Szilard wandte sich an seine ungarischen Kollegen, Edward Teller (1908– 2003) und Eugene Paul Wigner (1902–1995), die beide auch jüdischer Abstammung waren und wie Szilard aus Europa geflohen waren. Die drei Physiker überlegten, was zu tun war.

Erstens musste vermieden werden, dass die deutschen Physiker etwas von den Resultaten der Kernspaltungs-Forschung in England und Amerika erfuhren. Es gelang Szilard, seine englischen und amerikanischen Kollegen zu überzeugen, dass sie nichts mehr über ihre die Kernspaltung betreffenden Forschungen publizieren sollten.

Zweitens galt es zu verhindern, dass die Deutschen in den Besitz des Urans gelangten, das die Belgier im Kongo förderten. Die belgische Regierung musste davor gewarnt werden, Uran an Deutschland zu verkaufen.

Szilard fiel ein, dass Einstein Briefkontakt zur belgischen Königin hatte. Die Ungarn beschlossen, Einstein, der seine Sommerferien auf Long Island verbrachte, einen Besuch abzustatten. Da Szilard nicht autofahren konnte, bat er Wigner, ihn nach Long Island zu fahren.

Wigner war dafür bekannt, extrem höflich zu sein. Es wurde nur einmal beobachtet, wie er die Nerven verlor. Als ihn ein Garagist unflätig beschimpfte, rief er schliesslich „Gehen Sie zum Teufel!“ – und fügte schnell hinzu: „Bitte!“

Sie fuhren am 16. Juli 1939 zu Einstein und trugen ihm ihre Befürchtungen vor. Als Einstein von der Möglichkeit einer Kettenreaktion hörte, war er überrascht und sagte: „Daran habe ich gar nicht gedacht.“ Er wurde sich dann aber schnell über die Konsequenzen klar und war bereit, alles zu tun, was notwendig war. Er hatte jedoch Bedenken, sich direkt an die belgische Königin zu wenden, und Wigner äusserte erneut seine Meinung, dass man nicht an eine fremde Regierung herantreten dürfe, ohne dem Aussenministerium Gelegenheit zu einer Stellungnahme zu geben.

Die drei einigten sich darauf, einen Brief an den belgischen Botschafter und einen Begleitbrief an das amerikanische Aussenministerium mit der Bitte um Weiterleitung zu senden. Einstein diktierte den Text, und Wigner betätigte sich als Sekretär.

Szilard gelang es, einen Termin bei Alexander Sachs (1893–1973) zu erhalten. Sachs hatte Biologie, Philosophie, Jurisprudenz und Soziologie studiert, hatte 1932 als Redenschreiber für Präsident Franklin Roosevelt gearbeitet und war ein inoffizieller, aber einflussreicher Ratgeber des Präsidenten. Sachs erklärte Szilard, dass die Angelegenheit zuerst und vor allem das Weisse Haus betreffe und dass deshalb der Präsident informiert werden sollte.

Danach formulierte Szilard auf der Basis von Einsteins Text einen Brief an Roosevelt und sandte diesen zur Begutachtung an Einstein. Da Einstein den Brief lieber im persönlichen Gespräch diskutieren wollte, fuhr Szilard wieder zu ihm, diesmal mit Teller als Chauffeur, weil Wigner auf dem Weg nach Kalifornien war. Szilard und Einstein verfassten einen neuen Entwurf, den Teller niederschrieb.

Am 15. August übergab Szilard die endgültige Fassung des Briefes an Sachs. Sachs hatte sich vorgenommen, dem Präsidenten das Anliegen mündlich vorzutragen, da dieser so viel Geschriebenes zu sehen bekam, dass er einem Brief zu wenig Beachtung geschenkt hätte. Infolge der politischen Lage war aber der Terminkalender des Präsidenten so sehr gefüllt, dass Sachs erst am 11. Oktober 1939 eine Chance hatte, die Aufmerksamkeit des Präsidenten genügend lange zu erhalten. Er konnte dann den Präsidenten überzeugen, dass die Vereinigten Staaten den Nationalsozialisten mit der Entwicklung der Atombombe zuvorkommen müssten. Es wurde hierauf ein Komitee eingesetzt, das „Advisory Committee on Uranium“. Dieses tagte zum erstenmal am 21. Oktober 1939 unter dem Vorsitz von Lyman James Briggs (1874–1963) und erstattete am 1. November dem Präsidenten darüber Bericht, in dem es die Förderung der Erforschung der Uranisotopentrennung und der Kettenreaktionen empfahl. Der Präsident antwortete am 17. November, er habe den Bericht gelesen und zu den Akten genommen. Darauf geschah lange Zeit weiter nichts, ausser dass in vielen Forschungslabors die Experimente mit Uran weitergeführt wurden, jedoch nur in kleinem Stil.

Häufig wird Oppenheimer als „Vater der Atombombe“ betrachtet, weil er der Leiter der geheimen Forschungsanlage Los Alamos war, in dem die Atombombe entwickelt wurde. Gelegentlich wird aber auch Einstein als „Vater der Atombombe“ bezeichnet mit der Begründung, seine berühmte Formel $E = mc^2$ sei die Grundlage für die Atombombe und er hätte den Anstoss zu ihrer Entwicklung gegeben.

Beide Behauptungen sind unzutreffend.

Die Initiative, den Brief an Roosevelt zu schreiben, ging nicht von ihm, sondern von Szilard aus. Zudem bewirkte der Brief zunächst wenig, und die Entwicklung der Atombombe wäre ohne ihn kaum viel langsamer gestartet worden. Einstein wehrte sich später mit Recht gegen die Bezeichnung „Vater der Atombombe“, wobei er allerdings 1950 seine Rolle etwas allzu sehr herunterzuspielen versuchte, indem er behauptete, er hätte den Brief lediglich unterschrieben. In seinem Nachlass wurden aber Papiere gefunden, die beweisen, dass er an der Formulierung des Briefes mitgewirkt hatte.

In nahezu jedem populärwissenschaftlichen Text über Atombomben wird behauptet, die berühmte Formel $E = mc^2$ sei die Voraussetzung für die Entwicklung der Atombombe. Dabei wird der Eindruck vermittelt, ohne diese mythische Formel wäre die Atomenergie nicht entdeckt und damit die Atombombe nicht entwickelt worden. Das ist so nicht richtig. Die Beziehung ist nämlich allgemeingültig und gilt auch für chemische Reaktionen. Chemische Sprengstoffe wurden aber entwickelt, längst bevor diese Gleichung bekannt war. Genauso wären auch ohne die Kenntnis dieser Beziehung die Kernspaltung entdeckt und die Kernwaffen entwickelt worden. Wenn behauptet wird, die Formel $E = mc^2$ sei die Grundlage für Atombomben und Atomkraftwerke, dann müsste konsequenterweise auch gesagt werden, diese Formel sei die Grundlage für chemische Sprengstoffe, für Benzin- und Dieselmotoren, für Oelheizungen, Holzöfen und Kohlefeuer.

7.2 Uran-235

Die Wirkung von Einsteins Brief war eigentlich erstaunlich gering. Das Atomwaffenprogramm der USA kam nur langsam in Gang, da man anfänglich der Meinung war, eine schnelle Kettenreaktion in Uran sei gar nicht möglich.

Bereits im Januar 1939 war Bohr zum Schluss gekommen, dass Uran-235 auch durch langsame Neutronen gespalten werden konnte, während Uran-238 nur durch schnelle Neutronen gespalten wurde. In seinem Artikel, der am 7. Februar an die *Physical Review* gesandt wurde, stellte er zudem fest, dass die Zahl der durch schnelle Neutronen verursachten Spaltungen von Uran-235 wegen der Seltenheit dieses Isotops viel geringer sei als die Zahl der Spaltungen von Uran-238. Im September 1939 publizierte er zusammen mit John Archibald Wheeler (1911–2008) eine Theorie der Kernspaltung. Aus dieser ging hervor, dass Uran-238 nur durch schnelle Neutronen gespalten werden konnte, während Uran-235 sich auch durch langsame Neutronen spalten liess. Ferner ergab sich, dass das noch unbekannte Element mit der Ordnungszahl 94 und der Massenzahl 239 ebenfalls durch langsame Neutronen gespalten werden konnte.

Auf Grund dieser Überlegungen schien eine Kettenreaktion in Uran nicht möglich zu sein. Langsame Neutronen können Uran-238 nicht spalten, und für schnelle Neutronen ist die Wahrscheinlichkeit, dass durch sie Uran-238 gespalten wird, viel kleiner als die Wahrscheinlichkeit, dass sie entweder vom Uran-238 eingefangen werden, ohne eine Spaltung zu verursachen, oder nur elastisch gestreut werden. Durch die elastische Streuung werden die Neutronen aber schnell so stark abgebremst, dass ihre Energie nicht mehr ausreicht, um in Uran-238 eine Spaltung auszulösen. Langsame Neutronen können zwar das Uran-235 spalten und eine Energiegewinnung ist dadurch möglich, aber für eine Bombe ist der Vorgang zu langsam. Das Material würde durch die freigesetzte Energie auseinandergerissen, bevor ein genügend grosser Anteil des Urans gespalten worden wäre. Eine Atombombe schien daher nicht realisierbar zu sein.

Erst im Februar 1940 stellte sich Frisch die Frage, wie sich reines Uran-235 wohl verhalten würde. Ihm wurde klar, dass Uran-235 nicht nur durch langsame, sondern auch durch schnelle Neutronen gespalten werden kann. Daher könnte eine Kettenreaktion in Uran-235 mit schnellen Neutronen sehr schnell ablaufen. Dass Frisch als Erster diese Möglichkeit überhaupt in Betracht zog, war darauf zurückzuführen, dass er die Isotopentrennung sorgfältig studiert hatte und zum Schluss gekommen war, dass selbst für Isotope wie ^{235}U und ^{238}U eine Trennung realisierbar war. Bisher hatten die meisten Physiker eine Trennung der Uranisotope als viel zu schwierig oder gar als unmöglich eingeschätzt.

Frisch war jüdischer Abstammung und war deshalb im Sommer 1939 von Kopenhagen nach England geflohen und hatte an der Univeriät Birmingham bei Mark Oliphant (1901–2000) eine Hilfsdozentenstelle gefunden.

Frisch und Rudolf Ernst Peierls (1907–1995) berechneten die kritische Masse und erhielten einen Wert in der Grössenordnung von einem Kilogramm. Sie überzeugten sich mit einer einfachen Rechnung, dass die Kettenreaktion in einer solchen Masse sehr schnell ablaufen würde und eine grosse Zahl von Urankernen gespalten würde, bevor die Anordnung verdampfen könnte. Es gäbe also wirklich eine Explosion und nicht nur eine Verpuffung. Darauf ermittelten sie die Zerstörungskraft einer solchen Explosion und erhielten einen erschreckenden Wert. Schliesslich stellten sie fest, dass mit einer genügend grossen Isotopentrennanlage in einigen Wochen eine hinreichende Menge nahezu reines Uran-235 hergestellt werden könnte.

Frisch und Peierls starrten sich an. Also war es doch möglich, eine Atombombe zu bauen! Und wie weit waren die Deutschen in der Zwischenzeit damit gekommen? Frisch und Peierls verfassten daher ein Memorandum zuhanden der englischen Regierung, die hierauf ein Komitee aufstellte, das später (am 10. Juni) „MAUD-Komitee“ genannt wurde. Das Komitee beschloss in seiner ersten Sitzung am 10. April ein Forschungsprogramm zur schnellen Spaltung und zur Isotopentrennung aufzustellen.

Zur gleichen Zeit versuchte Alfred Otto Carl Nier (1911–1994) mit seinem Massenspektrometer Uran-235 aus dem natürlichen Uran abzutrennen. Nach vielen Fehlschlägen gelang ihm die

Trennung schliesslich am 28. Februar 1940. Er sandte die (winzige) Probe an John Ray Dunning (1907–1975), der sie mit Neutronen, die er mit seinem Zyklotron produzierte, bestrahlte. Dunnings Messungen bestätigten die Theorie von Bohr und Wheeler. Es war das Uran-235, das durch langsame Neutronen gespalten wurde.

7.3 Plutonium

Im Mai 1940 wies Louis A. Turner darauf hin, dass Uran-238 zwar durch langsame Neutronen nicht spaltbar sei, aber dass daraus ein Element entstehen könne, das durch langsame Neutronen gespalten würde. Durch Neutroneneinfang bilde sich aus $^{238}_{92}$U das Uranisotop $^{239}_{92}$U. Aus diesem könne durch zwei aufeinanderfolgende Betazerfälle ein Element $^{239}_{94}$X entstehen, und dieses müsste sogar noch leichter spaltbar sein als ^{235}U.

Unabhängig von ihm kamen zwei Forschergruppen zur gleichen Schlussfolgerung, nämlich Egon Bretscher (1901–1973) und Norman Feather (1904–1978) am Cavendish Laboratory der Univerity of Cambridge und Edwin Mattison McMillan (1907–1991) und Philip Abelson (1913–2004) am Berkeley Radiation Laboratory der University of California.

Ebenfalls im Mai 1940 entdeckten Abelson und McMillan das Element mit der Ordnungszahl 93, das erste Transuran-Element. In Analogie zum Planetensystem, in dem ausserhalb der Bahn des Uranus die Planeten Neptun und Pluto[21] umlaufen, wurde das neue Element *Neptunium* genannt. Konsequenterweise erhielt das Transuran mit der Ordnungszahl 94 den Namen *Plutonium*.

Im Dezember erzeugten McMillan, Joseph W. Kennedy (1916–1957) und Arthur C. Wahl (1917–2006) erstmals Plutonium 238, indem sie Uran-238 mit Deuterium-Kernen beschossen. Im Februar und März 1941 produzierten Glenn Theodore Seaborg (1912–199), Emilio Gino Segrè (1905–1989), Kennedy und Wahl das Isotop Plutonium-239 und wiesen nach, dass es durch langsame Neutronen gespalten werden konnte.

Plutonium ist ein silbrigweisses Metall mit aussergewöhnlichen Eigenschaften. Es existiert unter normalem Druck in sechs verschiedenen allotropen Modifikationen, die sehr unterschiedliche Dichten aufweisen. Dies macht die Bearbeitung von Plutonium sehr schwierig, da leicht Phasenübergänge auftreten. Plutonium wurde deshalb von einem Experten als „Ingenieur's Alptraum“ bezeichnet.

7.4 Zwei Wege zur Atombombe

Die naheliegendste Möglichkeit, eine Atombombe zu bauen, war also, das Uran-Isotop 235 möglichst hoch anzureichern. Da Isotope sich chemisch (praktisch) nicht trennen lassen, stehen für eine Isotopentrennung nur physikalische Methoden zur Verfügung, die alle ausserordentlich schwierig und aufwändig sind. Es wurden riesige Isotopentrennanlagen gebaut, bevor sicher war, ob das verwendete Prinzip in grossem Maßstab funktionieren würde. Viele Physiker zweifelten mit Recht daran, dass eine Isotopentrennung im erforderlichen Mengenbereich überhaupt möglich sei.

Eine zweite Möglichkeit, eine Kernspaltungswaffe zu bauen, bestand offenbar darin, Plutonium statt Uran-235 als Spaltstoff zu verwenden. Plutonium war aber bisher nur in Mikrogramm-Mengen verfügbar. Für eine Bombe mussten dagegen mehrere Kilogramm hergestellt werden – der genaue Wert der kritischen Masse war lange Zeit nicht bekannt. Wie bereits erwähnt, entsteht in einem

[21] Am 24. August 2006 wurde der Begriff „Planet“ von der Internationalen Astronomischen Union neu definiert. Dabei wurde Pluto als Kleinplanet klassifiziert und erhielt die Kleinplanetennummer 134340.

Kernreaktor Plutonium durch die (sonst unerwünschte) Absorption der Neutronen durch Uran-238. Zur Produktion von Plutonium mussten also grosse Kernreaktoren gebaut werden. Der Vorteil von Plutonium bestand darin, dass es – im Gegensatz zu Uran-235 – durch chemische Prozesse vom Uran getrennt werden konnte.

7.5 Organisation des Atomwaffenprogramms

Vannevar Bush (1890–1974), Präsident der Carnegie Institution of Washington, war auf Grund seiner Erfahrungen im ersten Weltkrieg überzeugt, dass es keine vernünftige Zusammenarbeit von militärischen und zivilen Entscheidungsträgern in Fragen der Waffenentwicklungen geben konnte – nicht einmal in Kriegszeiten. Am 12. Juni 1940 konnte er Präsident Roosevelt davon überzeugen, dass zur Koordination der Forschung für die Verteidigung ein nationales Komitee, das „National Defense Research Committee“ (NDRC) gebildet werden müsse. Bush wurde am 15. Juni zum Leiter des Komitees ernannt. Das Advisory Committee on Uranium wurde dem NDRC und damit Bush unterstellt, der es umorganisierte und unabhängig von militärischer Führung machte.

Regierungsbeamte beklagten sich, die Gründung des NDRC sei ein Manöver Bushs gewesen, um Macht an sich zu reissen und die offiziellen Kanäle zu umgehen. Bush gab 1970 zu, genau so sei es gewesen.

Im Juni 1941 wurde eine neue Organisation geschaffen, das „Office of Scientific Research and Development“ (OSRD). Das NDRC wurde dem OSRD in beratender Funktion unterstellt. Der Leiter des OSRD war Bush, der nur direkt Präsident Roosevlt verantwortlich war. James Bryant Conant (1893–1978) übernahm die Leitung des NDRC. Im Juli 1941 wurde das Advisory Committee on Uranium zum S-1 Projekt des NDRC mit Briggs als Leiter.

Im März 1941 verfasste das MAUD-Komitee einen vorläufigen Bericht, in dem es erklärte, dass der Bau von Atombomben möglich sei und dass sofort etwas unternommen werden müsse. Eine Kopie davon sandte es an Briggs, der diese in seinen Safe einschloss, ohne das Advisory Committee zu informieren. Die zwei endgültigen Berichte wurden im Juli eingereicht. Der erste beschrieb technische Details zum Bau einer Atombombe und zu den Wirkungen ihrer Explosion. Der zweite beschrieb die Möglichkeit der Energieerzeugung und der Produktion radioaktiver Isotope, die anstelle des teuren Radiums verwendet werden konnten. Kopien davon wurden an Bush gesandt, der aber auf die offizielle Version wartete, bevor er etwas unternehmen wollte.

Oliphant reiste im August in die USA um herauszufinden, warum auf die MAUD-Berichte keine Reaktion erfolgt war. Er musste zu seiner Bestürzung feststellen, dass Briggs die Berichte in seinen Safe eingeschlossen und das Advisory Committee nicht informiert hatte. Er traf mit dem Komitee und mit einer Reihe von Physikern, die er kannte, zusammen und bestand darauf, dass alle Anstrengungen auf den Bau der Bombe konzentriert werden müssten. Es dürfe nicht an Kraftwerksreaktoren gearbeitet werden, sondern nur an der Bombe. Er als Engländer hatte guten Grund für seine Einstellung. Im Gegensatz zu den USA war England bereits im Krieg mit Deutschland, und London war in Reichweite der deutschen Bomber. Es war nicht auszudenken, was geschehen könnte, wenn Deutschland die Atombombe zur Verfügung hätte, ohne dass England mit der Drohung eines Gegenschlages von deren Verwendung abschrecken könnte.

Bush erhielt ein offizielles Exemplar des MAUD-Reports am 3. Oktober 1941 und informierte Roosevelt darüber am 9. Oktober. Am 6. Dezember (einen Tag vor dem Angriff der Japaner auf Pearl Harbor) veranlasste er, dass die Forschungen zur Isotopenseparation und zur Kettenreaktion intensiviert wurden. Mit dem Eintritt der USA in den Krieg wurde das Atomwaffenprojekt endlich auch von der Regierung als dringlich betrachtet. Der Bau grosser Anlagen und die Notwendigkeit der Geheimhaltung führten dazu, dass das Projekt dem U.S. Army Corps of Engineers übertragen

wurde. Dazu wurde ein neuer District gebildet, der *Manhattan Engineer District*, oft auch kurz *Manhattan Project* genannt. Das Manhattan-Projekt beschäftigte schliesslich über 130'000 Leute und kostete nahezu 2 Milliarden Dollar (entsprechend 23 Milliarden Dollar zum Geldwert von 2007).

Am 17. September 1942 wurde Oberst Leslie Richard Groves (1896–1970) zum Leiter des Manhattan-Projekts ernannt. Er hatte im Corps of Engineers verschiedene Projekte, u.a. den Bau des Pentagons, geleitet. Er war bekannt als einerseits unbarmherzig, arrogant und selbstbewusst, aber andererseits auch als hochintelligent, ungeheuer energisch und organisatorisch und administrativ höchst begabt. Er hatte sich gewünscht, endlich von seinem Schreibtischposten in Washington loszukommen und hatte gerade eben die Aussicht, ein Frontkommando in Übersee zu erhalten, als ihm die Leitung des Manhattan-Projekts übertragen wurde. Zunächst war er tief enttäuscht und äusserst wütend. Sobald er aber einsah, dass sein Protest nichts nützte, setzte er sich mit seiner ganzen enormen Tatkraft für seine neue Aufgabe ein. Weniger als eine Stunde nach seiner Ernennung hatte er seine Enttäuschung heruntergeschluckt und war bereits intensiv an der Arbeit.

Abbildung 46: General L.R. Groves

Als Groves erfuhr, dass er zur Erweiterung seiner Befugnisse zum Brigadegeneral befördert werden sollte, schlug er vor, mit der offiziellen Ernennung zum Leiter des Projekts zu warten, bis seine Beförderung erfolgt war. Er wusste, dass er es mit Akademikern zu tun haben werde, und fand es besser, wenn diese in ihm von Anfang an einen General sahen, statt einen beförderten Obersten.

Groves' Arbeitsstil kann an einigen wenigen Beispielen illustriert werden.

Bereits einen Tag nach seiner (noch inoffiziellen) Ernennung liess er 1130 Tonnen Uranerz aufkaufen, das die Union Minière 1940 aus dem Belgischen Kongo in die USA gebracht hatte, um es vor dem Zugriff der Deutschen zu schützen. Das Erz lagerte in Port Richmond auf Staten Island, und seit sechs Monaten schon hatten die Belgier versucht, die amerikanische Regierung darauf aufmerksam zu machen.

Am nächsten Tag forderte er für das Manhattan-Projekt die höchste Dringlichkeitsstufe, AAA. Der Chef des War Production Board weigerte sich zuerst, aber als Groves erklärte, er müsse dem Präsidenten empfehlen, das Projekt aufzugeben, weil das War Production Board nicht mitwirke, gab er nach. Groves bekam seine Priorität AAA.

Noch am gleichen Tag unterzeichnete er eine Anweisung, um ein rund 150 Quadratkilometer grosses Grundstück am Clinch-River im Osten von Tennessee zu kaufen. Die Anweisung hatte den ganzen

Sommer auf dem Schreibtisch seines Vorgängers gelegen, weil der mit dem Ankauf warten wollte, bis die Möglichkeit einer Kettenreaktion bewiesen war. Das Gelände, 30 km westlich von Knoxville und 11 km südwestlich der kleinen Ortschaft Clinton, erhielt den Codenamen „Standort X“. Die dort errichteten Anlagen wurden „Clinton Engineer Works“ genannt und wurden später bekannt unter dem Namen „Oak Ridge“ (s. Karte Seite 124). Nach dem Krieg wurde daraus das *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) und aus den Wohnsiedlungen der Bauarbeiter und der Belegschaft der Anlagen wurde 1955 die Stadt Oak Ridge.

Am 23. September wurde die Ernennung Groves zum Brigadegeneral offiziell. Am gleichen Tag nahm er an einer Sitzung teil, die der Kriegsminister einberufen hatte, nicht zuletzt, um bei dieser Gelegenheit den Offizier, der so sehr für das Manhattan-Projekt empfohlen worden war, kennenzulernen. Der Kriegsminister schlug vor, eine Aufsichtskommission von sieben bis neun hohen Offizieren zu gründen. Obwohl alle Anwesenden weitaus älter und ranghöher als Groves waren, erklärte dieser sofort, das sei ineffizient, das ergäbe nur Verzögerungen und Hindernisse. Drei sei die ideale Zahl. Nach einiger Diskussion stimmte man ihm zu. Darauf tat Groves etwas, das wenige Offiziere in Gegenwart ihrer Vorgesetzten wagen würden. Er erhob sich, schaute auf seine Uhr und bat, man möge ihn entschuldigen, er wolle seinen Zug nach Tennessee erreichen, um den Standort X zu besichtigen. Für einen Moment waren alle Anwesenden bestürzt. Alle wollten, dass Groves schnell handelte, aber niemand hatte erwartet, dass er *ganz so schnell* handeln würde. Nachdem Groves die Erlaubnis erhalten hatte, die Konferenz zu verlassen, und gegangen war, sagte sein Vorgesetzter: „Ich hatte doch gesagt, wenn Groves die Verantwortung hat, kommt die Sache richtig in Bewegung!“.

Wenn Groves von Washington nach Chicago fuhr, begleitete ihn seine Sekretärin bis Baltimore, nahm sein Diktat auf und fuhr dann wieder nach Washington zurück. Auf diese Weise konnte Groves 50 Minuten länger diktieren.

Groves' militärische Untergebene mussten sich wohl oder übel an seinen Arbeitsstil anpassen. Aber auch die zivilen Ingenieure der Bau- und Konstruktionsfirmen wurden gnadenlos behandelt. Wenn ein Ingenieur mit Groves auf eine Inspektionstour ging, musste er zu seinem Missbehagen feststellen, dass Groves einen Zug mit einer etwas ungewöhnlichen Abfahrtszeit wie 1 Uhr morgens gewählt hatte. Wenn man dann zum Beispiel um 6 Uhr morgens am Bestimmungsort ankam und der erschöpfte Zivilist sich nach einer praktisch schlaflos verbrachten Nacht auf ein anständiges Frühstück freute, erklärte der völlig frisch aussehende General fröhlich: „Wir wollen keine Zeit mit Frühstück verlieren, nicht wahr? Gehen wir gleich zum Meeting.“

Groves arbeitete täglich 12 bis 14 Stunden – an sechs Tagen pro Woche. Sein Arbeitsstil und seine Umgangsformen waren für die Nerven seiner Mitarbeiter eine grosse Zumutung, aber damit erreichte er die gesteckten Ziele. Einer seiner Mitarbeiter formulierte es folgendermassen. Groves sei der unsympathischste Mensch, den er kenne (er drückte sich wesentlich weniger gewählt aus), aber wenn er wieder an einem solchen Projekt arbeiten müsste, würde er wieder Groves als Vorgesetzten haben wollen.

Groves besass eine ungewöhnliche Gabe, Menschen richtig zu beurteilen und einzuschätzen. Er hatte wie kaum ein anderer den Mut, auf der Basis von völlig unzureichenden Grundlagen Entscheide von grosser Tragweite zu fällen. Und nahezu immer waren diese Entscheidungen richtig. Dass das Manhattan-Projekt, ein Projekt von nie dagewesenen Dimensionen, in so kurzer Zeit erfolgreich zum Ziel geführt wurde, ist nicht zuletzt den aussergewöhnlichen Fähigkeiten Groves' zu verdanken. Trotz (oder vielleicht wegen) seiner brüsken Art gewann er stets sofort das Vertrauen der Manager, die er dazu überzeugen musste, ihre Firma für ein anscheinend völlig irres und hoffnungslos schwieriges Projekt (von dem sie nicht einmal den Zweck kannten) voll einzusetzen.

Die verschiedenen Probleme wurden an Universitäten studiert, die über das ganze Land verteilt waren. Dies erschwerte einerseits den Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Forschergruppen und gefährdete andererseits die Geheimhaltung. Groves und Oppenheimer diskutierten miteinander das Problem während einer Bahnfahrt von Chicago nach New York. Eigentlich wäre zu erwarten gewesen, dass zwei so gegensätzliche Charaktere wie Groves und Oppenheimer sich kaum verstehen würden und sich gegenseitig als „praxisfremder Intellektueller“ bzw. als „sturer Militärkopf“ abqualifizieren würden. Erstaunlicherweise war es nicht so. Als die beiden Männer miteinander sprachen, bekamen beide einen grossen Respekt vor ihrem Gesprächspartner und lernten sich gegenseitig schätzen. Bei ihrer Diskussion kamen sie zum Schluss, dass die Koordination und Zentralisation aller Forschungsarbeiten in einem einzigen, aber möglichst isolierten und abgelegenen Institut die ideale Lösung sei.

Nach einigem Suchen wurde ein passender Ort gefunden: *Los Alamos*, ein Hochplateau in der Wüste von Neu Mexiko (s. Karte Seite 124). Groves ernannte 1942 Oppenheimer zum Leiter des neuen Laboratoriums. Er als Einziger traute dem als eher weltfremd geltenden Gelehrten Führungsqualitäten zu – und einmal mehr sollte er recht behalten.

7.6 Los Alamos

In Los Alamos sollte an der eigentlichen Konstruktion der Bombe gearbeitet werden. Viele Wissenschaftler fanden es verfrüht, diese Probleme in Angriff zu nehmen, bevor sicher war, ob überhaupt Uran-235 oder Plutonium-239 in genügenden Mengen hergestellt werden konnte. Ernest Orlando Lawrence (1901–1958) erklärte Groves, in drei Monaten könnten 30 Wissenschaftler die Bombe bauen, sobald Spaltmaterial zur Verfügung stände. Groves war anderer Meinung. Er glaubte, dass die Schwierigkeiten eine Bombe zu bauen gewaltig unterschätzt würden. Verfolgt von der Angst, dass die deutschen Wissenschaftler einen grossen Vorsprung in der Entwicklung der Waffe haben könnten, war es für ihn ein Alptraum, sich vorzustellen, dass das Spaltmaterial bereit wäre, aber niemand wüsste, wie man damit eine Bombe bauen könnte. Und wieder einmal hatte er recht. Die Entwicklung der Bombe in Los Alamos nahm mehr als 2 Jahre in Anspruch, und die Zahl der dafür Beschäftigten wuchs auf über 5500 an. Neben den bereits bei der Gründung des Forschungszentrums zur Lösung anstehenden Problemen tauchten während der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten völlig neue, ungeahnte Schwierigkeiten auf.

Die Rekrutierung des Personals – gleichgültig, ob Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker, Werkstattpersonal, Sekretärinnen oder Hilfskräfte – war insofern schwierig, als den Betreffenden nicht gesagt werden konnte, wo sie arbeiten würden, wie lange sie dort sein würden und woran genau sie arbeiten würden. Oft war es allein die Persönlichkeit des Rekrutierenden (für die Wissenschaftler meist Oppenheimer), welche die Betreffenden bewog, auf derart vage Anstellungsbedingungen hin zuzusagen. Besonders schwierig war es, Wissenschaftler für das geheime Projekt zu gewinnen, weil viele von ihnen bereits an anderen kriegswichtigen Projekten (z.B. Entwicklung des Radars) arbeiteten.

Die Lebens- und Arbeitsbedingungen in Los Alamos waren – vor allem in der Anfangsphase – sehr spartanisch. Die Versorgung und Materialbeschaffung war nicht einfach. Ein Forschungslaboratorium von Grund auf einzurichten ist an sich schon ein Problem, aber hier musste während den im Krieg herrschenden Versorgungsschwierigkeiten ein grosses Labor zusammen mit einer kleinen Stadt mitten in der Wildnis mehr als 100 km von der nächsten Bahnstation entfernt unter strengster Geheimhaltung aufgebaut werden. Bei der Beschaffung von Material, Geräten und Apparaten für Experimente ist die direkte Kommunikation zwischen den betreffenden Forschern und den Herstellerfirmen besonders wichtig und wertvoll, damit die meist ungewöhnlichen Anforderungen und

Spezifikationen abgeklärt werden können. Genau das war aber wegen der Geheimhaltung nicht möglich. Rückfragen liefen über die Bestellbüros in New York oder Chicago, von dort nach Los Angeles, dann zum Bestellbüro in Los Alamos und schliesslich zur betroffenen Gruppe. Die Antwort ging auf dem gleichen Weg zurück zum Hersteller. Die bestellten Artikel wurden nach Chicago oder Los Angeles geliefert, von wo sie nach Los Alamos weitergeleitet wurden, nachdem die Originaletiketten entfernt worden waren, damit kein Unbefugter sehen konnte, was bestellt worden war.

Abbildung 47: Los Alamos, Technical Area 1 um 1944

Die Geschichte von Los Alamos und der dort unternommenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist ein Thema für sich [26], [32], auf das hier nicht weiter eingegangen wird.

8 Urananreicherung

Die Isotopenanteile von natürlichem Uran sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

^{234}U	0.0056	%
^{235}U	0.72	%
^{238}U	99.27	%

Unter *Urananreicherung* wird die Erhöhung des prozentualen Anteils des Isotops ^{235}U verstanden. Dazu müssen die verschiedenen Isotope voneinander getrennt werden. Da Isotope sich im chemischen Verhalten kaum unterscheiden, beruhen *Isotopentrennverfahren* fast immer auf physikalischen Prozessen. Nur bei ganz leichten Elementen wie Wasserstoff und Lithium sind die relativen Massendifferenzen gross genug, um ein für eine chemische Trennung hinreichend unterschiedliches chemisches Verhalten zu bewirken.

Bei den meisten Trennverfahren entsteht nicht ein reines Isotop, sondern durch das Verfahren entstehen aus dem ursprünglichen Isotopengemisch zwei Teilmengen, die *Fraktionen* genannt werden. In der einen Fraktion ist das gewünschte Isotop *angereichert* und in der anderen Fraktion *abgereichert*. Indem die angereicherte Fraktion einer nächsten Trennstufe zugeführt wird, kann die Anreicherung erhöht werden. Da die Anreicherung in einer Stufe in den meisten Fällen sehr gering ist, müssen zur Erlangung der gewünschten Anreicherung viele (unter Umständen mehrere tausend) Stufen hintereinander geschaltet werden. Weil die abgereicherten Fraktionen immer noch das gewünschte Isotop enthalten, werden sie den vorangehenden Trennstufen zugeführt. Abbildung 48 zeigt das Prinzip für das Beispiel einer Gasdiffusionsanlage.

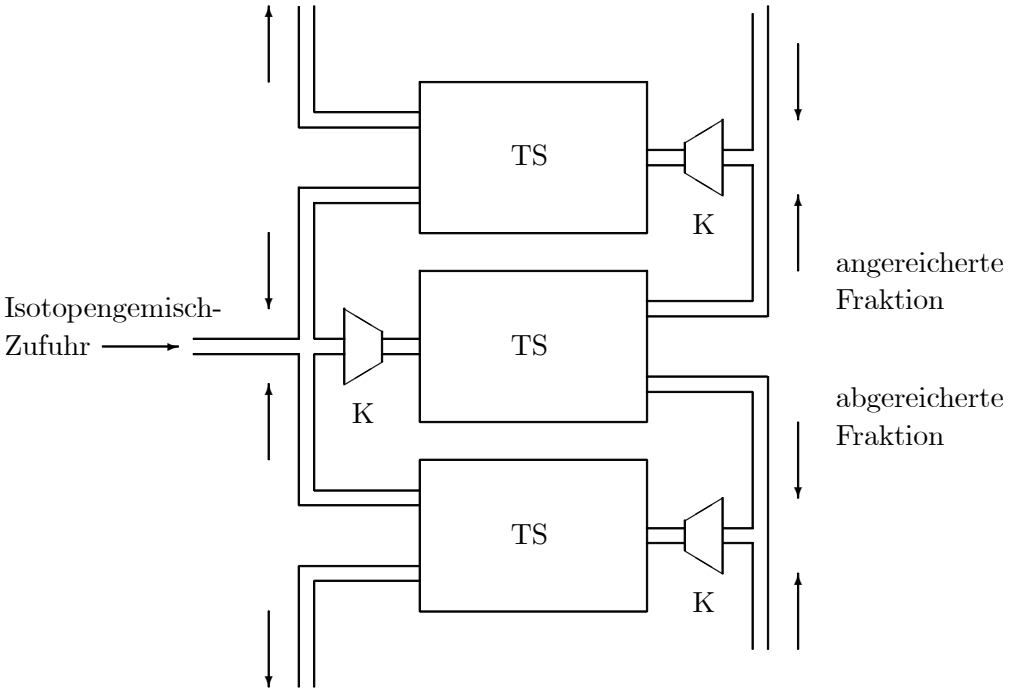

Abbildung 48: Serienschaltung von Trennstufen
TS = Trennstufe K = Kompressor

Da ein Trenngerät nur einen bestimmten beschränkten Massendurchsatz erlaubt, werden viele Geräte parallel geschaltet, um den gewünschten Durchsatz zu erhalten. Infolge der Trennung nimmt der Durchsatz der angereicherten Fraktion von Stufe zu Stufe ab, so dass die Zahl der notwendigen Geräte in den höheren Trennstufen immer mehr abnimmt. Das Gleiche gilt für die Trennstufen, die unterhalb der primären Stoffzufuhr liegen. Die ganze Anordnung wird als *Kaskade* bezeichnet (s. Abbildung 49).

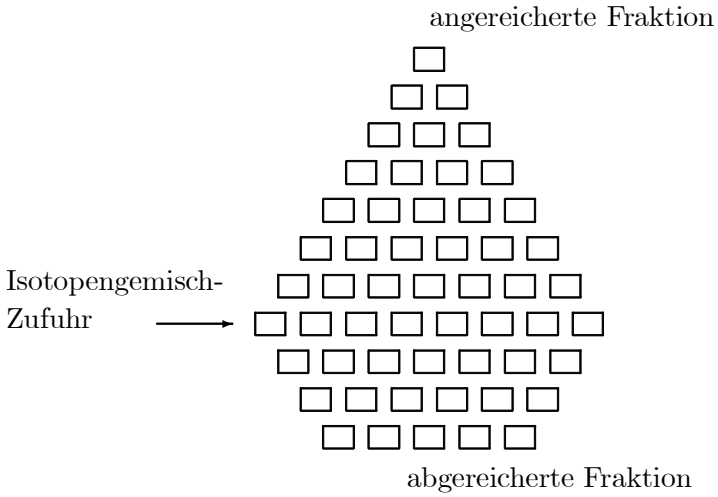

Abbildung 49: Schematische Darstellung einer Isotopentrennungs-Kaskade

Für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren wird Uran mit einer Anreicherung von 2 bis 5 % benötigt; für Kernwaffen dagegen muss der ^{235}U-Gehalt auf mindestens 80 bis 90 % erhöht werden.

Die wichtigsten physikalischen Isotopentrennverfahren für Uran sind in der folgenden Liste aufgeführt:

1. Gaszentrifugen
2. Elektromagnetische Separation
3. Gasdiffusion
4. Thermodiffusion
5. Trenndüsen
6. Laser

Beim Gaszentrifugen-Verfahren, bei der Gasdiffusion, beim Trenndüsen-Verfahren und bei einem Teil der Laser-Verfahren, wird das Uran in Form von gasförmigem Uranhexafluorid (UF_6) verwendet. Uranhexafluorid ist bei Normaldruck und Zimmertemperatur fest. Unter Normaldruck sublimiert UF_6 bei 56.5°C, d.h. es geht ohne zu schmelzen vom festen Zustand direkt in den gasförmigen Zustand über. Es hat daher den Vorteil, bei mässiger Temperatur gasförmig zu sein.

Uranhexafluorid ist nicht brennbar und in trockener Luft beständig. Es reagiert jedoch sehr heftig mit Wasser (d.h auch schon mit der Luftfeuchtigkeit), wobei Fluorwasserstoff (HF) gebildet wird. Es ist daher äusserst giftig und wirkt extrem korrosiv.

Bei der elektromagnetischen Separation wird Urantetrachlorid (UCl_4) statt Uranhexafluorid verwendet, weil das Tetrachlorid den grossen Vorteil hat, bedeutend weniger korrosiv zu sein als das Hexafluorid. Der Nachteil, dass das Tetrachlorid erst bei einer Temperatur von über 791°C gasförmig wird, wirkt sich nicht gravierend aus, da diese Temperatur nur im Innern der kleinen

Ionenquelle und nicht im grossen Volumen des Vakuumtanks (s. Abschnitt 8.2) aufrechterhalten werden muss.

8.1 Gaszentrifugen

Eine Gaszentrifuge besteht aus einem langen schlanken zylindrischen Rotor, der sich in einer Vakuumkammer sehr schnell dreht. Uranhexafluorid wird in das Innere des Rotors geleitet. Durch die hohen Zentrifugalkräfte ist an der Aussenwand des Rotors die Konzentration des ^{238}U etwas höher als in der Nähe der Drehachse. In der Nähe der Achse ist dagegen die Konzentration des ^{235}U etwas erhöht.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors ist begrenzt durch das Verhältnis Zugfestigkeit zu Dichte des Rotormaterials. Moderne Zentrifugen erreichen Umfangsgeschwindigkeiten von über 600 m/s und Drehzahlen von über 1500 Umdrehungen pro Sekunde. Die Zentrifugalbeschleunigung an der Aussenwand ist dabei über 500'000 mal grösser als die Erdbeschleunigung. Das bedeutet, dass an jedem Massenteil von 1 Gramm eine Kraft zieht, die dem (normalen) Gewicht einer Masse von über 500 kg entspricht.

Zentrifugen haben den Vorteil, dass ihr Energieverbrauch viel kleiner ist als derjenige der anderen Trennverfahren. Sie verbrauchen zur Anreicherung der gleichen Uranmenge rund 50mal weniger Energie als Gasdiffusionsanlagen.

Das Trennverfahren mit Zentrifugen war zwar bereits seit 1919 bekannt, aber erst 1934 wurden die ersten erfolgreichen Experimente durchgeführt. Da beim damaligen Stand der Technik jedoch dauernd Probleme auftraten, wurde es als aussichtlos betrachtet, die für eine Urananreicherungsanlage notwendige Zahl von 50'000 Zentrifugen genügend störungsfrei betreiben zu können. Das Zentrifugenprojekt wurde daher Ende 1942 gestoppt. Nahezu alle modernen Uranisotopen-Trennanlagen arbeiten jedoch mit dem Zentrifugenverfahren.

8.2 Elektromagnetische Separation

Ein Massenspektrometer ist ein Gerät, das ermöglicht, in einem Ionenstrahl die Ionen mit unterschiedlicher Masse voneinander zu trennen. Im Wesentlichen beruht seine Funktion darauf, dass geladene Teilchen in einem homogenen Magnetfeld Kreisbahnen durchlaufen, deren Radius umso grösser ist, je grösser die Masse des Teilchens ist. In Abbildung 50 ist schematisch das Funktionsprinzip dargestellt für den Fall, dass die Ionenquelle zwei Sorten von Ionen emittiert. Die schwereren Ionen (s) durchlaufen eine Kreisbahn mit einem grösseren Radius als die leichteren Ionen (l). Ein Massenspektrometer eignet sich daher im Prinzip zur Isotopentrennung. Während jedoch in einem Massenspektrometer die Ionen gewissermassen einzeln gezählt werden, wird von einer Isotopentrennanlage ein Massendurchsatz von der Grössenordnung 10 bis 100 Gramm pro Tag erwartet.

Die Abbildung 50 ist stark vereinfacht und entspricht in verschiedener Hinsicht nicht der Realität. Erstens einmal verlassen die Ionen die Quelle nicht in genau einer Richtung, sondern die Ionenstrahlen bilden einen Kegel mit einem endlichen Öffnungswinkel (s. Abbildung 51). Zweitens weist die Öffnung eine gewisse Breite auf (s. Abbildung 52). Dadurch werden die Teilchen gleicher Masse nach dem Durchlaufen eines halben Kreisbogens nicht mehr in einem vertikalen dünnen Strich, sondern in einem Streifen mit einer gewissen Breite gesammelt.

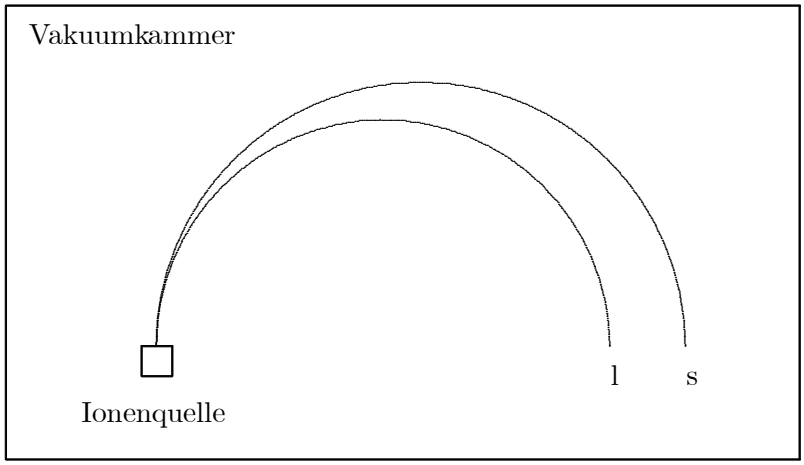

Abbildung 50: Prinzip eines Massenspektrometers
Die Teilchen bewegen sich in einem Magnetfeld, dessen Feldlinien senkrecht stehen zur Zeichenebene.
l = leichte Teilchen s = schwere Teilchen

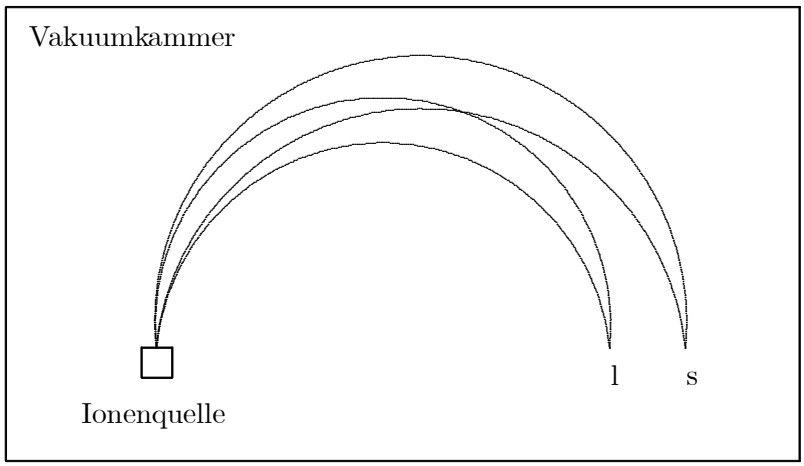

Abbildung 51: Ionenstrahlen mit endlichem Öffnungswinkel
l = leichte Teilchen s = schwere Teilchen

Je grösser die Öffnung der Ionenquelle ist, desto grösser wird die Intensität des Ionenstrahls. Um einen möglichst grossen Massendurchsatz bei der Isotopentrennung zu ereichen, sollte daher die Öffnung der Ionenquelle möglichst gross gemacht werden können. Dabei darf jedoch ein bestimmter Wert nicht überschritten werden. In dem in den Abbildungen 50 bis 52 gezeigten Beispiel ist die Masse der schweren Teilchen um 17 % grösser als die Masse der leichten Teilchen. Bei Uran unterscheiden sich die Massen der Isotope ^{235}U und ^{238}U jedoch nur um 1.3 %, d.h. für die in der Abbildung 52 gewählte Strahlbreite würden sich die Bereiche, in denen die leichten und die schweren Teilchen auftreffen, bereits überlappen. Es muss also ein optimaler Kompromiss gefunden werden zwischen den beiden sich widersprechenden Forderungen „hoher Massendurchsatz“ und „vollständige Separation“.

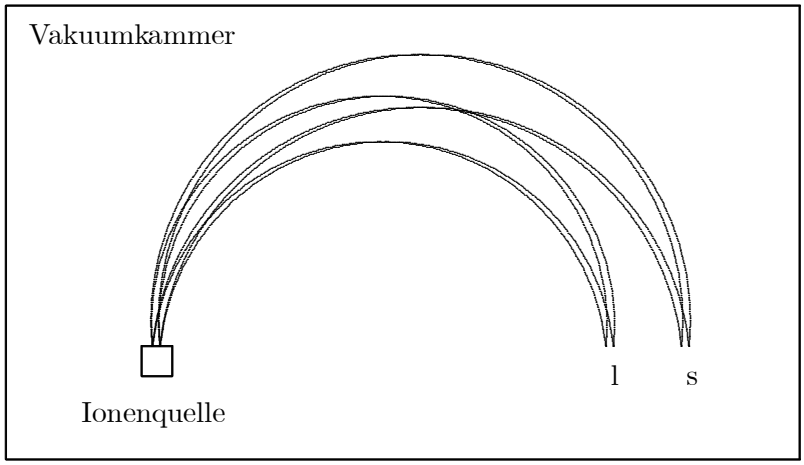

Abbildung 52: Strahlen mit endlicher Öffnung und endlicher Breite
l = leichte Teilchen s = schwere Teilchen

Lawrence erfand das Zyklotron und baute anfangs 1931 ein erstes Modell, das einen Durchmesser von nur 10 Zentimetern hatte. In den folgenden Jahren wurden in dem von ihm gegründeten *Radiation Laboratory* der *University of California* sukzessive immer grössere Zyklotrone gebaut.

Abbildung 53: E. Lawrence

Zu Beginn des 2. Weltkrieges war eine Maschine mit einem Polschuhdurchmesser von 4.67 m (184 Zoll) im Bau. Als das Problem der Uranisotopentrennung aktuell wurde, baute Lawrence ein 34-Zoll-Zyklotron (94 cm) in ein Massenspektrometer um. Im Dezember 1941 wurde damit ein Uran-Strahlstrom von 5 Mikroampere erreicht. Bei perfekter Separation hätten damit in 24 Stunden 7.7 Mikrogramm ^{235}U abgetrennt werden können. Mit dem 34-Zoll-Magneten wurde jedoch noch keine vollständige Separation erreicht. Für einen Trennapparat mit hinreichender Leistungsfähigkeit war offenbar ein grösserer Magnet und ein wesentlich höherer Strahlstrom erforderlich. Für das Entwickeln und Testen eines Prototyps eines solchen Apparates wurde der für das 184-Zoll-Zyklotron vorgesehene Magnet verwendet. Dem Apparat wurde der Name *Calutron* gegeben, ein Kunstwort, gebildet aus *Cal*ifornia, *u*niversity und Zyklo*tron*.

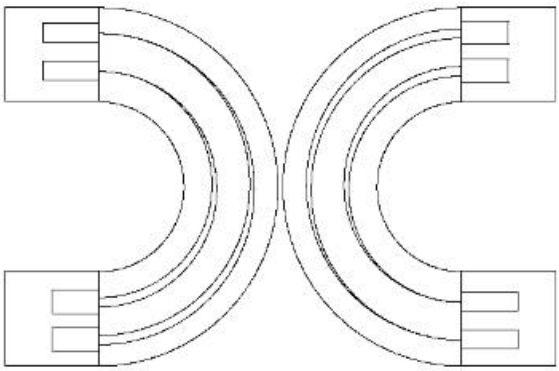

Abbildung 54: Calutrons

Die hufeisenförmigen Calutron-Tanks hatten einen Durchmesser von rund 3 m und waren mit zwei Ionenquellen versehen. In den Ionenquellen wurde Urantetrachlorid mit Hilfe einer elektrischen Heizung verdampft, und der UCl_4-Dampf wurde mit Elektronen bombardiert um U^+-Ionen zu erzeugen. Diese wurden durch eine elektrische Spannung beschleunigt und verliessen die Ionenquellen mit hoher Geschwindigkeit.

Je zwei Calutron-Tanks befanden sich zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten. Um das teure Material für die Magnete zu sparen, waren die Calutrons und die Magnete abwechslungsweise hintereinander in einem Oval angeordnet, das *race track* genannt wurde. Es wurden zwei Typen von Calutrons entwickelt, *Alpha* und *Beta*. Ein Alpha-Race-Track bestand aus 96 Alpha-Calutrons und war 37 m lang, 23.5 m breit und 4.6 m hoch (Abbildung 55).

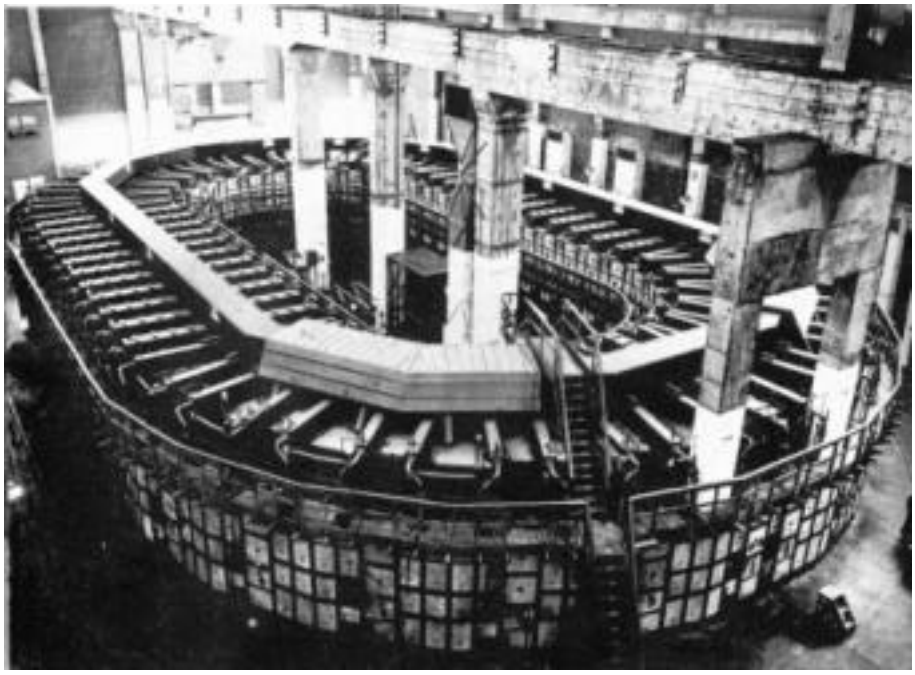

Abbildung 55: Alpha-Race-Track

Die Beta-Calutrons wurden als zweite Anreicherungsstufe entwickelt und sollten mit dem bereits angereicherten Uran der Alpha-Calutrons betrieben werden. Die Alpha-Calutrons produzierten

Uran mit einer Anreicherung von 10 bis 20 %, und die mit diesem Material betriebenen Beta-Calutrons erhöhten die Anreicherung auf 90 %. Da die Beta-Calutrons einen kleineren Massenfluss zu verarbeiten hatten, konnten sie dementsprechend kleiner dimensioniert werden. Ein Beta-Race-Track bestand aus 36 Beta-Calutrons. Es wurden 9 Alpha- und 8 Beta-Race-Tracks mit total 1152 Calutrons gebaut.

Die ganze Anlage, die die Codebezeichnung „Y-12“ erhielt, wurde in Oak Ridge in den Jahren 1943 und 1944 gebaut und beschäftigte im Betrieb bis zu 22'000 Personen.

Der Prozess war äusserst ineffizient. Erstens hatte er einen enormen Energieverbrauch, der noch höher war als der Energiebedarf einer Gasdiffusionsanlage mit gleicher ^{235}U-Produktion. Zweitens wurde nur ein Teil des Tetrachlorids ionisiert, und nur ein Teil der Uranionen verliess als Strahl die Ionenquelle. Der Rest des Materials verteilte sich über das ganze Innere des Calutron-Tanks und musste immer wieder in einem mühsamen und zeitaufwändigen Verfahren zurückgewonnen werden. Es war jedoch ein grosser Vorteil, dass die einzelnen Elemente unabhängig voneinander waren. So konnte ein Calutron herausgenommen und revidiert werden, ohne dass das ganze Race-Track abgeschaltet werden musste.

Die Ionenstrahlen der Calutrons mussten rund um die Uhr von Operateuren (meist Frauen) justiert und überwacht werden. Die Operateure wurden instruiert, was sie tun mussten, und es wurde ihnen gesagt, dass ihre Arbeit von höchster Wichtigkeit und kriegsentscheidend sei, aber sie wurden nicht darüber informiert, was sie eigentlich taten und wozu es diente. Sie bedienten also während Monaten mit grosser Konzentration ihre Schalttafeln, ohne die geringste Ahnung zu haben, was eigentlich vor sich ging.

Abbildung 56: Calutron-Kontrollraum

Da es infolge des Krieges schwierig oder gar unmöglich gewesen wäre, genügend Kupfer für die Magnetspulen zu bekommen, kam man auf die Idee, für die Spulen Silberdraht zu verwenden und

das Silber beim Schatzamt zu entleihen. Als Kenneth Nichols, der Stellvertreter Groves', mit Daniel Bell, dem stellvertretenden Finanzminister über die Ausleihe des Silbers verhandelte, war dieser freundlich und entgegenkommend. Er hatte sogar Verständnis dafür, dass Nichols nicht sagen wollte, wofür er denn das Silber brauchte. Als Bell fragte, wie viel Silber denn benötigt würde, zögerte Nichols kurz, weil noch gar keine konkreten Konstruktionsdaten für die Magnete vorhanden waren, und nannte dann eine Zahl, die ihm vernünftig schien: „Sechstausend Tonnen". Darauf verlor Bell sein freundliches Lächeln und seine Stimme klang eisig: „Junger Mann, Sie mögen von Silber in Tonnen denken, aber das U.S. Schatzamt wird von Silber immer in Troy-Unzen[22] denken." Trotzdem konnten sich Bell und Nichols schliesslich einigen. Die ausgeliehene Silbermenge betrug letzten Endes 14'700 Tonnen, und es wurde getreulich über jede Unze Buch geführt und auch jede Unze wieder zurückgegeben.

8.3 Gasdiffusion

In einem Gas, das sich in einem thermischen Gleichgewicht befindet, haben alle Moleküle die gleiche mittlere kinetische Energie. Für die kinetische Energie E_{kin} der Moleküle gilt die Beziehung[23]

$$E_{kin} = \frac{m\,v^2}{2}\,. \tag{4}$$

wobei m die Masse der Moleküle und v ihre Geschwindigkeit bedeuten. Die Geschwindigkeit der Teilchen ist somit

$$v = \sqrt{\frac{2\,E_{kin}}{m}} \tag{5}$$

Leichte Moleküle haben also eine grössere mittlere Geschwindigkeit als schwere Moleküle.

Wenn nun ein Gasgemisch in einem Behälter eingeschlossen ist, treffen die leichten Moleküle wegen ihrer höheren Geschwindigkeit etwas häufiger auf die Behälterwände als die schweren Moleküle.

Ein Behälter sei durch eine Trennwand mit vielen sehr feinen Löchern in zwei Abteile A und B unterteilt. Das Abteil A werde mit einem Gasgemisch gefüllt und das Abteil B evakuiert (Abbildung 57).

Wegen ihrer grösseren Geschwindigkeit werden die leichteren Molekülen mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit durch die Löcher in das Abteil B gelangen als die schwereren Molekülen. Das Gasgemisch, das sich im Abteil B ansammelt, hat daher einen etwas höheren Anteil an leichten Molekülen, während das im Abteil A verbleibende Gemisch einen etwas höheren Anteil an schweren Molekülen erhält.

Der Durchmesser der Löcher muss kleiner sein als die mittlere freie Weglänge im Gas, so dass keine Gasströmung entsteht, sondern nur Diffusion stattfindet. Unter *Diffusion* werden Konzentrationsausgleichsvorgänge verstanden, die durch die molekulare Wärmebewegung verursacht werden.

[22] 1 Troy-Unze = 31.1 g

[23] Die Beziehung ist nichtrelativistisch, d.h. sie gilt, wenn die Geschwindigkeiten der Teilchen klein sind verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit, die rund 300'000 km/s beträgt. Diese Voraussetzung ist jedoch praktisch stets erfüllt. Selbst in einem Wasserstoff-Plasma mit einer Temperatur von 100 Millionen Grad haben die Protonen eine mittlere Geschwindigkeit, die nur 4.3 Promille der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Die Elektronen in diesem Plasma erreichen allerdings eine mittlere Geschwindigkeit von 18 % der Lichtgeschwindigkeit, d.h. für sie müsste bei genaueren Rechnungen die relativistische Beziehung verwendet werden.

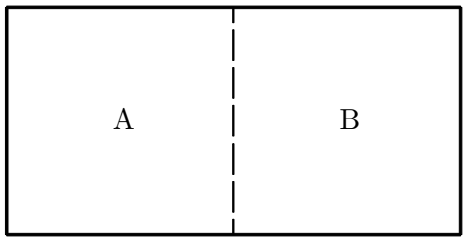

Abbildung 57: Diffusion

Der Konzentrationsunterschied entsteht nur am Anfang des Diffusionsprozesses. Wenn sehr lange gewartet wird, bildet sich schliesslich ein Gleichgewichtszustand, bei dem auf beiden Seiten der Trennwand das Gasgemisch die gleiche Zusammensetzung aufweist. Damit der Konzentrationsunterschied ausgenützt werden kann, muss im Abteil A ständig frisches Gas zugeführt und das Gas mit bereits reduziertem Anteil an leichten Molekülen weggeführt werden. Zugleich wird in Abteil B das Gas mit dem erhöhten Anteil an leichten Molekülen laufend weggepumpt.

Der Anreicherungsfaktor ist definiert durch

$$r = \frac{n_1'/n_2'}{n_1/n_2}\,. \tag{6}$$

Dabei ist

n_1 = relative Zahl der leichten Moleküle in Abteil A
n_2 = relative Zahl der schweren Moleküle in Abteil A
n_1' = relative Zahl der leichten Moleküle in Abteil B
n_2' = relative Zahl der schweren Moleküle in Abteil B .

Aus Gleichung (5) folgt für das Verhältnis α der Molekülgeschwindigkeiten sofort

$$\alpha = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \tag{7}$$

mit

v_1 = mittlere Geschwindigkeit der leichten Moleküle
v_2 = mittlere Geschwindigkeit der schweren Moleküle
m_1 = Masse der leichten Moleküle
m_2 = Masse der schweren Moleküle .

Wie bereits erwähnt, wird für die Urananreicherung Uranhexafluorid verwendet, das oberhalb 56.5°C gasförmig ist. Es ist ein grosser Vorteil, dass Fluor nur ein einziges stabiles Isotop mit der Massenzahl 19 hat, weil deshalb die Masse von UF_6 nur von der Masse des Uranisotops abhängig ist. Für die (gerundeten) Massen ergibt sich:

$$m_1 = 349 \quad (235 + 6 \cdot 19)$$
$$m_2 = 352 \quad (238 + 6 \cdot 19)\ .$$

Damit wird

$$\alpha = \sqrt{\frac{352}{349}} = 1.0043\,. \tag{8}$$

Abbildung 58 zeigt schematisch das Prinzip der technischen Realisierung eines Diffusionstanks. Das Gasgemisch wird von links dem Tank zugeführt und strömt dann durch ein Rohr mit poröser Wand. In Wirklichkeit enthält ein Diffusionstank nicht nur ein Rohr, sondern typischerweise über tausend Rohre.

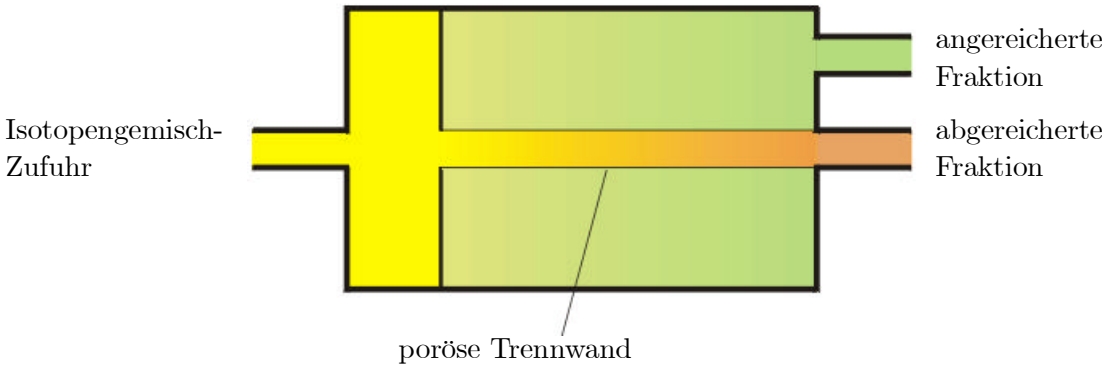

Abbildung 58: Diffusionstank

Das aus dem Rohr in den rechten Teil des Tanks diffundierende Gasgemisch ist etwas angereichert an leichten Molekülen, während das Gasgemisch, das rechts das Rohr verlässt, etwas abgereichert ist. Wenn die Hälfte des in das Rohr hineingeströmten Gases aus dem Rohr hinausdiffundiert, ergibt die Theorie für den idealen Wert des Anreicherungsfaktors die Beziehung

$$r = 1 + 0.69(\alpha - 1)\,. \tag{9}$$

Mit dem Wert von Gleichung (8) ergibt sich somit

$$r = 1.0030\ .$$

Verschiedene Effekte bewirken, dass der technisch realisierbare Wert des Anreicherungsfaktors etwas kleiner ist. Erstens können einzelne Moleküle von aussen in das Rohr zurückdiffundieren, zweitens ist die Durchmischung im Rohr nicht vollkommen und drittens weist die Trennwand eventuell Fehlstellen auf.

In natürlichem Uran ist das Isotopenverhältnis ^{235}U / ^{238}U

$$n_1/n_2 = 1/140\ .$$

Für waffenfähiges Uran muss eine Anreicherung von etwa 90 %, d.h. ein Verhältnis von

$$n_1/n_2 = 9/1\ ,$$

erreicht werden. Es braucht somit eine Trennkaskade mit einem totalen Anreicherungsfaktor von

$$r_t = \tfrac{9/1}{1/140} = 1260\ .$$

Der totale Anreicherungsfaktor einer Kaskade von x Trennstufen mit dem Anreicherungsfaktor r beträgt $r_t = r^x$.

Wird für den Anreicherungsfaktor einer Stufe der Wert $r = 1.0025$ angenommen, so ergibt sich $x = 2859$.

Für den Anreicherungsbereich der Kaskade sind also über 2800 Stufen notwendig. Um möglichst wenig ^{235}U zu verlieren, wird auch die abgereicherte Fraktion über mehrere Stufen geführt. Je nach dem gewünschten Abreicherungsgrad der Fraktion, die schliesslich als Abfall entsorgt wird, sind auch im Abreicherungsbereich der Kaskade mehrere hundert Stufen erforderlich.

Weil das durch die Trennwand hindurchdiffundierte Gas unter einem wesentlich niedrigeren Druck steht als das der Trennstufe zugeführte Gas, muss es mit Hilfe einer Pumpe wieder auf hohen Druck gebracht werden, bevor es der nächsten Trennstufe zugeführt wird. Da bei der Kompression das Gas beträchtlich erwärmt wird, ist in jeder Trennstufe auch ein Kühler erforderlich.

Beim Bau der ersten Gasdiffusionsanlage zur Urananreicherung gab es mehrere grosse Probleme zu lösen.

Da Uranhexafluorid heftig mit Fetten reagiert, mussten völlig neuartige Pumpen konstruiert werden, die kein Fett für die Dichtung und Schmierung benötigten. Das Dichtungsmaterial, das schliesslich zum Einsatz kam, wurde nach dem Krieg unter dem Namen *Teflon* bekannt.

Weil das Hexafluorid auch gewöhnlichen Stahl angreift, mussten alle Rohrleitungen, Tanks und Pumpen auf der Innenseite vernickelt werden. Da die am Anfang produzierten Nickelschichten porös waren, drang das Hexafluorid zwischen die Nickelschicht und den Stahl ein, worauf sich die Schicht ablöste und die Stahloberfläche ungeschützt dem korrosiven Hexafluorid ausgesetzt war. Es dauerte Monate, bis ein geeignetes Vernickelungsverfahren gefunden wurde.

Das Hauptproblem war jedoch die Herstellung einer geeigneten Trennwand[24]. Die Anforderungen an die Trennwand sind extrem.

Die Trennwand muss mit unzähligen Löchern versehen sein, die nicht wesentlich grösser als 0.01 Mikrometer[25] sein dürfen. Diese Löcher dürfen im Betrieb sich nicht (durch Korrosion) vergrössern und dürfen aber auch nicht verstopft werden. Damit die Trennwand eine hinreichende Durchlässigkeit hat, darf sie nur wenige Mikrometer dick sein. Trotzdem muss sie während Jahren einer Druckdifferenz von etwa 0.5 bar standhalten. Zudem darf sie durch das chemisch äusserst aggressive Uranhexafluorid nicht angegriffen werden. Schliesslich müssen sich riesige Flächen davon mit konstanter Qualität industriell herstellen lassen.

Die Suche nach einer brauchbaren Trennwand und einem für die Grossproduktion geeigneten Herstellungsverfahren nahm mehr als ein Jahr in Anspruch. Viele Trennwände, die sich im Laborversuch bewährt hatten, erwiesen sich als ungeeignet für die Herstellung oder den Betrieb im grossen Maßstab.

Es sind zwei Typen von Trennwänden bekannt: Folien und Aggregate. Aus einer Folie, die aus einer Legierung von zwei Metallen besteht, wird das eine Metall mit Hilfe einer Säure herausgeätzt. Aggregate werden durch Sintern von Metallpulver hergestellt. Die in den USA verwendeten Trennwände bestehen aus gesintertem Nickel. Details über Trennwände sind jedoch auch heute noch geheim.

[24] In der amerikanischen Literatur *barrier*, in der englischen Literatur *membrane* genannt.
[25] 1 Mikrometer = 1/1000 Millimeter.

Da die Zeit so sehr drängte, fasste Groves den kühnen Entschluss, im Sommer 1943 mit dem Bau einer riesigen Gasdiffusionsanlage bei Oak Ridge zu beginnen, bevor die Probleme der Pumpen, der Vernickelung und der Trennwand gelöst waren und als es sogar noch unsicher war, ob diese Probleme überhaupt gelöst werden könnten. Es wurde nicht einmal die Zeit für den Bau und den Betrieb einer Pilotanlage[26] eingeräumt.

Das Gebäude der Anlage, die den Codenamen „K-25“ erhielt, war mit einer Länge von 747 m, einer Breite von 300 m und einer Höhe von 4 Stockwerken das zu der Zeit grösste Gebäude der Welt (Abbildung 59).

Abbildung 59: K-25

Die Anlage enthielt über 3000 Diffusionstanks mit insgesamt über 5 Millionen Trennrohren von etwa 1 Zoll[27] Durchmesser. Jeder Tank entsprach einer Trennstufe. Abbildung 60 vermittelt einen Eindruck von der Grösse der Tanks.

Das ganze riesige System mit den kilometerlangen Leitungen musste perfekt gasdicht sein. Es musste ständig auf einer Temperatur von über 57°C gehalten werden, damit das Uranhexafluorid im gasförmigen Zustand blieb.

Bis eine Kaskade von Tausenden von Trennstufen sich gefüllt hat und in den stationären Betriebszustand gelangt, braucht es eine Anfahrzeit[28], die je nach Grösse der Anlage Wochen bis Monate betragen kann. Zudem ist eine beträchtliche Menge Material in der Anlage als „Inventar“[29] gebunden.

Eine Kaskade kann jedoch auch teilweise in Betrieb genommen werden, d.h. die unteren Trennstufen können bereits angereichertes Uran produzieren, während die oberen Stufen noch im Bau sind. Das wurde bei der Anlage K-25, die erst 1945 fertiggestellt wurde, so gemacht. Während ihres Baus

[26] Eine Pilotanlage ist eine Anlage, mit der eine neue Technik oder eine neue technische Methode, die im Labormaßstab bereits funktioniert, erstmals in einer Grössenordnung erprobt wird, die derjenigen des industriellen Maßstabs vergleichbar ist.

[27] 1 Zoll = 2.54 cm

[28] englisch: *startup time*

[29] englisch: *holdup*

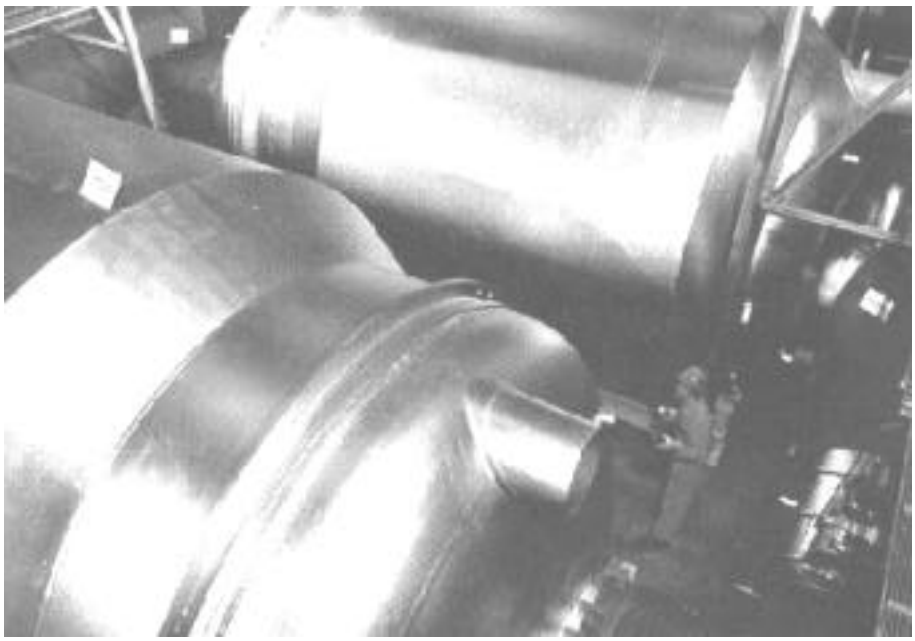

Abbildung 60: Diffusionstanks. Der Arbeiter rechts im Bild liefert einen Grössenvergleich.

produzierte sie Uran, das auf 20 bis 50 % angereichert war. Dieses wurde dann zur Speisung der Y-12-Calutrons verwendet, die dadurch mit einem bedeutend besseren Wirkungsgrad arbeiteten.

Selbst ein kurzeitiger Stromausfall hätte sich für die Gasdiffusionsanlage katastrophal ausgewirkt, und es hätte Monate dauern können, bis die Anlage wieder richtig gearbeitet hätte. Deshalb wurde für die Stromversorgung ein eigenes Dampfkraftwerk gebaut. Im Juni 1943, längst bevor die Spezifikationen der mit Strom zu versorgenden Pumpen bekannt waren, wurde mit dem Bau begonnen, und am 1. März 1944 war der erste Dampfkessel in Betrieb. Das in einer Rekordzeit von nur 10 Monaten fertiggestellte Kraftwerk (Abbildung 62) verfügte über 14 Dampfturbinengeneratoren mit Leistungen zwischen 1500 und 35'000 kW. Die gesamte Leistung betrug 238 MW, was zu jener Zeit ebenfalls ein Rekordwert war.

In den Jahren 1946 bis 1954 wurden in Oak Ridge vier zusätzliche, etwas kleinere Diffusionsanlagen erstellt, K-27, K-29, K-31 und K-33. An zwei anderen Standorten, Paducah (Kentucky) und Portsmouth (Ohio), wurden zwischen 1953 und 1956 acht weitere Anlagen gebaut. Diese Anlagen lieferten auch das schwach angereicherte Uran (3 bis 5 %) für Kernkraftwerke. Heute ist nur noch die Anlage bei Paducah in Betrieb.

8.4 Thermodiffusion

Die Thermodiffusion wurde 1856 von Carl Ludwig (1816–1895) entdeckt und etwa 20 Jahre später von Charles Soret (1854–1904) systematisch untersucht. Sie wird daher auch als Ludwig-Soret-Effekt bezeichnet. Besteht in einer Lösung oder in einem Gasgemisch ein Temperaturgefälle, so ergibt sich auch ein Konzentrationsgefälle. Dabei spielt jedoch nicht nur die thermische Molekularbewegung eine Rolle, sondern der Effekt hängt auch empfindlich von den molekularen Kräften ab. Bei Flüssigkeiten gibt es heute noch kein völliges Verständnis des Effektes. Für eine Mischung von zwei Stoffen lässt sich weder die Stärke noch die Richtung des Effektes voraussagen, d.h. es kann nicht einmal vorausgesagt werden, welche Komponente in Richtung der warmen Fläche wandert.

Bei der technischen Realisierung werden in der Regel vertikale Rohre verwendet, die innen geheizt und aussen gekühlt werden. Bei einer Laborausführung kann zur Heizung ein stromdurchflossener Heizdraht eingesetzt werden, während im grosstechnischen Maßstab ein dampfdurchströmtes koaxiales Rohr verwendet wird. Durch den Temperaturunterschied stellt sich eine Konvektionsströmung ein, und durch die Thermodiffusion bildet sich auch ein Konzentrationsunterschied aus. Abbildung 61 ist eine schematische Darstellung eines Uranisotopentrennrohrs.

Im Fall von Uranhexafluorid wandert das $^{235}UF_6$ gegen das warme Rohr und das $^{238}UF_6$ gegen die kalte Aussenseite. Dadurch wird die Konzentration von ^{235}U am oberen Ende des Rohrs leicht erhöht und am unteren Ende leicht erniedrigt. Das Uranhexafluorid wird bei einer Temperatur von über 60°C und einem Druck von über 1.4 bar verwendet, so dass es sich in flüssigem Zustand befindet.

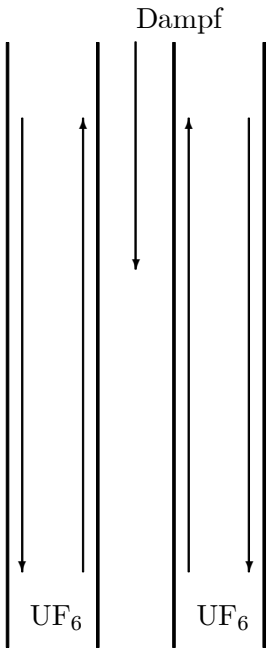

Abbildung 61: Thermodiffusion

Das Thermodiffusionsverfahren war vergleichsweise zwar sehr einfach, wurde aber 1940 vom Uranium Committee wegen seines niederen Wirkungsgrades und enorm grossen Dampfbedarfs nicht weiter in Betracht gezogen. Die Navy, die ja nicht am Manhattan-Projekt beteiligt war, arbeitete jedoch im Hinblick auf Atomantriebe für U-Boote weiter an der Entwicklung dieses Verfahrens.

Als Anfangs Sommer 1944 noch immer keine brauchbare Trennwand für die längst im Bau befindliche K-25-Anlage zur Verfügung stand und die Produktion der Y-12-Anlage immer noch hoffnungslos gering war, machte Oppenheimer den Vorschlag, man könnte eine Thermodiffusionsanlage bauen. Es hatte sich herausgestellt, dass der Wirkungsgrad der Y-12-Anlage enorm anstieg, wenn sie mit schwach angereichertem Uran beliefert wurde, auch wenn der ^{235}U-Gehalt nur wenig höher war als der von natürlichem Uran. Mit einer Thermodiffusionsanlage könnte schwach angereichertes Uran produziert und damit die Calutrons von Y-12 betrieben werden. Damit würden diese in wesentlich kürzerer Zeit ausreichende Mengen von genügend hoch angereichertem Uran liefern.

Groves war sofort überzeugt, dass dies das richtige Vorgehen sei. Er verlangte von der H.K. Ferguson Company in Cleveland, Ohio, in 90 Tagen (d.h. in der Hälfte der Zeit, die optimistisch als notwendig geschätzt worden war) eine Thermodiffusionsanlage zu bauen. Die Firma schaffte das Unmögliche.

Die Anlage mit dem Codenamen „S-50“ wurde neben dem für K-25 gebauten Dampfkraftwerk errichtet und von diesem mit Dampf versorgt. Sie bestand aus 2141 rund 15 m langen Trennrohren. Bereits 69 Tage nach Baubeginn konnte der Betrieb mit 320 Trennrohren aufgenommen werden. Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit Lecks war die Anlage ab Mitte März 1945 in vollem Betrieb und lieferte auf 0.85 % angereichertes Uran.

Ab April 1945 wurden alle drei Anlagen in Serie betrieben. Die Thermodiffusionsanlage S-50 lieferte Uran mit weniger als 2 % Anreicherung für die K-25-Gasdiffusionsanlage. Diese erhöhte die Anreicherung auf 23 %. Damit wurden die Calutrons von Y-12 betrieben, die daraus Uran mit einer Anreicherung von 84 % produzierten.

Abbildung 62: S-5o-Anlage links neben dem Dampfkraftwerk für die K-25-Anlage

8.5 Trenndüsen

Das Trenndüsenverfahren zur Urananreicherung wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe (heute: Forschungszentrum Karlsruhe) in den 1980er Jahren entwickelt. Wegen seines sehr hohen Energieverbrauchs wird es jedoch nicht im grosstechnischen Maßstab eingesetzt.

Ein Gemisch aus Uranhexafluorid und Wasserstoff oder Helium strömt durch eine schlitzförmige Düse mit gekrümmten Wänden. Infolge der Zentrifugalkraft werden die schweren Moleküle mehr gegen die Aussenwand getrieben als die leichten Moleküle. Beim Verlassen des Schlitzes wird der Gasstrom durch einen Keil in zwei Fraktionen geteilt. Durch die Beimischung eines leichten Gases wird die Gasgeschwindigkeit erhöht und damit infolge der grösseren Zentrifugalkraft eine bessere Separation erreicht. Der Trennfaktor liegt zwischen 1.015 und 1.025, also wesentlich höher als bei der Gasdiffusion.

8.6 Laser

Die Laseranreicherung beruht auf der *Isotopieverschiebung*. Die Wellenlängen der Spektrallinien der Atome oder Moleküle verschiedener Isotope des gleichen Elementes sind wegen der unterschiedlichen Kernmasse etwas verschieden. Der Unterschied ist äusserst gering, aber unter günstigen Bedingungen kann er zur Isotopentrennung ausgenützt werden. Die Möglichkeit dazu ergab sich erst, nachdem Laser als sehr schmalbandige Lichtquellen zur Verfügung standen.[30]

Es wird zwischen *atomaren* und *molekularen* Verfahren unterschieden. Beim atomaren Verfahren werden die Atome des einen Isotops selektiv durch einen Laser ionisiert. Die Ionen können sodann leicht mit Hilfe eines elektrischen Feldes von den neutralen Atomen abgetrennt werden. Beim molekularen Verfahren werden erst die Moleküle, die das gewünschte Isotop enthalten, durch einen ersten Laser in einen angeregten Zustand gebracht. Sodann wird durch einen zweiten Laser ein Fluoratom abgespalten. Das dadurch entstehende feste $^{235}UF_5$ kann leicht aus dem Gas UF_6 herausgefiltert werden.

Die anfänglich sehr hohen Erwartungen an die Laseranreicherung sind infolge der Korrosionsprobleme einer gewissen Skepsis in Bezug auf die grosstechnische Realisierbarkeit gewichen. Etliche Forschungs- und Entwicklungsprojekte wurden wieder eingestellt.

[30] Der erste Laser wurde 1960 von Theodore Maiman (1927–2007) gebaut.

9 Erste Kernreaktoren

9.1 Chicago-Pile 1

9.1.1 Bau des Chicago-Pile 1

Für seine Entdeckungen neuer radioaktiver Elemente erhielt Fermi 1938 den Nobelpreis. Bohr teilte Fermi vorzeitig mit, dass er auf der Kandidatenliste für den Nobelpreis stehe. Indem er damit ein sozusagen heiliges Gesetz brach, wollte er Fermi die Möglichkeit geben, die Reise nach Stockholm zur Flucht aus Italien zu benützen und dafür alles Nötige vorzubereiten. Fermis Frau, Laura, war Jüdin, und als im September 1938 die ersten antisemitischen Gesetze eingeführt wurden, beschlossen die Fermis auszuwandern. Fermi schrieb an mehrere amerikanische Universitäten, erhielt auch mehrere Einladungen und nahm eine Professur an der Columbia University in New York an. Ab 1941 arbeitete er am *Metallurgical Laboratory* in Chicago für das Manhattan-Projekt.

Nachdem Fermi und seine Mitarbeiter eine ganze Reihe von Experimenten mit unterkritischen Anordnungen durchgeführt hatten, sollte die Theorie an einer Anordnung überprüft werden, mit der eine selbsterhaltende Kettenreaktion möglich war. Es sollte getestet werden, ob ein kontrollierter Betrieb eines Kernreaktors möglich war, einerseits zur Energieerzeugung, aber andererseits – und in jenem Moment viel wichtiger – zur Produktion von Plutonium. Diese Anordnung wurde *Chicago-Pile 1* oder kurz „CP-1“ genannt,

Da – im Gegensatz zu den bisherigen Anordnungen – ein Multiplikationsfaktor von mehr als eins erreicht werden sollte, mussten alle Neutronenverluste möglichst klein gemacht werden. Das bedeutete erstens, dass die verwendeten Materialien von bisher nie verlangter Reinheit sein mussten. Als Moderator war Graphit vorgesehen. Graphit enthält normalerweise Spuren von Bor. Da Bor Neutronen sehr stark absorbiert, ist eine Verunreinigung des Graphits mit Bor besonders unerwünscht. Bereits seit zwei Jahren hatte Szilard die Graphit-Firmen bestürmt, sie sollten noch reineren Graphit herstellen. Der verlangte Reinheitsgrad war bisher nur bei kleinsten Mengen, wie sie für Spezial-Elektroden gebraucht wurden, erreicht worden. Jetzt sollten 350 Tonnen davon geliefert werden – und das nur für den Testreaktor. Für die geplanten Plutoniumsproduktions-Reaktoren würden Tausende von Tonnen benötigt werden. Auch das Uran musste von bisher nie verlangter Reinheit sein.

Bei den früheren Experimenten hatte sich gezeigt, dass die im Graphit enthaltene Luft ebenfalls einen schädlichen Einfluss hinsichtlich der Neutronenbilanz haben konnte. Es wurde deshalb geplant, den ganzen Pile in eine Ballonhülle einzuschliessen, die dann notfalls luftleer gepumpt werden konnte. Herbert L. Anderson (1914–1988) fuhr zur Firma Goodyear und bestellte einen würfelförmigen Ballon mit 7,6 m Seitenlänge. Die Ballon-Experten der Firma wunderten sich gewaltig, wozu in aller Welt ein würfelförmiger Ballon gut sein sollte. Sie versuchten vergeblich, den unerfahrenen jungen Mann zu überzeugen, dass kugelförmige Ballone aerodynamisch viel besser seien. Auf die Gefahr hin, als völlig stur und uneinsichtig zu erscheinen, musste Anderson darauf bestehen, er wolle einen würfelförmigen Ballon, und durfte um keinen Preis verraten, wofür er ihn brauchte. Er bekam schliesslich seinen würfelförmigen Ballon.

Es sollten auch möglichst wenig Neutronen durch das Entweichen an der Oberfläche verloren gehen. Da eine Kugel bei gegebenem Volumen die kleinste Oberfläche hat, sollte der Pile möglichst kugelförmig sein.

Ursprünglich war als Standort des Testreaktors ein abgelegener Ort 30 km südwestlich von Chicago vorgesehen. Als wegen eines Streiks die Bauarbeiten am Reaktorgebäude für unabsehbare Zeit verzögert wurden, schlug Fermi vor, den Pile in einer Tennishalle unter der Tribüne des Sportplatzes der Universität Chicago aufzubauen. Die Projektleiter wurden ziemlich blass, als ihnen dieser

Vorschlag unterbreitet wurde. Zwar konnte Fermi überzeugend beweisen, dass eine Explosion unmöglich war, aber ein Unfall konnte nicht völlig ausgeschlossen werden. Da so ungeheuer viel auf dem Spiel stand, beschloss der Leiter des Plutoniumprojekts, Arthur Holly Compton (1892–1962), das Risiko einzugehen. Er informierte nicht einmal den Rektor der Universität, denn er fand es nicht richtig, einem Juristen die Verantwortung über eine Entscheidung aufzubürden, die dieser fachlich nicht beurteilen konnte.

Mit dem Bau des Pile wurde am 7. November 1942 unter grösster Geheimhaltung begonnen. Es wurden Graphitziegel aufeinandergeschichtet, die 42 cm lang, 10.5 cm breit und 10.5 cm hoch waren. Da sie in unterschiedlichen Längen geliefert wurden, mussten sie an Ort und Stelle auf das Standardmass zugeschnitten und anschliessend geglättet werden, damit sie völlig nahtlos aneinander passten. Zudem mussten in einen Teil der Ziegel Löcher von 8,25 cm Durchmesser gebohrt werden und andere Ziegel mussten mit Schlitzen versehen werden. Es wurden 40'000 Ziegel zugeschnitten und 22'000 Löcher gebohrt.[31]

Abbildung 63: Eine Graphitziegelschicht des Chicago-Pile 1

In die Löcher wurden die annähernd kugelförmigen Uran- oder Uranoxid-Stücke gelegt, und durch die Schlitze bewegten sich die Kontrollstäbe, mit denen der Multiplikationsfaktor geregelt werden konnte. Als Kontrollstäbe dienten 4 m lange Holzlatten, auf die Kadmiumblechstreifen[32] genagelt worden waren.

Die ganze Anordnung hatte ungefähr die Form eines Ellipsoids (eine „abgeplattete Kugel") von 7,4 m Durchmesser und 6,2 m Höhe. Zur Abstützung der unteren Ziegelschichten diente eine Holzkonstruktion. Es wurde rund um die Uhr in zwei Zwölfstundenschichten gearbeitet. Ab der 11. Schicht wurde nach jeder Schicht der Multiplikationsfaktor bestimmt. Dazu wurde ein Teil der Kontrollstäbe herausgezogen und die Neutronenzahl als Funktion der Zeit gemessen. Fermi berechnete daraus den Multiplikationsfaktor und verglich ihn mit dem nach seiner Theorie erwarteten Wert. Es zeigte sich, dass die Messungen stets bestens mit der Theorie übereinstimmten.

Da während des Baus reinerer Graphit als am Anfang geliefert werden konnte, und zudem nun auch reines Uran statt nur Uranoxid zur Verfügung stand, war der Multiplikationsfaktor höher als ursprünglich berechnet worden war. Es konnten deshalb etwa 20 der 76 geplanten Schichten

[31] Wer je mit Graphit gearbeitet hat, weiss, was das bedeutet: Es wird alles – aber auch wirklich alles – schwarz! Um sich eine Vorstellung zu verschaffen, schärfe man mit der Messerklinge eine Bleistiftspitze, puste den Graphitstaub in die Luft und multipliziere die entstandene Schweinerei mit dem Faktor 10 Milliarden.....

[32] Kadmium absorbiert (wie Bor) Neutronen sehr stark.

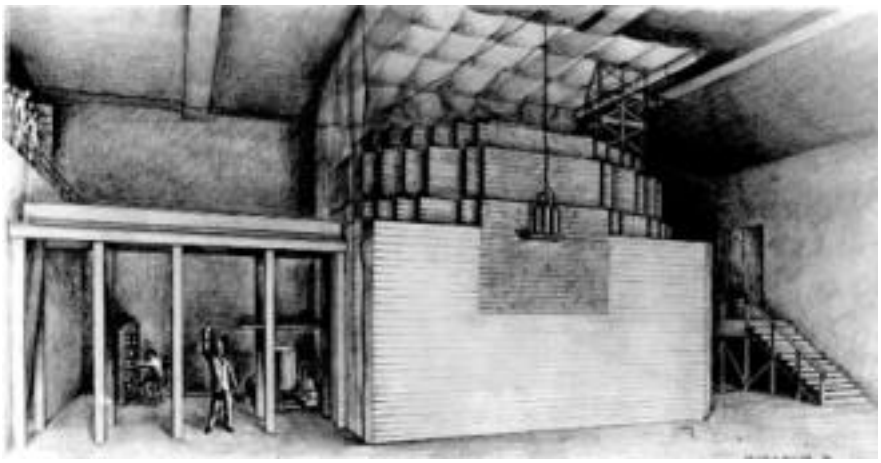

Abbildung 64: Chicago-Pile 1

weggelassen werden (daher die abgeplattete Form), und es konnte darauf verzichtet werden, die Ballonhülle zu verschliessen und die Luft auszupumpen. Am Schluss bestand der Pile aus 350 Tonnen Graphit, 36.6 Tonnen Uranoxid und 5.6 Tonnen metallischem Uran.

9.1.2 Erste selbsterhaltende Kettenreaktion

Am Nachmittag des 1. Dezember konnte Fermi voraussagen, dass in der Nacht die kritische Grösse erreicht werden würde. Bevor Fermi nach Hause ging, nahm er Anderson, dem Teamleiter der Nachtschicht, das Versprechen ab, beim Erreichen der kritischen Grösse darauf zu verzichten, den Reaktor in den kritischen Zustand zu bringen. Als es in der Nacht so weit war, widerstand Anderson der überaus grossen Versuchung, als Erster eine kontrollierte selbsterhaltende Kettenreaktion von Kernspaltungen in Gang zu setzen.

Am 2. Dezember 1942 wurde der Chicago-Pile 1 vorsichtig in kleinen Schritten in den überkritischen Zustand gebracht. Schon bei diesem ersten Kernreaktor waren drei voneinander unabhängige Sicherheitssysteme eingerichtet worden.

Ein Kontrollstab war mit einem Seil an einen Haken gehängt, der von einem Neutronenzähler gesteuert wurde. Wenn die Zahl der Neutronen pro Zeiteinheit einen bestimmten vorgewählten Wert überschritt, gab der Haken das Seil frei, und der Kontrollstab wurde durch ein zweites Seil von einem schweren Gewicht in den Pile hineingezogen. Dieser Sicherheitsstab wurde „ZIP“ genannt.

Ein zweiter Kontrollstab wurde durch ein Seil festgehalten, das am Zuschauerbalkon befestigt war. Ein Physiker stand bereit, dieses Seil im Notfall mit einer Axt zu kappen, worauf dieser Kontrollstab ebenfalls durch ein Gewicht in den Reaktor hineingezogen würde. Dieses „Notabschaltsystem“ wurde „SCRAM“ genannt. SCRAM steht für „Safety Control Reserved Axed Man“. Heute noch wird eine Schnellabschaltung eines Reaktors mit *scram* bezeichnet.

Als weitere Sicherheitsmassnahme standen drei junge Physiker auf einer Plattform über dem Pile mit Kanistern voller Kadmiumsulfatlösung bereit. Wenn die beiden mechanischen Sicherungen versagen sollten, würden sie die Lösung über den Pile giessen und so die Kettenreaktion stoppen.

Das Experiment begann am Vormittag. Kurz nach zehn Uhr liess Fermi alle Kontrollstäbe mit Ausnahme eines Stabes, der zur Steuerung benutzt wurde, herausziehen. Nach einigen Kontroll-

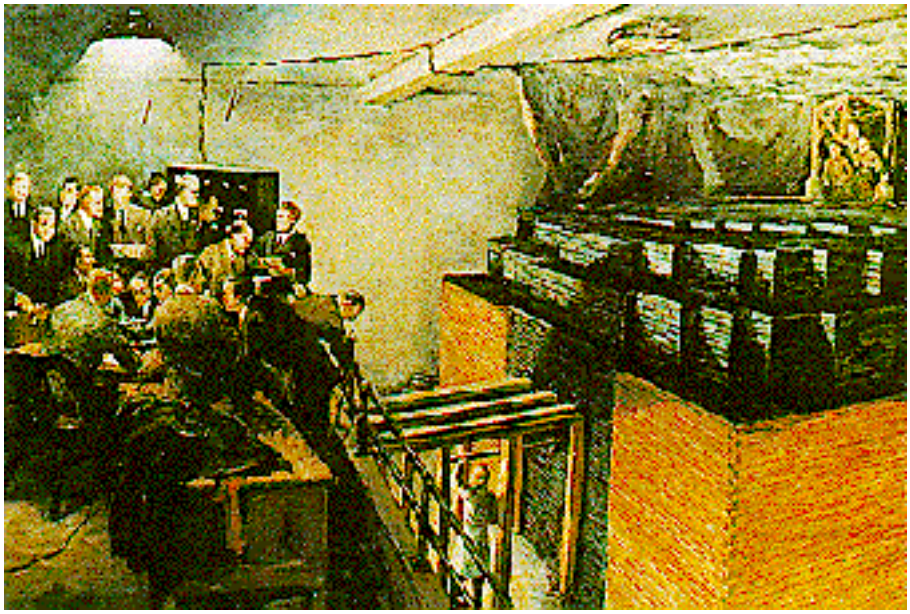

Abbildung 65: Erste selbsterhaltende Kettenreaktion im Chicago-Pile 1

messungen liess Fermi den Steuerstab bis etwa zur Mitte herausziehen, wodurch der Pile nahezu kritisch wurde. Fermi berechnete den Anstieg der Intensität des Neutronenflusses mit seinem kleinen Rechenschieber und sagte voraus, bei welchem Wert die Intensitätskurve abflachen würde. Nach einigen Minuten liess er den Steuerstab um weitere 30 cm herausziehen. Die Kurve stieg weiter an und flachte sich bei einem höherem Wert wieder ab. Fermi wies den Mann am Steuerstab an, den Stab um weitere 15 cm herauszuziehen. Jetzt stieg die Intensität so weit an, dass die Messbereiche einiger Geräte überschritten wurden. Nachdem diese Geräte neu justiert worden waren, wurde der Steuerstab wieder bis zu der vorherigen Position herausgezogen. Die Intensität stieg langsam immer weiter an. Plötzlich gab es einen lauten Knall. Die automatische Sicherung hatte ausgelöst und den ZIP in den Reaktor fallen lassen. Es war halb zwölf, und Fermi sagte: „Ich habe Hunger, gehen wir essen." Alle Stäbe wurden in den Pile eingeschoben und gesichert.

Nach dem Mittagessen, bei dem niemand über das Experiment sprach, wurden um 14 Uhr die Messungen fortgesetzt. Wieder wurde der Steuerstab schrittweise herausgezogen und der Intensitätsanstieg verfolgt. Ständig rechnete Fermi mit seinem Rechenschieber und verglich die Messresultate mit theoretisch erwarteten Werten. Schliesslich sagte er: „Das wird genügen. Jetzt wird es selbsterhaltend werden. Die Kurve wird ansteigen und immer weiter ansteigen. Sie wird nicht mehr abflachen." Das Klicken der Zähler wurde immer schneller, bis es plötzlich verstummte, weil die mechanischen Zählwerke nicht mehr folgen konnten. Die Kurve auf dem Schreiber stieg jedoch unbeirrt immer weiter an, und der Messbereich des Schreibers musste immer wieder umgeschaltet werden.

Fermi verfolgte den Anstieg und arbeitete ohne sichtbares Zeichen von Aufregung mit seinem Rechenschieber. Plötzlich verkündete er: „Die Reaktion ist selbsterhaltend, die Kurve ist exponentiell." Der Multiplikationsfaktor war 1,0006. Die Neutronenintensität stieg immer weiter an, und langsam stieg auch die Spannung der Anwesenden. Sie begannen sich zu fragen, warum man den Pile nicht abschaltete. Fermi war jedoch vollkommen ruhig und wartete eine weitere Minute und dann noch eine. Als die Spannung beinahe unerträglich wurde, befahl er: „Ok, ZIP in!" Es war

15.53 Uhr. Der Mensch hatte zum erstenmal Atomenergie freigesetzt und kontrolliert.

Compton, der seit dem Nachmittag bei diesem entscheidenden Versuch dabei gewesen war, rief von seinem Büro aus Conant an und sagte: „Der italienische Seefahrer ist in der Neuen Welt gelandet." Der Code war nicht abgesprochen worden, aber Conant verstand sofort und fragte: „Wie waren die Eingeborenen?" Compton antwortete: „Sehr freundlich."

Bei diesem ersten Experiment erreichte der Chicago-Pile 1 eine (thermische) Leistung von 0.5 Watt. Am 12. Dezember wurde er bis auf eine Leistung von 200 Watt hochgefahren. Da der Reaktor keine Abschirmung hatte, durfte man wegen seiner Strahlung mit der Leistung nicht höher gehen.

9.1.3 Geheimhaltung

Das Atombombenprojekt wurde so sehr geheimgehalten, dass nicht einmal die Ehefrauen der Physiker eine Ahnung hatten, woran ihre Männer arbeiteten. Anfangs Dezember 1942 lud Laura Fermi die Mitarbeiter ihres Mannes und deren Frauen zu einer grossen Party ein – ohne die geringste Ahnung vom grossen Erfolg des Fermi-Teams zu haben. Als die Türglocke läutete, ging Fermi zur Tür und öffnete. W. Zinn und seine Frau traten ein. Zinn drückte Fermi die Hand und sagte: „Gratuliere!" Fermi antwortete nichts, sondern lächelte nur. Frau Fermi fragte: „Gratulation? Wofür?" Niemand gab ihr Antwort. Fermis führten ihre Gäste ins Wohnzimmer, als wieder die Türglocke läutete. Fermi ging öffnen, und Laura hörte eine Männerstimme sagen: „Gratuliere!" So ging es weiter, bis alle Gäste anwesend waren. Jeder einzelne Mann gratulierte Fermi, der dazu immer nur lächelte. Auf ihre Fragen erhielt Frau Fermi entweder gar keine Antwort oder es wurde ihr erwidert: „Fragen Sie Ihren Mann", „Nichts besonderes. Er ist ein kluger Kerl. Das ist alles.", „Regen Sie sich nicht auf. Sie werden es eines Tages herausfinden." Frau Fermi fand es erst zweieinhalb Jahre später heraus, als ihr Mann ihr ein broschiertes Buch in die Hand drückte. Es war der Smyth-Report, der gerade eben zur Publikation freigegeben worden war (Henry D. Smyth: „A General Account of the Development of Methods Using Atomic Energy for Military Purposes", War Department, später publiziert unter dem kürzeren Titel: „Atomic Energy for Military Purposes"[52]).

9.2 Clinton-Pile

Wenn angenommen wird, dass pro gespaltenem ^{235}U-Kern im Mittel jeweils ein Neutron von einem ^{238}U-Kern eingefangen wird und diesen (nach 2 Betazerfällen) in Plutonium (^{239}Pu) umwandelt, kann leicht berechnet werden, wieviel Plutonium von einem Kernreaktor produziert wird. Damit ein Reaktor 1 kg Plutonium pro Tag produziert, muss er eine thermische Leistung von etwa 1000 MW haben.

Der Schritt von dem kleinen Reaktor CP-1, der mit einer maximalen Leistung von 200 Watt betrieben wurde, zu einem Plutonium-Produktionsreaktor mit einer Leistung von rund 1'000'000'000 Watt war so gross, dass beschlossen wurde, zuerst einen Reaktor mit einer Leistung von 1000 kW zu bauen. Dieser Reaktor erhielt den Codenamen „X-10" und wurde auch als *Clinton-Pile* bezeichnet.

Einerseits konnte der X-10 als Pilotanlage für die grossen Produktionsreaktoren dienen, und andererseits wurde damit bereits Plutonium in Gramm-Mengen produziert. Bisher konnte Plutonium nur durch Bestrahlung von Uran mit Deuteronenstrahlen eines Zyklotrons in Mikrogramm-Mengen erzeugt werden. Zwar konnten damit die Chemiker bereits die chemischen Eigenschaften des Plu-

toniums untersuchen, aber um die metallurgischen Eigenschaften zu bestimmen und Methoden zu finden, die im grosstechnischen Maßstab geeignet waren, um das in einem Reaktor produzierte Plutonium chemisch abzutrennen, waren grössere Mengen erforderlich.

Während in einem Reaktor bei der Verwendung von angereichertem Uran auch gewöhnliches Wasser als Moderator dienen kann, muss für Natururan entweder schweres Wasser oder Graphit als Moderator verwendet werden. Schweres Wasser hat den Vorteil, dass es weniger Neutronen absorbiert als Graphit, aber da in nützlicher Frist weder von angereichertem Uran noch von schwerem Wasser genügende Mengen zur Verfügung standen, kam als Moderator nur Graphit in Frage.

Als Kühlmittel wurden Luft, Helium und Wasser in Betracht gezogen. Helium hat die Vorteile, dass es chemisch äusserst reaktionsträge ist und kaum Neutronen absorbiert. Diesen Vorteilen standen jedoch mehrere Nachteile gegenüber: 1. Das Risiko eines Lecks in einem unter hohem Druck mit Helium gefüllten System und des Entweichens von radioaktiven Spaltprodukten. 2. Die grosse erforderliche Menge des seltenen und teuren Gases. 3. Das Problem, genügend schnell grosse Umwälzgebläse zu erhalten. 4. Die im Vergleich zu Wasser geringe Wärmekapazität.

Wasser ist das wirksamste Kühlmittel, aber hat den Nachteil, dass es Neutronen relativ stark absorbiert und dass Uran von Wasser korrodiert wird. Ein geeignetes Material und ein brauchbares Verfahren zu finden, um die Uranstäbe gasdicht, korrosionsfest und mit einem guten Wärmeübergang einzuschliessen, war ein Problem, dessen erfolgreiche Lösung mehrere Monate dauerte.

Im Februar 1943 wurde in Oak Ridge mit dem Bau des *Clinton-Pile* begonnen. Der Einfachheit halber wurde Luftkühlung gewählt. Der Reaktor bestand aus einem würfelförmigen Graphitklotz mit 7.3 m Kantenlänge, der von einer meterdicken Betonabschirmung umgeben war. In 1248 horizontale durchgehende Bohrungen wurden kurze zylindrische Uranstäbe geschoben, die von Kühlluft umflossen wurden. Nach einer gewissen Betriebsdauer konnten auf der Vorderseite neue Uranstäbe hineingeschoben werden, wodurch die bereits bestrahlten Stäbe auf der Hinterseite herausgeschoben wurden und in ein wassergefülltes Becken fielen.

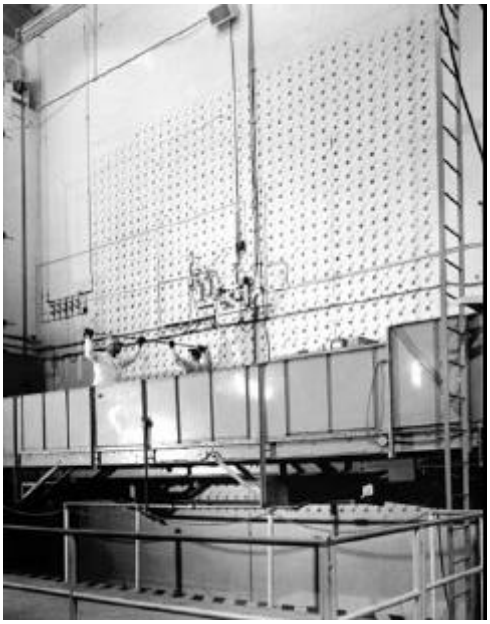

Abbildung 66: X-10. Laden von Uranstäben

Nach nur zehn Monaten Bauzeit wurde der Reaktor am 4. November 1943 in Betrieb genommen. Nach wenigen Tagen konnte die Leistung auf 500 kW hochgefahren werden, und nach einigen Verbesserungen des Kühlsystems wurde die Leistung auf 800 kW erhöht. Im Mai 1944 wurden mit weiteren Modifikationen und Verbesserungen 1800 kW und schliesslich im Juni 4000 kW erreicht, d.h. das Vierfache der ursprünglich geplanten Leistung. Entsprechend gross war natürlich die Zunahme der Plutoniumsproduktion.

Der X-10 war nicht im eigentlichen Sinn eine Pilotanlage für die grossen Plutonium-Produktionsreaktoren, da diese mit Wasser gekühlt wurden, aber mit dem von ihm produzierten Plutonium konnte eine Pilotanlage der grossen chemischen Plutonium-Trennanlage getestet werden.

9.3 Hanford-Reaktoren

Die grossen Plutonium-Produktionsreaktoren wurden bei Hanford am Columbia-River im Südosten des US-Bundesstaates Washington errichtet (s. Karte Seite 124). Ursprünglich waren 5 Reaktoren geplant, aber schliesslich wurden nur 3 davon, die Reaktoren B, D und F, gebaut. Aus Sicherheitsgründen wurden die Reaktoren in Abständen von 8 bis 12 km gebaut.

Die graphitmoderierten und wassergekühlten Reaktoren hatten einen liegenden Graphitzylinder von 11 m Länge und 8.5 m Durchmesser als Reaktorkern, der 2004 durchgehende horizontale Aluminiumrohre enthielt. In diese Rohre wurden 181 Tonnen Uran in Form von mit Aluminium umhüllten Uranstäben geladen. Abbildung 67 zeigt den nach dem Krieg gebauten H-Reaktor, der aber sehr ähnlich aussieht wie die Reaktoren B, D und F.

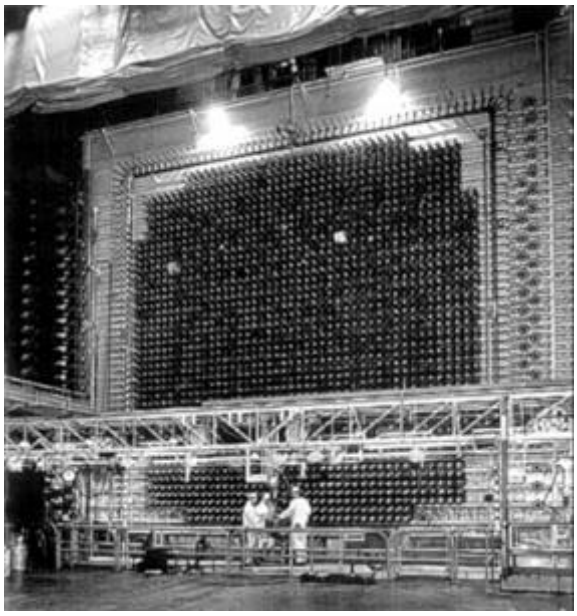

Abbildung 67: H-Reaktor

Die Reaktoren hatten eine thermische Leistung von 250 MW und wurden mit 284'000 Liter Wasser pro Minute gekühlt. Das Wasser wurde durch die Aluminiumrohre gepumpt und umfloss die Uranstäbe.

Am 27. August 1943 wurde mit dem Bau des Reaktors B begonnen, und am 13. September 1944

schob Fermi den ersten Uranstab in den Reaktor. In den folgenden zwei Wochen wurde der Reaktor mit Uran beladen, wobei ständig die Reaktivität gemessen wurde. In der Nacht vom 26. zum 27. September wurde der Reaktor kurz nach Mitternacht kritisch. Am Morgen wurde die Leistung auf 9 MW hochgefahren und auf diesem Wert konstant gehalten. Dann geschah etwas Seltsames.

Abbildung 68: B-Reaktor

Überraschenderweise begann die Reaktivität zu sinken, d.h. um die Leistung konstant zu halten, mussten die Regelstäbe laufend immer weiter herausgezogen werden. Da man ein Leck im Kühlsystem vermutete, wurde der Wasserdruck reduziert und deshalb die Leistung auf 200 kW abgesenkt. Die Reaktivität sank trotzdem immer weiter, worauf der Reaktor ganz abgeschaltet wurde, um nach dem Wasserleck suchen zu können.

In der Nacht blieb die Lecksuche erfolglos, aber die Reaktivität stieg von allein wieder an und um 7 Uhr morgens konnte der Reaktor wieder auf 200 kW hochgefahren werden. Da kein Leck gefunden wurde, kam die Vermutung auf, dass der Reaktor durch einen stark neutronenabsorbierenden Stoff „vergiftet“ wurde. Um diese Hypothese zu testen, wurde die Leistung wieder auf 9 MW erhöht. Prompt wiederholte sich der gleiche Vorgang wie am Tag zuvor. Die Reaktivität nahm stetig ab, und als die Leistung auf 200 kW abgesenkt wurde, nahm die Reaktivität allmählich wieder zu.

Am Morgen des 29. September fand John Archibald Wheeler (1911–2008) die Lösung des Rätsels. Das Spaltprodukt Iod-135 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 6.6 Stunden in Xenon-135, das seinerseits mit einer Halbwertszeit von 9.1 Stunden in Cäsium-135 zerfällt. Xenon-135 hat eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, Neutronen zu absorbieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron von einem ^{135}Xe-Kern eingefangen wird, ist rund 6000 mal grösser als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron einen ^{235}U-Kern spaltet. Wenn nun ein Reaktor mit hoher Leistung betrieben wird, ist die Zahl der Spaltungen pro Zeiteinheit gross, und es entstehen (mit einer Häufigkeit von etwa 6 %) viele ^{135}I-Kerne pro Zeiteinheit. Diese zerfallen in ^{135}Xe, und die Konzentration von ^{135}Xe baut sich über Stunden immer mehr auf. Da das ^{135}Xe Neutronen mit grosser Wahrscheinlichkeit absorbiert, wird die Neutronenbilanz immer schlechter und dementsprechend sinkt die Reaktivität. Wird die Reaktorleistung stark reduziert oder wird der Reaktor ganz abgeschaltet, so sinkt die

Xenon-Produktion oder wird ganz beendet. Das vorhandene ^{135}Xe zerfällt mit einer Halbwertszeit von rund 9 Stunden, wodurch die Neutronenbilanz allmählich wieder besser wird und die Reaktivität wieder ansteigt.

Zum Glück hatten die Ingenieure von DuPont mehr Kanäle im Graphitblock vorgesehen. als gemäss den Berechnungen von Wheeler nötig gewesen wären. Sie hatten befürchtet, dass die Uranstäbe mit doppelten Aluminiumhüllen umkleidet werden müssten, um Korrosion zu verhindern. Damit die durch die zweite Aluminiumhülle erhöhte Neutronenabsorption kompensiert werden könnte, sorgten sie mit den zusätzlichen Kanälen dafür, dass notfalls mehr Uranstäbe geladen werden konnten, als vorgesehen waren.

Nachdem die zusätzlichen Kanäle geladen worden waren, konnte die Reaktivitätsverminderung infolge der Xenonvergiftung kompensiert werden, und der Reaktor konnte seinen Produktionsbetrieb aufnehmen. Am 24. November konnten die ersten bestrahlten Uranstäbe herausgestossen werden. Wären die DuPont-Ingenieuere nicht so vorsichtig gewesen, hätte ein neuer Reaktor gebaut werden müssen, und das Plutonium-Projekt wäre etwa um ein Jahr statt um zwei Wochen verzögert worden.

Der Reaktor D startete seinen Betrieb im Dezember 1944, und der Reaktor F nahm im Februar 1945 den Betrieb auf. Nach dem Krieg wurden eine ganze Reihe weiterer Plutoniumproduktions-Reaktoren gebaut, zum Teil in Hanford und zum Teil am Savannah-River in South-Carolina.

Abbildung 69: T-Plant

Durch das Hineinschieben neuer Uranstäbe an der Vorderfront des Reaktors wurden auf der Hinterseite die zuerst geladenen und inzwischen hochradioaktiv gewordenen Stäbe herausgeschoben und fielen in einen wassergefüllten Behälter. Sodann wurden sie mit einem ferngesteuerten Schienenfahrzeug zu einem 8 km entfernten Lagerbecken gefahren. Nachdem die Radioaktivität der kurzlebigen Spaltprodukte genügend abgeklungen war, wurden die Stäbe zu einer chemischen Trennanlage weitertransportiert. Es gab zwei solche Anlagen, die *B-Plant* und die *T-Plant*. Die Gebäude der Trennanlagen waren 244 m lang, 20 m breit und 24 m hoch. Im Innern befanden sich 40 Betonzellen, in denen die chemischen Prozesse zur Abtrennung des Plutoniums von den Spaltprodukten und vom noch nicht abgebrannten Uran durchgeführt wurden. Alle Operationen mussten mit Hilfe von Fernmanipulatoren durchgeführt werden, da das Innere des Gebäudes wegen der intensiven Strahlung praktisch kaum noch zugänglich war. Damit wurde – wie in so vielen Bereichen des Manhattan-Projekts – technisches Neuland beschritten.

10 Atomantriebe: Utopien und Realitäten

Während Atomenergie heute bei vielen Menschen masslos übertriebene Ängste bewirkt, wurden in den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts ebenso übertriebene Erwartungen in die Atomenergie gesetzt. Es war eine weitverbreitete Meinung, dass in unmittelbarer Zukunft nicht nur Schiffe, sondern auch Lokomotiven, Flugzeuge, Raketen und sogar Autos mit „Atomantrieb“ versehen werden könnten. Zukunftsprognosen haben oft die unangenehme Eigenschaft, dass sie sich als falsch erweisen. Viele technische Fortschritte entwickeln sich genau so wie vorausgesagt, aber manche kommen erst viel später und wieder andere bleiben vielleicht für immer Phantasie. Andererseits gibt es in der Wissenschaft und in der Technik aber auch immer wieder überraschende Entwicklungen, die von niemandem vorausgesehen wurden.

10.1 Atomkraftwerke

Kraftwerke, die mit Hilfe von „Atomenergie“ elektrischen Strom produzieren, wurden erstaunlich schnell Realität. Nachdem am 2. Dezember 1942 im *Chicago-Pile 1* zum erstenmal „Atomenergie“ freigesetzt wurde, lieferte nur 10 Jahre später bereits das erste richtige Kernkraftwerk in Obninsk bei Moskau 5 Megawatt elektrische Leistung. 1956 ging in Grossbritannien das Kraftwerk *Calder Hall* als erstes kommerzielles Kernkraftwerk in Betrieb. Es lieferte 50 Megawatt elektrische Leistung. Ein Jahr später wurde in den USA das Kernkraftwerk *Shippingport* in Betrieb gesetzt, das 60 MW elektrische Leistung lieferte. Das erste Kernkraftwerk in Deutschland nahm 1961 in Kahl am Main mit 15 MW elektrischer Leistung den Betrieb auf. In der Schweiz wurde 1969 das erste Kernkraftwerk, *Beznau I* (350 MW elektrische Leistung), in Betrieb genommen. 1971 folgten *Beznau II* (350 MW), 1972 *Mühleberg* (320 MW), 1979 *Gösgen* (920 MW) und 1984 *Leibstadt* (990 MW)[33].

Ein Reaktor besteht aus folgenden wesentlichen Komponenten: Brennstoff, Kühlmittel und (bei einem thermischen Reaktor[34]) Moderator. Für jede dieser Komponenten existiert eine grosse Anzahl möglicher Materialien. Jede mögliche Kombination hat ganz bestimmte Vor- und Nachteile. Nur ein kleiner Bruchteil aller Kombinationsmöglichkeiten ist technisch realisiert worden.

Die Wahl eines Reaktorsystems hängt in erster Linie vom Verwendungszeck ab. Es gibt ausser Reaktoren zur Energieerzeugung solche zur Isotopenproduktion (u.a. Waffenplutonium), Forschungsreaktoren, Testreaktoren für Materialuntersuchungen in hohen Neutronenflüssen und Trainingsreaktoren zur Ausbildung von Reaktoroperateuren. Im folgenden sollen die wichtigsten Typen der Reaktoren zur Energieerzeugung kurz erwähnt werden.

Leichtwasserreaktoren. Bei Leichtwasserreaktoren dient normales („leichtes“) Wasser als Moderator und als Kühlmittel. Als Brennstoff wird Uran mit einer Anreicherung von typischerweise 3 bis 4 % Uran-235 verwendet. Bei einem *Siedewasserreaktor* verdampft das Kühlwasser im Reaktor, und der produzierte Dampf treibt die Turbinen.

Abbildung 70 zeigt (sehr!!) schematisch das Prinzip eines Kernkraftwerks mit *Druckwasserreaktor*. Im Primärkreislauf zirkuliert das Wasser unter so hohem Druck, dass es auch bei 330°C noch flüssig ist. Es strömt durch den Reaktor, in dem es gleichzeitig als Moderator und als Kühlmittel dient,

[33] Bei allen schweizerischen KKWs konnte die Leistung erhöht werden. Die heutigen Leistungen sind: Beznau I und II 365 MW, Mühleberg 350 MW, Gösgen 970 MW, Leibstadt 1165 MW.

[34] In einem thermischen Reaktor werden die Kernspaltungen hauptsächlich durch thermische Neutronen ausgelöst. Thermische Neutronen sind Neutronen, deren mittlere kinetische Energie gleich der mittleren Energie der umgebenden Atome und Moleküle ist.

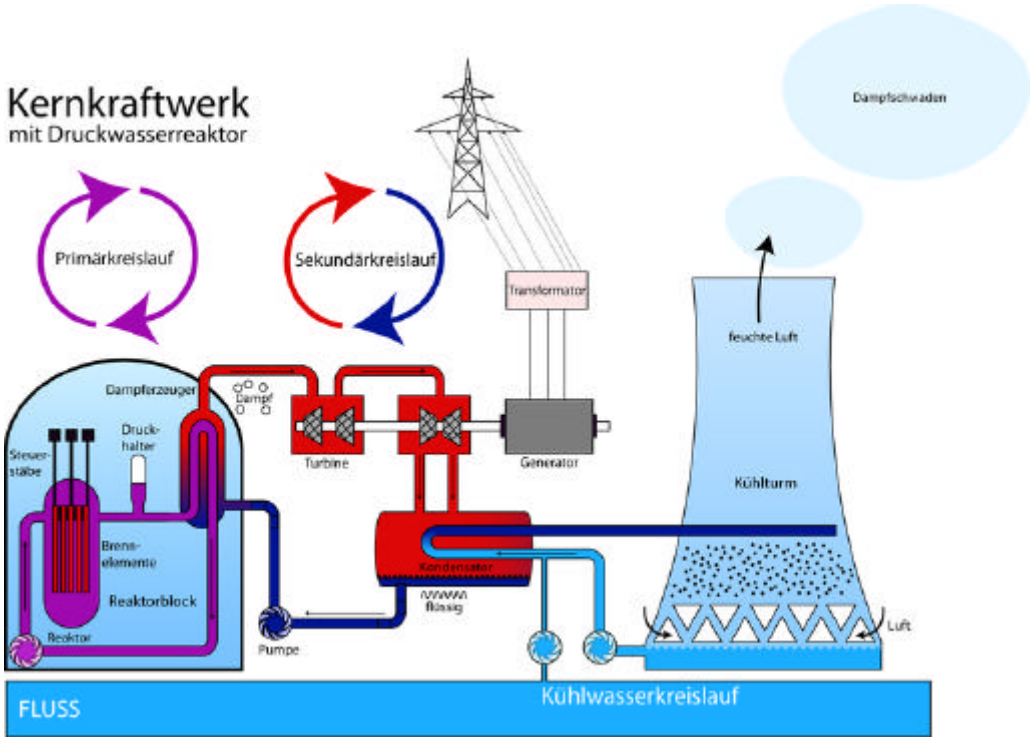

Abbildung 70: Prinzipschema eines Kernkraftwerks

wird dort erwärmt und gibt die Wärme im Dampferzeuger an das Wasser des Sekundärkreislaufes ab. Dieses Wasser steht unter einem niedrigeren Druck, so dass es verdampft. Der Dampf treibt die Dampfturbinen an, die ihrerseits den Generator antreiben. Hinter den Dampfturbinen kondensiert der Dampf im Kondensator bei tiefem Druck zu Wasser. Dieses wird durch die Speisewasserpumpe wieder zum Dampferzeuger gefördert. Die bei der Kondensation des Dampfes freiwerdende Wärme wird entweder direkt an den Fluss oder über einen Kühlturm abgegeben.

Schwerwasserreaktoren. Bei einem Schwerwasserreaktor dient schweres Wasser als Moderator, während als Kühlmittel schweres oder leichtes Wasser verwendet wird. Wegen der geringeren Neutronenabsorption des schweren Wassers kann Natururan als Brennstoff benützt werden, d.h. auf die energieaufwändige und teure Urananreicherung kann verzichtet werden. Nachteilig sind jedoch der relativ hohe Preis des schweren Wassers und die höheren Baukosten, da wegen der niedrigeren Uran-235-Konzentration die Reaktoren grössere Abmessungen aufweisen als Leichtwasserreaktoren gleicher Leistung.

Gasgekühlte Reaktoren. Als Moderator dient Graphit und als Kühlmittel wird Kohlendioxid oder (bei den *Hochtemperaturreaktoren*) Helium verwendet.

Leichtwassergekühlte, graphitmoderierte Reaktoren. Als Moderator dient Graphit und als Kühlmittel Wasser. Der russische RBMK-1000 ist ein graphitmoderierter Siedewasser-Druckröhrenreaktor. Wegen einer ganzen Reihe von sicherheitsrelevanten Nachteilen wurde dieser Reaktortyp im Westen nie gebaut. Der katastrophale Unfall des Reaktorblocks 4 im Kernkraftwerk Tschernobyl ist darauf zurückzuführen, dass mit diesem in gewissen Betriebsbereichen inhärent instabilen Reaktor ein unverantwortliches Experiment durchgeführt wurde (d.h. es war *kein Betriebsunfall.*).

Schnelle Brüter. In einem *Brutreaktor* wird nicht nur Energie erzeugt, sondern es wird zugleich

neues spaltbares Material produziert. Durch Neutroneneinfang entsteht aus dem nichtspaltbaren[35] Isotop Uran-238 nach zwei Betazerfällen das spaltbare Isotop Plutonium-239. Ein Brutreaktor im engeren Sinn produziert mehr neuen Spaltstoff, als er für seinen Betrieb verbraucht. Für langsame Neutronen ist die Wahrscheinlichkeit relativ hoch, dass sie von Uran-235 oder Plutonium-239 eingefangen werden, ohne eine Spaltung zu bewirken. Da deshalb nur noch wenig überschüssige Neutronen für die Brutreaktion zur Verfügung stehen würden, sind Reaktoren, die ohne Moderator (also mit schnellen Neutronen) arbeiten, als Brüter besser geeignet. Ein „schneller Brüter“ ist also nicht irgendwie „schneller“ als ein anderer Reaktor, sondern er heisst so, weil er mit schnellen Neutronen arbeitet. Da für das Isotop Uran-233 die Wahrscheinlichkeit einer Spaltung bei der Absorption eines langsamen Neutrons höher ist als für Uran-235 und Plutonium-239, ergibt Uran-233 eine bessere Neutronenbilanz und ist als Brennstoff für einen *thermischen Brüter* geeignet. Als Brutstoff könnte Thorium verwendet werden. Durch Neutroneneinfang wird aus Thorium-232 das Isotop Thorium-233, aus dem nach zwei Betazerfällen das Isotop Uran-233 entsteht.

Ende 2007 waren weltweit 444 Kernkraftwerke in Betrieb und 34 im Bau. In 13 Ländern sind weitere 83 KKW projektiert. Die überwiegende Mehrzahl der Kernkraftwerksreaktoren sind Druckwasserreaktoren. Ende 2006 waren 264 Druckwasserreaktoren, 93 Siedewassereaktoren, 42 Schwerwasserreaktoren, 18 gasgekühlte Reaktoren, 16 RBMK (!) und 2 schnelle Brüter in Betrieb.

10.2 Atomautos

1955, also vor mehr als 50 Jahren, erschien in der November-Ausgabe der Zeitschrift *hobby* [36] ein Artikel von Ernst Behrendt mit dem Titel „So leben wir 1975“. Darin wurden unter anderem die Verkehrsmittel der Zukunft beschrieben:

Abbildung 71: Zukunftsvision eines Atomautos für das Jahr 1975 (*hobby*, November 1955)

Darüber, wie die Verkehrsmittel der Zukunft angetrieben werden, scheinen sich die

[35] Genauer gesagt: für eine selbsterhaltende Kettenreaktion nicht geeigneten
[36] „*hobby*. Das Magazin der Technik“, EHAPA-Verlag, Stuttgart

> Konstrukteure der Gegenwart einig zu sein. Der Benzin-Kolben-Motor, ist soweit man erkennen kann, fast verschwunden. Sicher gibt es noch irgendwo in einer verschlafenen Provinz ein paar Dieselmotoren, aber in der grossen Welt hat sich der Turbinenantrieb längst durchgesetzt. Da die Atomkraft bereits seit geraumer Zeit zur Elektrizitätserzeugung gebändigt ist, wird man sie wohl auch zum Antrieb von Autos benutzen können. [...] Zumindest über die äussere Form des Atomautos werden uns genaue Einzelheiten mitgeteilt. Bei einem besonders schnittigen Modell 1975 handelt es sich um einen eleganten Zweisitzer mit Heck- Atomantrieb; die Sitze befinden sich dicht hinter den Vorderrädern, und eine Kühlerhaube gibt es nicht mehr, so dass der Fahrer nahezu unbeschränkte Sicht hat.
>
> [...] Das Wesentliche bei einem Atomauto ist jedoch nicht das Aussehen. Das Wesentliche ist der Antrieb. Alle Probleme, die einer Verwendung von Atomkraft für kleinere Fahrzeuge heute noch im Wege stehen, hofft man bis 1975 zu überwinden. Erstens wird es möglich sein, eine kleine, kompakte Atomanlage zu bauen, die nicht, wie man annehmen möchte, im Wagen, sondern unter dem Wagen installiert werden kann. Zweitens wird es hoffentlich möglich sein, die Atomanlage so abzuschirmen, dass Menschen nicht gefährdet werden, dabei aber den Schutzmantel verhältnismässig leicht zu gestalten. Die Umwandlung von Kernenergie in elektrische Energie findet möglicherweise direkt statt, und nicht über den energiewirtschaftlich kostspieligen und umständlichen Umweg Wärme – Wasser – Dampfturbinen – Strom. Vielmehr wird die aus Kernenergie erzeugte elektrische Energie direkt dazu benützt, die verschiedenen, an den einzelnen Achsen angebrachten elektrischen Motoren zu treiben.

Heute, sogar mehr als 50 statt nur 20 Jahre nach diesen Prognosen, gibt es noch immer keine „Atomautos“, und die Möglichkeit eines Atomantriebs für Strassenfahrzeuge wird – auch für die ferne Zukunft – nicht einmal mehr in Betracht gezogen. Die „Probleme, die einer Verwendung von Atomkraft für kleinere Fahrzeuge heute noch im Wege stehen“ sind eben nicht einfach nur technische Probleme, sondern beruhen auf physikalischen Gesetzmässigkeiten. Nach heutigem Wissen sind sowohl Fissions- als auch Fusions-Reaktoren nicht unter bestimmten Mindestgrössen funktionsfähig. Diese Grössen liegen aber weit über dem, was sich in einem Strassenfahrzeug normaler Dimensionen realisieren lässt. Auch für die Abschirmung der Strahlung eines Kernreaktors gelten physikalische Gesetze, die von keinem neuen, noch unbekannten Material umgangen werden könnten. Es wird kein „Plastik“ geben, das eine gleiche Abschirmwirkung hat, wie eine zehn- oder gar hundertmal dickere und schwerere Blei- oder Betonabschirmung.

Der Einsatz von „Atommotoren“ wurde sehr viel realistischer beurteilt in dem 1956 erstmals erschienen Buch „Gigant Atom“ [6]:

> Das Prinzip des Atommotors ist vorläufig das gleiche wie das der Kraftwerke: Die durch Kernspaltung erzeugte Wärme wird auf dem Umweg über Turbinen in Antriebsenergie umgewandelt. So leicht auch das Prinzip erklärt ist, seine praktische Nutzbarmachung stösst auf sehr viele Schwierigkeiten. Eines der Probleme besteht darin, dass man vorerst solche Motoren nicht so klein bauen kann, wie es für manche Aufgabe wünschenswert wäre. Jeder Kernreaktor muss eine bestimmte Mindestgrösse haben, wenn eine sich selbst unterhaltende Kettenreaktion mit genügender Wärmeentwicklung zustande kommen soll. Die Grösse der Atommotoren erfordert daher Verkehrsmittel von enormem Umfang. Folglich lässt sich nach den bisherigen Erfahrungen und nach dem augenblicklichen Stand der Technik der Atommotor für kleine Verkehrsmittel (zum Beispiel Autos, Eisenbahnen normalen Formats, kleine Schiffe usw.) nicht verwenden. Aber es darf dabei nicht vergessen werden, dass wir hier erst am Anfang einer Entwicklung stehen, die

> uns täglich neue Überraschungen und Lösungen bringen kann. Es gibt aber noch einen anderen Grund, der bisher nur Atommotoren grosser Dimensionen gestattet. Genauso wie bei den Reaktoren in den Laboratorien und Kraftwerken, braucht man natürlich auch für die Reaktoren der Atommotoren einen entsprechend umfangreichen und schweren Strahlungsschutz. Man rechnet zur Zeit mit einem Gewicht der Abschirmung von 100 Tonnen je Kubikmeter Reaktorinhalt.

Selbst wenn diese Probleme lösbar wären, ist aber aus heutiger Sicht ein Strassenfahrzeug mit einem Kernreaktor völlig undenkbar. Durch keinerlei technische Sicherheitseinrichtungen liesse sich die Furcht überwinden, dass es bei einem Verkehrsunfall zu einer katastrophalen Freisetzung von Radioaktivität kommen könnte. Falls nicht doch eines Tages eine ganz neue Methode entdeckt wird, mit welcher Kernenergie – zum Beispiel durch Fusion – in einem kleinen kompakten Gerät genutzt werden kann, ohne dabei starke Strahlung und radioaktive Abfälle zu produzieren, wird das Atomauto wohl für immer eine Utopie bleiben.

10.3 Atomlokomotiven

Im oben zitierten Abschnitt aus dem Buch „Gigant Atom“ wird erklärt, dass sich „Atommotoren“ wegen ihrer Grösse nicht für kleine Verkehrsmittel verwenden lassen. Als Beispiel werden unter anderem Eisenbahnen *normalen Formats* genannt. Der Atomantrieb wird dagegen für neue *Grossraumbahnen* in Betracht gezogen:

> Zu Lande wird das Schwergewicht in nächster Zukunft bei der Weiterentwicklung der Eisenbahn liegen. Sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus technischen Gründen kann es sich kaum darum handeln, für die bereits bestehenden Linien und vorhandenen Dimensionen des rollenden Materials den Atomantrieb einzuführen, sondern darum, neue, grössere Bahnen zu entwickeln, die auf eigenen Linien verkehren. [...] Der Grossraumverkehr mit Atomlokomotiven wird sich daher auf transkontinentalen Fernlinien abspielen, für die in den bereits vorliegenden Projekten eine Spurweite von 4,5 Metern als wahrscheinlich am günstigsten errechnet wurde – also rund das Dreifache unserer Normalspur.

1957 erschien in der Juni-Ausgabe der Zeitschrift *hobby* ein Artikel von Gerhard Walter unter dem Titel „Superzüge rasen durch die Taiga“, in dem ein solches Projekt beschrieben wurde.

Diese Superzüge sollten mit einer (für damalige Verhältnisse sensationellen) Geschwindigkeit von 200 km/h fahren und Güterwagen mit einer Nutzlast von 1600 Tonnen befördern. Die Personenwagen sollten eine Einrichtung haben,

> ...wie sie heute nur auf Schiffen möglich ist: also zahlreiche in einem mehrstöckigen Aufbau untergebrachte Einzelabteile, geräumige Aufenthaltsräume, Kinos, Bäder usw.

Vermutlich hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen ist es bis heute nie zum Bau einer derartigen Bahn gekommen. In den westlichen Ländern ist heute eine Atomlokomotive aus den gleichen Gründen undenkbar, aus denen Atomautos inakzeptabel erscheinen. Jedoch bereits im Juliheft 1954 stellte *hobby* ein amerikanisches Projekt einer Atomlokomotive für Normalspur vor. Die X-12 mit einem Gewicht von 360 Tonnen und einer Länge von 49 Metern sollte eine Leistung von 7000 PS

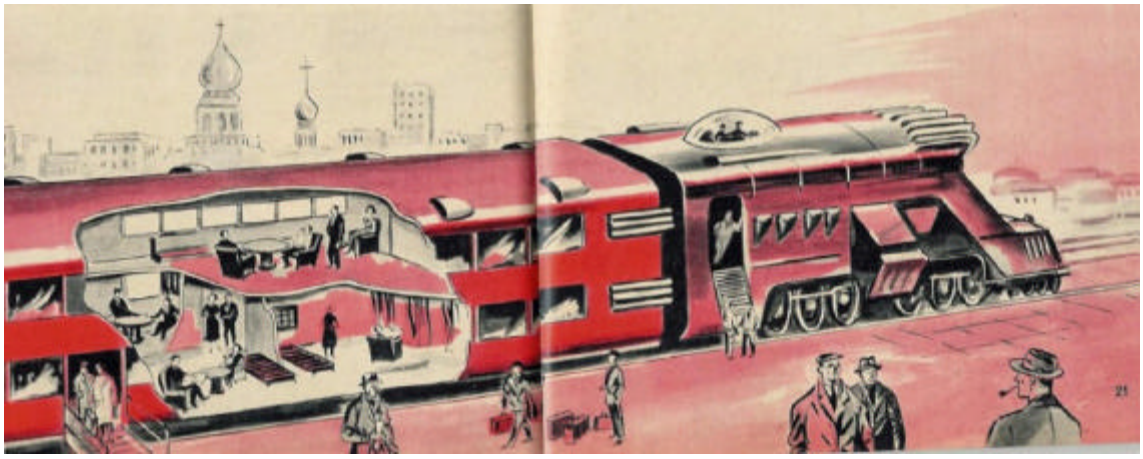

Abbildung 72: Superzug mit Atomlokomotive, Spurweite 4.5 m (*hobby*, Juni 1957)

(5.15 MW) erbringen. Die Probleme der Abschirmung und der Sicherheit wurden folgendermassen erläutert:

> Wie aber lässt sich die starke Radioaktivität des Aggregats dieser Zugmaschine so gut abschirmen, dass das Zugspersonal und die Passagiere – und auch die Reisenden, die auf den Bahnsteigen warten – nicht gefährdet werden? Daran scheiterten bisher alle Projekte, die sich mit der Konstruktion von Atomlokomotiven befasst hatten. Schon im Jahr 1950 veröffentlichte eine Arbeitsgemeinschaft der Universität Princeton einen Studienbericht, in dem es hiess, die Abschirmung dieser tödlichen Strahlen würde mindestens 100 t an Material erfordern, was nach ihrer Ansicht bei den räumlichen Begrenzungen einer Lokomotive praktisch undurchführbar war. Und nun ist es beim Entwurf der X-12 gelungen, 200 Tonnen Abschirmmaterial, also genau das Doppelte, in den engen Bauch der Lok zu zaubern! Das ist nur möglich, weil man recht ausgefallene Ausrüstungselemente wie z.B. den sogenannten „Dachshund"-Generator mit 2,5 m langen Rotoren vorsieht, die sich in Kammern von nur 60 cm Breite unterbringen lassen. Dadurch kann der Reaktor in einem massiven Abschirmblock ruhen, der 1,20 m stark ist und im ganzen 3 x 4,5 x 4,5 m misst. Er wird aus verschiedenen Metallschichten bestehen, die die Gammastrahlen in Schach halten, sowie aus einem neutronenhemmenden wasserstoffhaltigen Material – Wasser, Paraffin oder Kunststoff. Und welche Sicherheitsvorkehrungen lassen sich treffen, damit bei einem Zugsunglück nicht die radioaktiven Materialien ausfliessen oder blossgelegt werden? Zunächst werden die übereinanderliegenden Materialschichten der starken Abschirmvorrichtung dafür sorgen, dass bei einem Zusammenstoss die Trümmer der Lokomotive nicht von der radioaktiven Flüssigkeit bespritzt werden; sollten selbst einige Schichten der Abschirmung Schaden erleiden, so würden bestimmt andere intakt bleiben. Sodann würde ein Aufprall den Reaktor automatisch abschalten. Die Steuerstäbe sind in einem Winkel von 60° montiert, und jede Befestigungsstelle ist mit einem Abscherbolzen oder einem schwachen Glied ausgestattet. Bei einem Aufprall, der über ein Fünftel der normalen Schwerkraft hinausgeht, brechen die Bolzen, und die Schwerkraft besorgt den Rest. Aus der zurückgezogenen Lage fallen die Steuerstäbe in das Zentrum des Reaktors zurück und stoppen die Kettenreaktion.

10.4 Atomflugzeuge

Ebenfalls vor etwas mehr als 50 Jahren erschien in der Zeitschrift *hobby* (Juni 1955) ein Artikel von Kenneth W. Gatland mit dem Titel „Atom-Flugzeug keine Utopie mehr“. In diesem Artikel wurden die technischen Schwierigkeiten, die bei der Verwirklichung eines mit Atomenergie angetriebenen Flugzeuges zu überwinden wären, durchaus realistisch beschrieben.

Abbildung 73: Titelbild von *hobby*, Juni 1955

> Gewaltige Schwierigkeiten sind noch zu überwinden – das steht ausser Zweifel. Doch die Grundlagenforschung ist heute so weit fortgeschritten, dass mit den Planungsarbeiten für ein atomgetriebenes Flugzeug begonnen werden kann. [...] Angesichts der Tatsache, dass das Projekt von militärischen Stellen gefördert wird, die Langstreckenflugzeuge mit hoher Geschwindigkeit benötigen, werden die Motoren wahrscheinlich als Turbo-Luftstrahltriebwerke ausgebildet. Es erscheint jedoch nicht ausgeschlossen, dass die ersten Atomflugzeuge oder wenigstens die ersten Versuchsmodelle mit Propeller-Turbo-Luftstrahltriebwerken ausgerüstet werden, die leichter zu konstruieren und möglicherweise von Dampfturbinen angetrieben sind, die ihrerseits durch Brennerwärme gespeist werden. Gewiss ist jedenfalls, dass das Atomflugzeug sehr schwer sein wird, vielleicht schwerer als die vollbeladene „Brabazon“, also etwa 135 Tonnen.

Bereits 1946 wurde in den USA von der US Air Force das NEPA-Projekt[37] gestartet, das ab 1951 zusammen mit der AEC[38] als ANP-Programm[39] weitergeführt wurde.

Es wurden zwei Entwicklungslinien verfolgt. General Electric arbeitete ab 1951 am Konzept eines direkten, offenen Systems. Dabei wurde die Luft nach dem Kompressor des Strahltriebwerks direkt durch den Reaktorkern geleitet, dort erhitzt und dann wieder vor der Turbine ins Strahltriebwerk zurückgeführt. Ab 1953 arbeitete Pratt & Whitney an einem indirekten, geschlossenen System.

[37] NEPA: Nuclear Energy for the Propulsion of Aircraft (Kernenergie für den Antrieb von Flugzeugen)
[38] AEC: Atomic Energy Commission (Atom-Energie-Kommission)
[39] ANP: Aircraft Nuclear Propulsion (Flugzeug-Nuklear-Antrieb)

Dabei wurde die vom Reaktor produzierte Wärme durch einen separaten Flüssigmetall-Kreislauf abgeführt und über einen Wärmeaustauscher an die Luft des Strahltriebwerks abgegeben.

Beide Systeme hatten ihre Vor- und Nachteile. Der mit geschmolzenem Metall gekühlte Reaktor konnte dank des besseren Wärmeübergangs wesentlich kompakter gebaut werden, als der luftgekühlte Reaktor. Damit wurden auch die benötigten Abschirmungen kleiner und dementsprechend leichter. Diese Gewichtseinsparung wurde aber weitgehend durch das Gewicht des komplexen und schweren Flüssigmetall-Kreislaufs aufgehoben. Das offene System hatte den Nachteil, dass bedeutend mehr Radioaktivität in die Atmosphäre abgegeben wurde, weil die Luft der Triebwerke direkt durch den Reaktorkern strömte. Weil das offene System aber einfacher zu entwickeln war und zudem einen zeitlichen Vorsprung hatte, führte es schliesslich zu erfolgreichen Standversuchen, während das indirekte System nie so weit gelangte.

Für die Standversuche wurde das General-Electric-Strahltriebwerk J47 modifiziert und mit X-39 bezeichnet. Auf einem Testgelände in Idaho wurden ab 1955 die „Heat Transfer Reactor Experiments“ (HTRE) Nr. 1 bis 3 durchgeführt, wobei verschiedene Reaktorkerne getestet wurden. Dabei wurden vom Reaktor jeweils zwei X-39-Triebwerke mit Wärme versorgt. Bei HTRE-3 wurde genügend Schub produziert, um theoretisch einen Flug mit 740 km/h über 48’000 km zu ermöglichen.

1959 erschien im März-Heft der Zeitschrift *hobby* ein Artikel mit dem Titel „Atomrakete – Schlüssel zum Weltraum“. Eines der darin enthaltenen Bilder zeigt jedoch nicht, wie die Bildlegende behauptet, eine „Atomrakete“, sondern offensichtlich zwei Turbinenstrahltriebwerke, die durch einen Reaktor betrieben werden (Abbildung 74). Die Abbildung zeigt zweifellos eines der HTRE. Im dritten und vierten Satz der Bildlegende wird – wieder durchaus richtig – festgestellt: „Die angesaugte Luft wird statt in einer Verbrennungskammer im Reaktor erhitzt. Die Abgase werden über eine Turbine geleitet.“

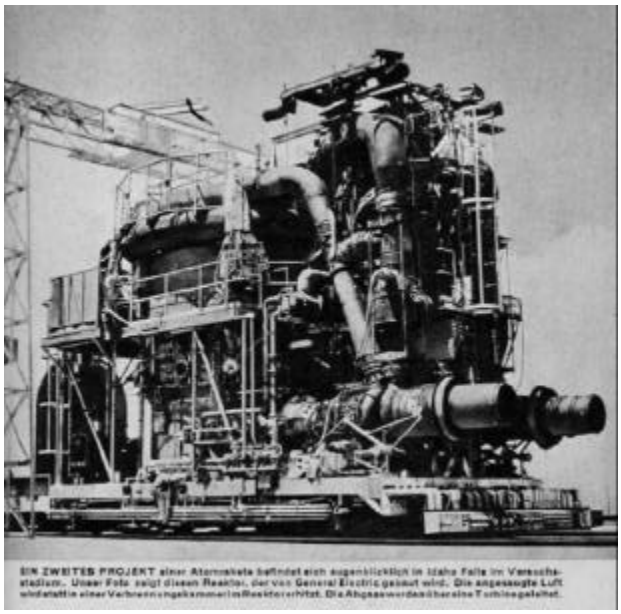

Abbildung 74: Keine „Atomrakete“, sondern zwei Strahltriebwerke J47, die von einem Reaktor betrieben werden

Die X-39 waren in Wirklichkeit Hybrid-Triebwerke. Die Brennkammern waren nicht entfernt worden, so dass das Triebwerk auch wie ein normales Strahltriebwerk laufen konnte. Das Triebwerk

wurde auf diese Weise gestartet, und während der Reaktor auf die richtige Betriebstemperatur hochfuhr, wurde die Brennstoffzufuhr allmählich gedrosselt und schliesslich ganz abgeschaltet. Diese beiden Betriebsarten wären auch beim geplanten Flugzeug zum Einsatz gekommen. Für Start und Landung wären die Triebwerke mit normalem Brennstoff betrieben worden und erst in grosser Höhe wäre für den Reiseflug auf den Reaktorbetrieb umgeschaltet worden. Auch im Zielanflug oder wenn der Bomber angegriffen worden wäre, hätte das Umschalten der Triebwerke auf chemischen Brennstoff eine höhere Geschwindigkeit und eine erhöhte Manövrierbarkeit erlaubt, da die Triebwerke im Reaktorbetrieb relativ träge auf geforderte Leistungsänderungen reagiert hätten.

Wegen des grossen Gewichts des Atomreaktors und der erforderlichen Abschirmungen musste das Atomflugzeug zwangsläufig sehr gross sein. Es war daher beabsichtigt, zwei B-36H für den Betrieb mit dem Reaktor umzubauen. Diese modifizierten Flugzeuge hätten die Bezeichnung X-6 erhalten. Eine dritte B-36H, die zuerst die Bezeichnung XB-36H und dann NB-36H erhielt, wurde zu einem fliegenden Testlabor umgebaut und führte einen Reaktor an Bord mit. Dieser diente jedoch nicht für den Antrieb, sondern zum Testen von Abschirmungen und zur Untersuchung der Strahlenwirkung auf verschiedene empfindliche Materialien (Gummi der Reifen, Isolationsmaterialien, Elektronikbauteile).

Die Convair B-36H war damals der grösste Bomber der Welt. Sie hatte eine Flügelspannweite von 70.1 m, eine Länge von 49.4 m und eine Abflugmasse von 186 Tonnen. Sie wurde von sechs 28-Zylinder-Kolbenmotoren (Pratt & Whitney R-4360-53 Wasp Major mit je 2795 kW) mit Druckpropellern und vier Strahltriebwerken (General Electric J47-GE-19 mit je 23.2 kN Schub) angetrieben. In 11'000 m Höhe war ihre Höchstgeschwindigkeit 660 km/h, ihre Reichweite betrug 10'940 km und die Kampfmittelzuladung war über 32 Tonnen. Sie hatte 15 Mann Besatzung. Ihre Tragflächen waren so dick, dass die sechs Propellertriebwerke während des Fluges zugänglich waren und gewartet werden konnten.

Abbildung 75: Convair B-36H

Für die Testflüge der NB-36H wurde der Reaktor im hinteren Bombenschacht eingebaut. Der Reaktor hatte eine Leistung von 1000 kW und eine Masse von 15.9 Tonnen. Um Gewicht zu sparen, wurde die Abschirmung aufgeteilt. Der Reaktor erhielt eine minimale Abschirmung, und die Pilotenkanzel wurde rundherum mit 12 Tonnen Blei und Gummi abgeschirmt. Zusätzlich wurde

zwischen Pilotenkanzel und Reaktor eine 4 Tonnen schwere Bleiplatte eingebaut.

Abbildung 76: Convair XB-36H

Mit der NB-36H wurden zwischen 1955 und 1957 insgesamt 47 Testflüge durchgeführt. Alle Flüge fanden über dünnbesiedeltem Gebiet statt und wurden jeweils von einem Transportflugzeug C-97 begleitet, das einen Zug bewaffneter Marinesoldaten an Bord hatte. Im Falle eines Absturzes der NB-36H wären diese Soldaten mit dem Fallschirm abgesprungen, um die Unfallstelle abzuriegeln.

Obschon das Projekt beachtliche Fortschritte machte, wurde es nie vollendet. Die X-6 wurde nicht gebaut, und 1961 wurde das ganze Programm beendet. Der Misserfolg des Projekts ist auf mehrere Umstände zurückzuführen. Das Projekt litt von Anfang an unter einer mangelhaften Organisations- und Führungsstruktur, unter Kompetenzstreitigkeiten (z.B. zwischen USAF und AEC) und politischen Entscheidungen, die immer wieder andere Prioritäten setzten (kurz: es fehlte ein General Groves als oberster Chef). Ferner bewirkten die Fortschritte in der Entwicklung der ballistischen Interkontinentalraketen und die aussergewöhnlich guten Leistungen des neuen Bombers Boeing B-52 Stratofortress, dass der Bau eines Atomflugzeuges mit seinen hohen Kosten und Risiken immer weniger attraktiv erschien.

10.5 Atomraketen

10.5.1 Nuklearthermische Raketen

Der Schub eines Raketentriebwerks ist umso grösser, je mehr Masse pro Zeiteinheit ausgestossen wird und je grösser die Geschwindigkeit der ausgestossenen Masse ist. Bei den meisten Raketen ist die ausgestossene Masse gasförmig. Das Gas wird durch eine Verbrennung in einer Brennkammer auf hohe Temperatur und hohen Druck gebracht. Das heisse Gas verlässt die Brennkammer durch eine Düse und wird dabei auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt. Die erreichte Geschwindigkeit ist umso grösser, je höher die Temperatur und je kleiner die Molekülmasse des Gases ist.

Statt dass das Gas wie bei den üblichen Raketen durch eine Verbrennung erhitzt wird, kann es

natürlich auch durch eine andere Energiequelle, z.B. durch einen Kernreaktor, aufgeheizt werden.

Bereits 1953 wurde am Los Alamos Scientific Laboratory (LASL) mit theoretischen Studien über Raketen mit nuklearen Energiequellen begonnen, wobei verschiedene Entwürfe untersucht wurden. Bei der einfachsten Konstruktion, genannt „solid core“, wird der Kern eines normalen Kernreaktors vom Arbeitsmedium durchflossen, das dadurch auf eine hohe Temperatur aufgeheizt wird. Das Medium wird sodann durch Expansion in einer Düse auf eine möglichst hohe Austrittsgeschwindigkeit beschleunigt. Da die höchsten Strahlgeschwindigkeiten bei Gasen mit kleinster Molekülmasse erreicht werden, ist Wasserstoff das bestgeeignete Arbeitsmedium. Dieses besonders einfache „solid core“-Prinzip hat den Nachteil, dass die Temperatur des Gasstrahls durch die Schmelztemperaturen der Reaktormaterialien begrenzt ist. Mit verschiedenen Modifikationen könnten höhere Temperaturen erreicht werden. Beim anspruchsvollsten Konzept ist der Reaktorbrennstoff selber ebenfalls gasförmig. Dabei können zwar sehr hohe Temperaturen erreicht werden, aber der Weg zur Verwirklichung dieses Prinzips ist besonders steil und weit.

1956 starteten die AEC und die US Air Force am LASL die Entwicklung einer Nuklear-Rakete unter dem Codenamen „Projekt Rover“ mit der praktischen Erprobung des „solid core“-Konzepts.

Die Versuche wurden in „Area 25“ im Südwesten des Atomwaffen-Testgeländes in Nevada durchgeführt. Das Nuklear-Raketen-Testgelände erhielt die Bezeichnung „Nuclear Rocket Development Station“ (NRDS). Das NRDS bestand aus drei Prüfständen A, C und ETS-1 („Engine Test Stand-1“) und zwei Werkgebäuden, R-MAD und E-MAD („Reactor-“, bzw. „Engine-“ „Maintenance, Assembly and Disassembly“). Diese Anlagen lagen mehrere Meilen voneinander entfernt und waren durch eine Strasse und ein Eisenbahngeleise[40] miteinander verbunden.

Bei einer flugfähigen Rakete müssen alle Hilfsaggregate, insbesondere die Treibstoffpumpen, aus bordeigenen Energiequellen versorgt werden. Bei den ersten Versuchen des Rover-Projekts wurde diese Komplikation vermieden, indem bewusst darauf verzichtet wurde, ein prinzipiell flugfähiges Triebwerk zu bauen. Es ging zunächst nur darum, verschiedene Reaktorkonstruktionen mit einem Wasserstoffstrahl zu testen. Da bei diesen ersten Versuchen die Triebwerke also zum vornherein nicht flugfähig waren, wurden sie nach einem flugunfähigen neuseeländischen Laufvogel mit „Kiwi“ bezeichnet. Der Einfachheit halber wurden die Triebwerke so montiert, dass der Gasstrahl nach oben statt nach unten gerichtet war.

Bei den Versuchen der Serie „Kiwi A“ zwischen 1958 und 1960 wurden eine Leistung von 100 MW und ein Schub von 22 kN erreicht. Der Reaktorkern bestand aus Uranoxid-Platten. Um höhere Betriebstemperaturen zu ermöglichen, wurden zwischen 1961 und 1964 für die Reaktoren der Versuche „Kiwi B“ kleine in Graphit eingebettete Uranoxidkugeln verwendet, die mit Niobcarbid beschichtet waren. Dabei wurden eine Leistung von 1000 MW und ein Schub von 220 kN erreicht. Bei den letzten Versuchen der „Kiwi“-Serie wurde als Reaktorbrennstoff Urancarbid verwendet. Mit einer kleineren Version von „Kiwi“, „Peewee“, wurden mit Zirkoncarbid beschichtete Brennstoffpillen getestet. Damit wurden eine Gastemperatur von 2550 K und eine Strahlgeschwindigkeit von 8200 m/s erreicht.

Zwischen 1965 und 1968 wurden die Reaktoren „Phoebus 1“ und „Phoebus 2“ getestet. Das stärkste Triebwerk, „Phoebus 2A“, hatte einen maximalen Schub von 930 kN und lieferte im Juni 1968 während 12 Minuten eine Leistung von 4000 MW.

1960 begann die NASA zusammen mit der AEC mit dem NERVA-Programm[41]. Dabei ging es um

[40] „Jackass and Western Railroad“, gelegentlich auch als „kürzeste und langsamste Eisenbahnlinie der Welt“ bezeichnet.

[41] NERVA: Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application

Abbildung 77: Test eines „Kiwi“-Reaktors

die Entwicklung eines flugfähigen Triebwerks. Dementsprechend mussten die Treibmittelpumpen durch das Triebwerk selber angetrieben werden. Im September 1964 starteten die Versuche mit dem Triebwerk „NRX“[42] . Das letzte dieser Serie, das „EX“[43], war das erste, das in „richtiger Position“, d.h. mit Triebwerkstrahl nach unten gerichtet, getestet wurde. Dieses Triebwerk erreichte eine Leistung von 1100 MW und einen Schub von 334 kN. Im März 1968 wurde dieses Triebwerk während eines Testlaufs 28 mal gestoppt und wieder gestartet. Bei diesen Versuchen traten Probleme auf, die zum Teil nicht vollständig gelöst werden konnten. Durch Vibrationen des Gasstrahls kam es bei den ersten Tests zu Brüchen der Reaktorbrennstoffbündel. Dieses Problem konnte gelöst werden, aber die Lösung eines weiteren Problems schien noch in weiter Ferne zu liegen: Während die Graphitbrennstoffelemente der hohen Temperatur zwar standhielten, wurden sie jedoch durch die chemische Reaktion mit dem Wasserstoff stark erodiert.

Mit dem Auslaufen des Apollo-Programms wurde das Rover/NERVA-Programm 1972 schliesslich gestoppt. Seit etwa 2002 wird im Hinblick auf bemannte Marsflüge eine Weiterführung des Nuklear-Raketen-Programms wieder in Betracht gezogen. Da Nuklear-Raketen rund doppelt so hohe Strahlgeschwindigkeiten wie chemische Raketen liefern, könnten bedeutend höhere Geschwindigkeiten erreicht und damit die Flugdauer einer Marsmission stark verkürzt werden. Dadurch würden medizinische Probleme, wie z.B. die lange Schwerelosigkeit, wesentlich reduziert.

Eine Nuklear-Rakete würde natürlich nicht von der Erde aus starten. Sie müsste in einer Satellitenbahn in grosser Höhe zusammengebaut und von dort aus gestartet werden, so dass keinerlei radioaktive Partikel in die Erdatmosphäre gelangen könnten.

[42] NRX: vermutlich „NR“ für „Nuclear Rocket“ und „X“ für experimental“
[43] EX: vermutlich für „Experimental Engine“

10.5.2 Gepulste Nuklearantriebe

Ein etwas abenteuerliches Konzept eines Atomantriebs für Raumfahrzeuge war das geheime Projekt „Orion“, das zwischen 1958 und 1965 studiert wurde und das auf einem Vorschlag von Stanislaw Marcin Ulam (1909–1984) und dessen Assistent Cornelius Everett beruhte. Statt durch einen kontinuierlichen Gasstrahl sollte das Fahrzeug durch die Druckwellen von kleinen Atombomben angetrieben werden, die hinter dem Fahrzeug hätten gezündet werden sollten. Die Druckwellen würden auf eine Prallplatte treffen, die durch Schockabsorber mit dem Fahrzeug verbunden wäre. Der erste Entwurf war ein Fahrzeug mit einer Masse von 10’000 Tonnen und einer Prallplatte von über 40 Meter Durchmesser. Beim Start würde jede Sekunde eine Bombe von 0.1 kt TNT gezündet. Während das Fahrzeug beschleunigte, würden die Explosionen stärker und die zeitlichen Abstände grösser, bis schliesslich alle 10 Sekunden eine 20-kt-Bombe gezündet würde. Um auch im Vakuum eine hinreichend starke Druckwelle zu erzeugen, wären die Bomben mit einer Schicht von Kunststoffschaum versehen worden, um beim Verdampfen des Kunststoffs Gas zu produzieren.

Der erste Entwurf basierte auf der Meinung, es wäre demnächst möglich, kleine Wasserstoffbomben direkt zu zünden, ohne die Verwendung einer Kernspaltungsbombe. Eine reine Wasserstoffbombe würde nur relativ wenig Radioaktivität freisetzen. Da jedoch bis heute eine Fissionsbombe zur Zündung einer Fusionsbombe erforderlich ist, käme es, egal ob Fusions- oder Fissionsbomben verwendet würden, zur Freisetzung einer grossen Menge von radioaktiven Spaltprodukten.

Da somit ein Start von der Erdoberfläche zu einer inakzeptablen radioaktiven Kontamination führen würde, wurde bei einem späteren Entwurf für ein bedeutend kleineres Fahrzeug mit einer Prallplatte von nur 10 Metern Durchmesser ein Start aus einer Erdumlaufbahn vorgesehen.

Die Vorteile des „Orion“-Antriebs wären ein hoher Schub und eine hohe Strahlgeschwindigkeit. Die erreichbare Strahlgeschwindigkeit wäre über 20 km/s für ein kleines „Orion“-Fahrzeug und bis zu 60 km/s für ein grosses 40’000-Tonnen-Fahrzeug.

Diesen grossen Vorteilen stehen natürlich auch Nachteile gegenüber. Auch ein Start ausserhalb der Atmosphäre ist hinsichtlich Strahlung nicht problemlos. Die bei der Explosion einer Atombombe entstehende Gammastrahlung kann noch in Entfernungen von einigen tausend Kilometern elektronische Schaltungen beschädigen. Als das „Orion“-Projekt studiert wurde, gab es im erdnahen Raum kaum etwas, das hätte beschädigt werden können. Heute würde ein „Orion“-Start aus einer niedrigen Erdumlaufbahn unzählige Kommunikations-Satelliten zerstören. Es ist auch fraglich, ob die Prallplatte, die Schockabsorber und schliesslich das Raumschiff tausende von Kernexplosionen problemlos überstehen würden. Mit kleinen Modellen (genannt „Put-Puts“oder „Hot Rods“) und kleinen konventionellen Explosionen wurde demonstriert, dass ein Pulsantrieb im Prinzip möglich ist. Im November 1959 flog ein Modell mit Hilfe von 6 Explosionen 100 Meter weit. Trotzdem wäre vermutlich noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten. Da ein Start von der Erdoberfläche nicht in Frage kommt, lassen sich zudem die Hauptvorteile des „Orion“-Antriebs gar nicht richtig ausnützen. Für planetare Missionen von der Umlaufbahn um die Erde zur Umlaufbahn um den Zielplaneten könnten sich andere Triebwerke als vorteilhafter erweisen.

Im übrigen ist es ein etwas unsympathischer Gedanke, statt durch einen kontinuierlichen Schub durch einzelne Explosionen angetrieben zu werden.

Zwischen 1973 und 1979 studierte eine Gruppe von Wissenschaftern und Ingenieuren der British Interplanetary Society das Projekt „Daedalus“. Dabei sollten kleine „pellets“ von Fusionsbrennstoff in einer Reaktionskammer mit Hilfe von Laser- oder Elektronenstrahlen gezündet werden. Ein geeignetes Magnetfeld sollte für das bei der Mikroexplosion entstehende heisse Gas als Düse wirken. Da die Explosionen viel schwächer wären als beim „Orion“-Projekt und dafür Pulsraten bis zu

250 pro Sekunde vorgesehen waren, wären die Schockabsorber bedeutend leichter zu konstruieren gewesen. Die Idee, aus den Explosionen gleichzeitig die Energie für den Betrieb des Schiffes und des Triebwerks zu gewinnen, erwies sich als nicht realisierbar. Eine von der NASA in den 90er-Jahren studierte Variante des „Daedalus"-Projekts, das Projekt „Longshot", verwendete für die Energieversorgung des Schiffes und des Triebwerks einen konventionellen 300-kW-Fissionsreaktor.

Eine Variante des „Daedalus"-Konzepts, das „Medusa"-Projekt, das ebenfalls in den 90er-Jahren entwickelt wurde, sah vor, dass die Mikroexplosionen nicht hinter dem Schiff in einer Reaktionskammer, sondern vor dem Schiff gezündet werden sollten. Die Druckwellen sollten auf ein riesiges vor dem Schiff aufgespanntes „Segel" wirken. Dieses würde das Schiff an langen Kabeln hinter sich herziehen. Mit einem „Medusa"-Antrieb sollten Strahlgeschwindigkeiten bis gegen 1000 km/s möglich sein. Da aber das Zündproblem bei der Fusion mit Trägheitseinschluss immer noch nicht gelöst ist, lassen sich alle diese Projekte („Daedalus", „Longshot"und „Medusa") vorläufig nicht verwirklichen.

10.6 Atomschiffe

Während der Atomantrieb für Autos, Lokomotiven, Flugzeuge und Raketen bis heute weitgehend eine Utopie blieb, wurde er bei Schiffen erstaunlich schnell Realität.

10.6.1 Unterseeboote

Bis 1955 waren Unterseeboote in Wirklichkeit Schiffe, die hauptsächlich auf der Meeresoberfläche fuhren und die notfalls während begrenzter Zeit tauchen konnten. Während der Fahrt an der Oberfläche wurde das U-Boot durch (meist zwei) Dieselmotoren angetrieben, die wahlweise auch je einen elektrischen Generator treiben konnten, mit dem riesige Akkumulatoren-Batterien geladen wurden. Diese lieferten den Strom für die Elektromotoren, mit denen das Boot bei Tauchfahrt angetrieben wurde.

Abgesehen vom Luftvorrat war die Tauchzeit begrenzt durch die Dauer, während der die Akkumulatoren-Batterien das Boot mit Energie versorgen konnten. Einerseits konnte diese Zeit durch langsame Fahrt auf 14 bis 48 Stunden (je nach Boots-Typ) ausgedehnt werden, und andererseits wurde diese Zeit durch hohen Energieverbrauch infolge von Ausweichmanövern mit hoher Geschwindigkeit bei der Verfolgung durch Wasserbomben werfende Zerstörer stark verkürzt.

Daher war der Kernreaktor als eine luftunabhängige Energiequelle genau das, was sich jeder U-Boot-Fahrer schon immer sehnlichst gewünscht hatte. Das wurde von dem brillianten und energischen (und auch gefürchteten) Kapitän (später Admiral) Hyman George Rickover (1898–1986) schon 1947 klar erkannt[44]. Dank seiner Initiative wurde im September 1947 eine Studie eines nuklear angetriebenen Unterseebootes gestartet. Im August 1950 wurde mit der Konstruktion eines Prototyps des für das U-Boot vorgesehenen Reaktors begonnen, und im Juni 1952 erfolgte die Kiellegung des ersten Atomunterseebootes, der „Nautilus", die 1955 in Dienst gestellt wurde.

Die „Nautilus" fuhr 1958 unter der ganzen arktischen Eiskappe durch und erreichte unter dem Eis den Nordpol. 1960 fuhr das von zwei Atomreaktoren angetriebene U-Boot „Triton" rund um die Erde ohne aufzutauchen.

[44] Admiral Rickover war wohl ebenso zielstrebig und tatkräftig wie General Groves. Verglichen mit Rickover war Groves aber anscheinend ein liebenswürdiger und umgänglicher Mensch ...

Abbildung 78: Admiral H.G. Rickover

Abbildung 79: USS Nautilus

10.6.2 Flugzeugträger

Der erste Flugzeugträger mit Nuklearantrieb, die „USS Enterprise“ (CVN-65[45]), wurde nach nur drei Jahren Bauzeit 1961 in Dienst gestellt. Die „Enterprise“ ist heute noch im Dienst, und es ist vorgesehen, dass sie erst 2013 ausser Dienst gesetzt und durch die geplante CVN-78 ersetzt wird. Sie hat vier Schrauben und 8 (in Worten: acht !) Reaktoren. Sie hat eine Wasserverdrängung von über 80'000 Tonnen und ist mit einer Länge von 342 Metern der längste Flugzeugträger der US-Flotte. Alle neueren im Dienst der US-Flotte stehenden nukleargetriebenen Träger („Nimitz“, „Dwight D. Eisenhower“, „Carl Vinson“, „Thedore Roosevelt“, „Abraham Lincoln“, „George Washington“, „John C. Stennis“, „Harry S. Truman“ und „Ronald Reagan“) verfügen über „nur“ zwei Kernreaktoren und haben eine Länge von 333 Metern. Die sechs neuesten Träger haben eine Wasserverdrängung von rund 90'000 Tonnen.

[45] CVN: Carrier Vessel Nuclear

10.6.3 Kreuzer

Der erste nukleargetriebene Kreuzer, der Lenkwaffenkreuzer „USS Long Beach“, wurde 1961 in Dienst gestellt. Im August 2004 betrieb die amerikanische Navy insgesamt 80 nukleargetriebene Kriegsschiffe (U-Boote, Träger und Kreuzer).

Abbildung 80: USS Enterprise, USS Long Beach und USS Bainbridge, die ersten drei nukleargetriebenen Überwasserschiffe der US Navy

10.6.4 Eisbrecher

Die „Lenin“ war der erste Eisbrecher mit Atomantrieb. Russland verfügt über insgesamt 8 nukleargetriebene Eisbrecher.

10.6.5 Handelsschiffe

Die amerikanische „NS Savannah“, das erste Handelsschiff mit Atomantrieb, wurde 1962 in Betrieb genommen. Das 182 m lange 22’000-Tonnen-Schiff konnte 60 Passagiere und 14’000 Tonnen Fracht transportieren.

Die deutsche „Otto Hahn“ wurde 1968 in Betrieb gestellt. Das 17’000-Tonnen-Schiff sollte dazu dienen, Erfahrungen mit dem Nuklearantrieb zu sammeln. Einerseits aus wirtschaftlichen Gründen

Abbildung 81: Russischer nukleargetriebener Eisbrecher Yamal

Abbildung 82: NS Savannah

und andererseits wegen der zunehmenden Opposition gegen die Nutzung der Kernenergie wurde 1972 die „Savannah“ stillgelegt und 1982 die „Otto Hahn“ auf Dieselbetrieb umgebaut.

Der japanische Frachter „Mutsu“ wurde 1970 in Betrieb genommen. Das 8000-Tonnen-Schiff wurde wegen technischer und politischer Probleme zu einem Misserfolg.

In Russland wurde 1988 der eisbrechende Frachter „Sevmorput“ in Dienst gestellt.

Mit der zunehmenden Verknappung und Verteuerung des Erdöls könnten nukleargetriebene Handels- und Passagierschiffe in nicht allzu ferner Zukunft wirtschaftlich attraktiv werden.

Abbildung 83: Otto Hahn

11 Fusion

11.1 Fusionsreaktionen

Statt durch Spaltung sehr schwerer Kerne (Fission) kann auch durch Verschmelzung sehr leichter Kerne (Fusion) Energie freigesetzt werden. Es gibt eine ganze Reihe möglicher Fusionsreaktionen. Unter den Reaktionen, die für eine Energieproduktion in Frage kommen, sind die wichtigsten die folgenden:

D	+	D	$\longrightarrow$	^{3}He	+	n	+ 3.27	MeV
D	+	^{3}He	$\longrightarrow$	^{4}He	+	p	+ 18.3	MeV
D	+	D	$\longrightarrow$	T	+	p	+ 4.04	MeV
D	+	T	$\longrightarrow$	^{4}He	+	n	+ 17.6	MeV
D	+	^{6}Li	$\longrightarrow$	^{4}He	+	^{4}He	+ 22.4	MeV
H	+	^{7}Li	$\longrightarrow$	^{4}He	+	^{4}He	+ 4.0	MeV

Dabei wurden die Symbole D für Deuterium (^{2}H), T für Tritium (^{3}H) und H für Wasserstoff (^{1}H) verwendet. p steht für Proton und n für Neutron.

Alle diese Reaktionen können kontrolliert im Labor durchgeführt werden, indem mit Hilfe eines Beschleunigers die entsprechenden Teilchen gegeneinander geschossen werden. Dabei ist jedoch stets der Energieaufwand für den Betrieb des Beschleunigers um Grössenordnungen höher als die Energieproduktion durch die ausgelösten Fusionsreaktionen. Erstens ist der „Wirkungsgrad“ eines Beschleunigers sehr klein, d.h. höchstens etwa 10 Prozent der vom Beschleuniger verbrauchten Energie findet sich in der Energie des Partikelstrahls wieder. Zweitens führt immer nur ein verschwindend kleiner Bruchteil ($10^{-6} \ldots 10^{-2}$) der Partikel eines Strahls zu Kernreaktionen.

Da die elektrisch positiv geladenen Atomkerne sich gegenseitig stark abstossen, müssen die Kerne mit relativ grosser Geschwindigkeit gegeneinander geschossen werden, damit sie sich so nahe kommen, dass eine Verschmelzungsreaktion stattfinden kann. Der einzige Weg zu einer positiven Energiebilanz scheint über thermonukleare Reaktionen zu führen. Bei einer thermonuklearen Reaktion befinden sich die Ausgangsstoffe auf einer so hohen Temperatur, dass die Geschwindigkeit der Wärmebewegung der Teilchen ausreicht, um ihre elektrische Abstossung zu überwinden.

Von den oben erwähnten Fusionsreaktionen ist die DT-Reaktion die geeignetste, weil die für sie erforderliche Temperatur tiefer ist als bei den anderen Fusionsreaktion. Bei der DT-Reaktion

D	+	T	$\longrightarrow$	^{4}He	+	n	+ 17,6	MeV

verschmelzen ein Deuteriumkern und ein Tritiumkern zu einem Helium-5-Kern, der sofort zerfällt in einen Helium-4-Kern und ein Neutron (Abbildung 84). Dabei wird eine Energie von 17.6 MeV = $2.82 \cdot 10^{-12}$ J frei. Bei der Fusion von 1 kg „DT-Brennstoff“ wird total eine Energie von $3.38 \cdot 10^{14}$ J in Form von Wärme freigesetzt. Zum Vergleich: Die Verbrennung von 1 kg Benzin liefert rund $4.2 \cdot 10^7$ J.

Deuterium und Tritium sind die schweren Isotope des Wasserstoffs. Der Kern eines gewöhnlichen Wasserstoffatoms ist ein Proton. Der Kern eines Deuteriumatoms besteht aus einem Proton und einem Neutron, während der Kern eines Tritiumatoms aus einem Proton und zwei Neutronen zusammengesetzt ist. Deuterium und Tritium verhalten sich chemisch wie gewöhnlicher Wasserstoff. Ein Helium-4-Kern (Alphateilchen) besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

Abbildung 84: D + T → ^{5}He → ^{4}He + n

11.2 Thermonukleare Plasmen

Die für thermonukleare Reaktionen erforderlichen Temperaturen liegen in der Grössenordnung 100 Millionen Grad. Bei diesen Temperaturen ist ein Gas vollständig ionisiert und besteht also aus Elektronen und Ionen. Ein Gas in einem solchen Zustand wird *Plasma* genannt. Die hohe Temperatur des Plasmas bewirkt eine intensive Energieabstrahlung.

Von der bei einer Fusionsreaktion freiwerdenden Energie entfallen 80 % auf das Neutron und 20 % auf den Heliumkern. Die Neutronen durchdringen das Plasma praktisch ungehindert und müssen ausserhalb des Reaktionsvolumens in einer geeigneten Mantelschicht (*Blanket*) aufgefangen werden. Die Alphateilchen (Heliumkerne) dagegen geben ihre Energie grösstenteils innerhalb des Plasmas ab und tragen damit zu dessen Aufheizung bei.

Eine selbsterhaltende thermonukleare Reaktion ist nur möglich, wenn die durch die Fusionsreaktionen produzierte Leistung der Alphateilchen grösser ist als die Strahlungsverluste. Dazu muss die Temperatur grösser sein als die sogenannte *Zündtemperatur*. Diese beträgt für die oben erwähnte DT-Reaktion rund 50 Millionen Grad. Für die DD-Reaktion ist sie über 400 Millionen Grad.

Ein wichtiger Parameter für das thermonukleare Plasma ist die Reaktionsrate, von deren Grösse die Energiebilanz entscheidend abhängt. Die Reaktionsrate ist die Zahl der Fusionsreaktionen pro Volumeneinheit und pro Zeiteinheit. Für die DT-Reaktion ist die Reaktionsrate rund 100 mal grösser als für die DD-Reaktion. Da also sowohl Zündtemperatur als auch Reaktionsrate für das DT-Plasma viel günstiger liegen, konzentrieren sich die Anstrengungen auf die Realisierung der DT-Fusion.

11.3 Einschluss des Plasmas

Das Hauptproblem besteht offensichtlich darin, ein Plasma auf eine Temperatur von 50 bis 100 Millionen Grad aufzuheizen und mit geringen Verlusten genügend lange zusammenzuhalten. Selbstverständlich kann ein Plasma bei diesen Temperaturen nicht in materiellen Wänden eingeschlossen werden. Es gibt prinzipiell drei Möglichkeiten, das Plasma einzuschliessen:

1. Gravitationseinschluss: Das Plasma wird durch seine eigene Schwerkraft zusammengehalten.

Sterne funktionieren nach diesem Prinzip. Für Plasmavolumina, wie sie für technische Zwecke in Frage kommen, ist jedoch die eigene Schwerkraft vernachlässigbar klein.

2. Magnetischer Einschluss: Das Plasma wird durch geeignete Magnetfelder zusammengehalten.

3. Trägheitseinschluss: Der Brennstoff wird durch seine Trägheit für kurze Zeit (Grössenordnung: 10 Milliardstelsekunden) zusammengehalten.

11.4 Magnetischer Einschluss

Es gibt eine grosse Zahl von verschiedenen Magnetfeldkonfigurationen, die für den Einschluss eines thermonuklearen Plasmas studiert und zum Teil auch getestet wurden. Im Folgenden werden nur die drei einfachsten und wichtigsten betrachtet.

Ein elektrisch geladenes Teilchen, das sich mit konstanter Geschwindigkeit in einer Ebene bewegt, die senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld steht, durchläuft eine Kreisbahn (vgl. Abschnitt 8.2). Wenn das Teilchen zusätzlich eine Geschwindigkeitskomponente parallel zum Magnetfeld hat, bewegt es sich auf einer schraubenlinienförmigen Bahn (Abbildung 85).

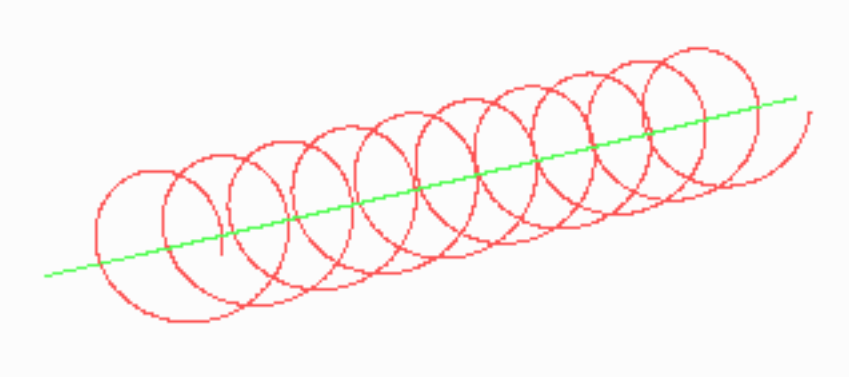

Abbildung 85: Geladenes Teilchen im Magnetfeld. Grün: Magnetfeldlinie. Rot: Teilchenbahn.

Somit werden durch ein Magnetfeld die geladenen Plasmateilchen (Elektronen und Ionen) auf schraubenlinienförmigen Bahnen gehalten, die den Magnetfeldlinien entlanglaufen. Die Radien dieser Schraubenlinien sind sehr klein. Sie betragen für Deuterium-Ionen und Tritium-Ionen etwa 5 mm und für Elektronen weniger als 0.1 mm.

Im Innern einer Zylinderspule herrscht ein annähernd homogenes Magnetfeld, in dem die Feldlinien nahezu parallel verlaufen. In diesem Bereich werden die geladenen Teilchen durch das Magnetfeld zusammengehalten. An beiden Enden der Spule können die Teilchen jedoch entlang den auseinanderlaufenden Feldlinien entweichen. Die Feldlinien einer Zylinderspule sind in Abbildung 86 schematisch dargestellt.

Die Teilchenverluste können durch eine spezielle Anordnung der Magnetspulen reduziert werden, indem das Magnetfeld an den Enden verstärkt wird. Dadurch werden die nach aussen laufenden Teilchen zum grossen Teil reflektiert. Eine solche Anordnung wird *Spiegelmaschine* genannt. Abbildung 87 zeigt schematisch die Spulenanordnung und die Feldlinien einer Spiegelmaschine.

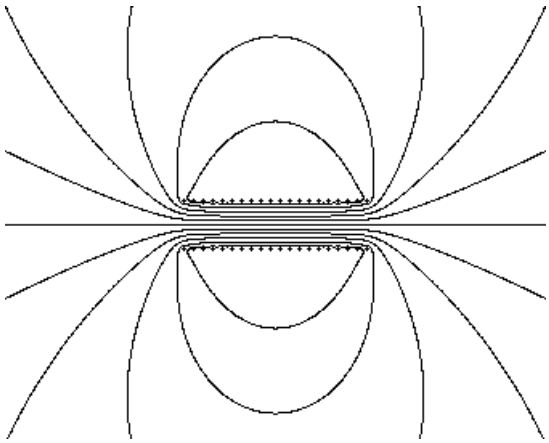

Abbildung 86: Magnetfeldlinien einer Zylinderspule

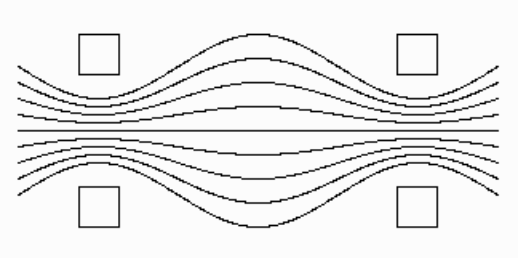

Abbildung 87: Magnetfeldlinien einer Spiegelmaschine

Jedoch auch eine Spiegelmaschine hat noch unvermeidliche Verluste an den Enden. Endverluste lassen sich ganz vermeiden, wenn die Magnetfeldlinien zu einem Kreis geschlossen werden. Abbildung 88 zeigt eine solche *toroidale* Magnetfeldkonfiguration.

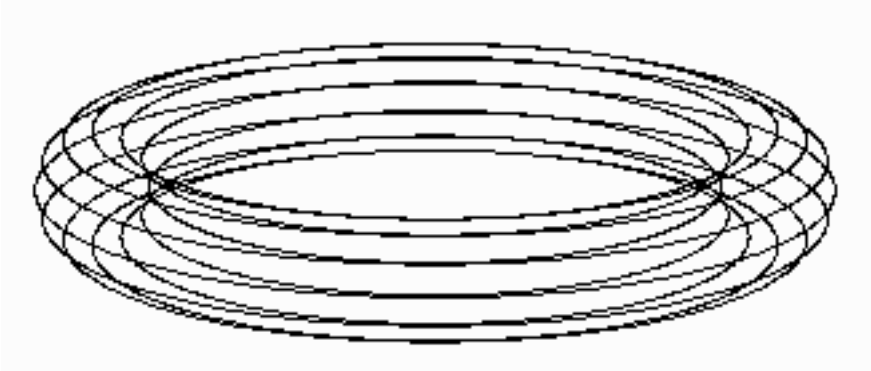

Abbildung 88: Torusförmiges Magnetfeld

Der Vorteil der vermiedenen Endverluste wird jedoch durch einen neuen Nachteil erkauft. Durch die gekrümmten Magnetfeldlinien treten Kräfte auf, die das Plasma gegen die Toruswand driften lassen. Dies lässt sich verhindern, indem die Magnetfeldlinien „verschraubt“ werden (Abbildung 89).

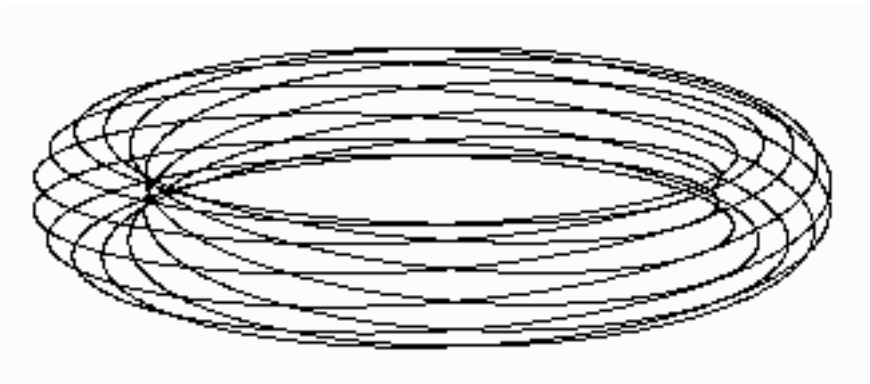

Abbildung 89: Magnetfeldlinien

Es gibt im wesentlichen zwei Möglichkeiten, die eine „Verschraubung“ der Feldlinien bewirken.

11.4.1 Stellarator

Beim *Stellarator* wird die Verschraubung der Feldlinien durch speziell gekrümmte Magnetspulen erzeugt. Abbildung 90 zeigt schematisch die Magnetspulen (blau) und das von den Magnetfeldlinien eingeschlossene Plasma (orange) im Stellarator *Wendelstein 7-X* des *Max Planck Instituts für Plasmaphysik* in Garching.

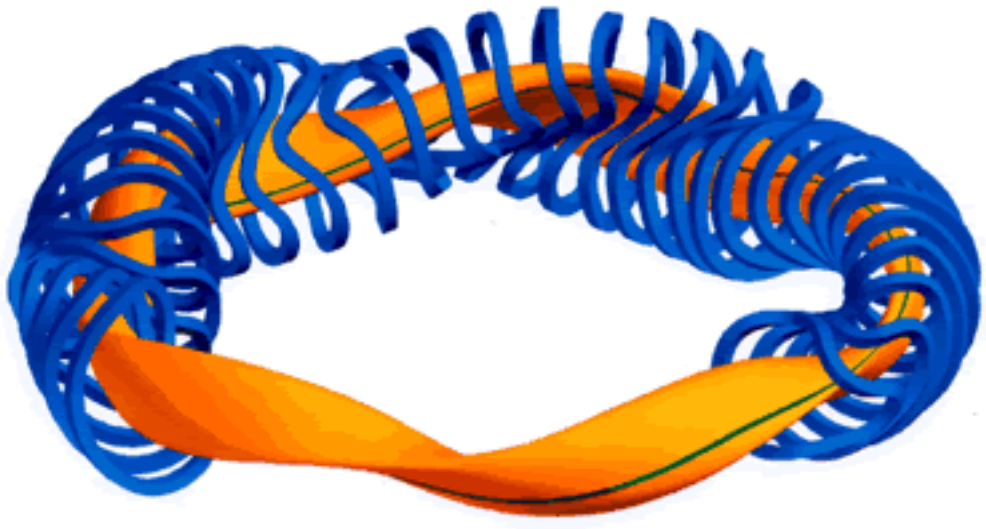

Abbildung 90: Stellarator

11.4.2 Tokamak

Der bisher erfolgreichste Maschinentyp mit toroidalem Magnetfeld ist der *Tokamak*. Der Name leitet sich aus den jeweils ersten Buchstaben der russischen Wörter für „toroidal“, „Kammer“ und „magnetisch“ ab. Beim Tokamak wirkt das torusförmige Plasma als Sekundärwicklung eines Transformators. Durch Hochfahren des Stromes in der Primärwicklung wird im Plasma ein Strom induziert. Der Plasmastrom erzeugt erstens eine Aufheizung des Plasmas und produziert zweitens seinerseits ein zusätzliches Magnetfeld, das die Verschraubung der Feldlinien bewirkt. Abbildung 91 zeigt das Prinzip eines Tokamaks.

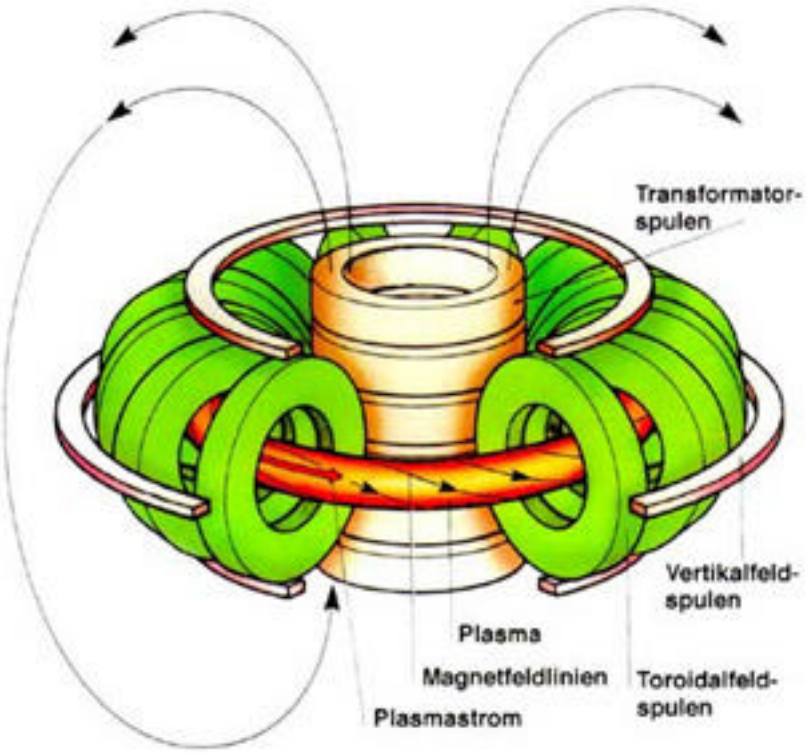

Abbildung 91: Tokamak

Die Toroidalfeldspulen (grün) erzeugen das toroidale Magnetfeld, durch das das Plasma zusammengehalten wird. Der in den Transformatorspulen fliessende Strom, der stetig von null bis zu einem Maximalwert zunimmt, produziert ein ebenfalls stetig anwachsendes Magnetfeld, das durch Induktion einen elektrischen Strom im Plasma erzeugt. Dieser Plasmastrom wiederum erzeugt ein poloidales Magnetfeld, das sich dem toroidalen Magnetfeld überlagert und die Verschraubung der Magnetfeldlinien bewirkt. Das poloidale Feld bewirkt jedoch eine Kraft auf das Plasma, durch die das Plasma radial nach aussen getrieben würde. Dieser Effekt muss durch ein zusätzliches Feld kompensiert werden, das durch die Vertikalfeldspulen erzeugt wird. Nicht dargestellt im Bild ist der Eisenkern, der das Induktionsmagnetfeld führt.

Die Aufheizung durch den Plasmastrom allein genügt jedoch nicht, um die nötigen Temperaturen zu erreichen. Es sind zusätzliche Heizmethoden erforderlich. Dazu haben sich die Injektion neutraler Wasserstoffstrahlen und die Einstrahlung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen bewährt.

Ein prinzipieller Nachteil des Tokamaks besteht darin, dass der bis zu einem bestimmten Maximalwert ständig anwachsende Strom in den Transformatorspulen keinen kontinuierlichen, sondern nur einen intermittierenden Betrieb zulässt. Der Strom muss nach dem Erreichen des Maxmimalwertes abgeschaltet und dann neu hochgefahren werden. Dadurch geht natürlich jedesmal der Plasmaeinschluss verloren und die Fusion kommt zum Stillstand. Einerseits ist eine solche intermittierende Energieproduktion natürlich höchst unvorteilhaft und andererseits bewirken diese thermischen Zyklen zwischen heiss und kalt eine starke Materialbeanspruchung. Wenn ein Fusionsreaktor während einer Lebensdauer von 25 Jahren nicht mehr als 100'000 solche Zyklen durchlaufen soll, müsste ein Zyklus mehr als 2 Stunden dauern. Bis jetzt wurden aber nur Zykluszeiten von einigen hundert Sekunden erreicht.

Es gibt jedoch möglicherweise Betriebszustände eines Tokamaks, in denen ein Plasmastrom aufrechterhalten werden kann, ohne dass er durch einen ständig anwachsenden Strom in den Transformatorspulen induziert werden muss. Damit liesse sich ein kontinuierlicher Betrieb realisieren.

11.4.3 Verluste und Instabilitäten

Es gibt eine nahezu unglaubliche Vielfalt von möglichen Instabilitäten des Plasmas, die zu Teilchen- und Energieverlusten führen. Diese zum Teil sehr komplexen Instabilitäten konnten erst im Verlaufe vieler Jahre Forschungsarbeit verstanden und vermieden werden.

Ein Problem ist auch die enorm hohe Reinheit, die das Plasma haben muss. Geringste Verunreinigungen des Plasmas durch Metalle erhöhen sehr stark die Strahlungsverluste des Plasmas, wodurch die Zündung erschwert wird. Die Teilchenverluste des Plasmas bilden auch in dieser Hinsicht ein Problem. Teilchen, die aus dem Plasma entweichen, treffen auf die Kammerwand und schlagen Atome aus der Wand, die das Plasma „vergiften" und die Strahlungsverluste vergrössern.

Mit besonderen Einrichtungen und Massnahmen müssen die Verunreinigungen und die „Asche" (d.h. das bei der Fusion entstehende ^{4}He) aus dem Plasma ständig entfernt werden. Andererseits muss gleichzeitig dem Plasma stets neuer Brennstoff zugeführt werden. Auf diese (ebenfalls schwierig zu lösenden) Probleme wird hier nicht weiter eingegangen.

Generell sind die Verluste (im wesentlichen) proportional zur Oberfläche des Plasmavolumens. Die produzierte Fusionsleistung ist dagegen (im wesentlichen) proportional zum Volumen des Plasmas. Daraus folgt, dass der Anteil der Verluste umso kleiner wird, je grösser das Plasmavolumen ist. Das ist am einfachen Beispiel einer Kugel leicht einzusehen. Die Oberfläche einer Kugel mit Radius r ist

$$A = 4\,\pi\,r^2\,, \tag{10}$$

und das Volumen ist

$$V = \frac{4\,\pi}{3}\,r^3\,. \tag{11}$$

Wenn nun die Verlustleistung P_V proportional zu A und die produzierte Fusionsleistung P_F proportional zu V ist, also $P_V = a_V\,A$ und $P_F = a_F\,V$ gilt, ergibt sich für den Anteil der Verluste das Verhältnis

$$\frac{P_V}{P_F} = \frac{a_V}{a_F}\,\frac{A}{V} = \frac{a_V}{a_F}\,\frac{4\,\pi\,r^2}{\frac{4\,\pi}{3}\,r^3} = 3\,\frac{a_V}{a_F}\,\frac{1}{r}\,. \tag{12}$$

Das Verhältnis Verlust- zu Fusions-Leistung ist umgekehrt proportional zum Kugelradius, d.h. je grösser die Kugel, desto kleiner der Anteil der Verluste.

Dieses *Skalierungsgesetz* gilt nicht nur für Kugeln, sondern generell für geometrisch ähnliche Körper. Es hat (mindestens) zwei Konsequenzen.

In der Technik wird häufig ein verkleinertes Modell des geplanten Objekts konstruiert, um die theoretischen Berechnungen zu überprüfen, bevor das Original gebaut wird. Diese bewährte Taktik funktioniert bei der Fusion offenbar nicht. Wenn man noch nicht genau weiss, wie man einen Fusionsreaktor bauen muss und unter welchen Voraussetzungen das Fusionsplasma zündet und wie es brennt, und die noch unbekannten Parameter an einem Modell testen will, dann muss man das „Modell“ des Reaktors *grösser* machen als das Original, weil die Fusionsbedingungen sich umso leichter erfüllen lassen, je grösser die Maschine ist. Wenn aber das Modell grösser ist als das geplante Original, hat der Bau des Modells den Zweck der Kostenersparnis offensichtlich verfehlt.

Wenn andererseits die Theorie weitgehend verstanden ist und mit den Plasmazuständen ein gewisser Punkt erreicht worden ist, kann mit ziemlicher Sicherheit vorausgesagt werden, dass mit einer Maschine, die um einen bestimmten Faktor x grösser ist als die bestehende, das Fusionsplasma zum Brennen gebracht werden kann. Dies ist der Fall für den JET und den ITER (s. Abschnitte 11.4.4 und 11.4.5).

Es gibt in Natur und Technik viele Beispiele von Skalierungsgesetzen.

Ein Balken mit rechteckigem Querschnitt der Länge l sei an seinen Enden aufgelegt und nur durch sein Eigengewicht belastet. Die dadurch verursachte Durchbiegung ist in der Mitte des Balkens maximal. Für einen 1 Meter langen und 1 Zentimeter dicken Stahlstab ergibt sich eine Durchbiegung von 0,6 mm (s. Abbildung 92a).

Für einen Balken, der hundertmal länger, hundertmal breiter und hundertmal höher ist (der also 100 m lang ist und eine Höhe von 1 m hat), ergibt sich *nicht* eine hundertmal grössere Durchbiegung, nämlich 6 cm, sondern eine Durchbiegung von 6 m (s. Abbildung 92b) !

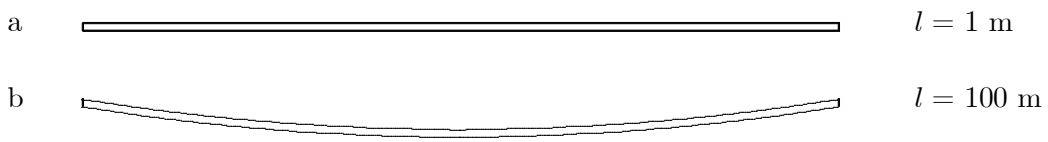

Abbildung 92: Durchbiegung eines Balkens durch sein Eigengewicht

Es stellt sich bereits die Frage, ob für eine so grosse Durchbiegung die Theorie überhaupt noch gültig ist.

Für einen Balken mit einer Länge von 1000 m und einer Höhe von 10 m, würde nach der Theorie die maximale Durchbiegung 600 m sein. Dieses Resultat ist nun offensichtlich unsinnig und zeigt, dass die Gültigkeitsgrenzen der Theorie überschritten wurden. In Wirklichkeit würde der Balken durch sein Eigengewicht entzweibrechen.

Ein physikalisches System verhält sich bei geometrisch ähnlicher Vergrösserung oder Verkleinerung in der Regel *nicht* geometrisch ähnlich.

Eine Ameise kann aus einer Höhe, die dem Tausendfachen ihrer Körperlänge entspricht, auf einen harten Boden abstürzen, ohne sich zu verletzen, ein Mensch dagegen (leider) nicht.

Gewisse Insekten, sog. Wasserläufer, können dank der Oberflächenspannung auf der Wasseroberfläche gehen ohne einzusinken, Flusspferde dagegen nicht.

In den beiden letzten Beispielen sind die verglichenen Körper nicht geometrisch ähnlich. Der dadurch bedingte

Unterschied ist jedoch gegenüber dem durch die unterschiedlichen Grössen verursachten Unterschied vernachlässigbar.

Die in manchen populärwissenschaftlichen Texten so beliebten erstaunlichen Vergleiche zwischen den relativen Stärken von Käfern und Elefanten scheinen auf einer Unkenntnis der Skalierungsgesetze zu beruhen.

11.4.4 JET

Der „Joint European Torus“ (JET) ist der zur Zeit grösste Tokamak. Er wurde 1978 in *Culham* (s. Karte Seite 129) gebaut und nahm 1983 den Betrieb auf.

Die Plasmakammer hat einen äusseren Durchmesser von 2.96 Meter mit einem ovalen Querschnitt von 2.5 m Breite und 4.2 m Höhe. Der maximal erreichte Plasmastrom betrug 7 Millionen Ampere, und ein Strom von 1 Million Ampere konnte während 60 Sekunden aufrechterhalten werden. Es wurde eine maximale (Ionen-)Temperatur von über 400 Millionen Grad erreicht. Zur Aufheizung des Plasma diente die Einstrahlung von Hochfrequenz-Wellen mit einer Leistung bis zu 22 MW und die Injektion von Neutralteilchen mit einer Leistung bis zu 21 MW.

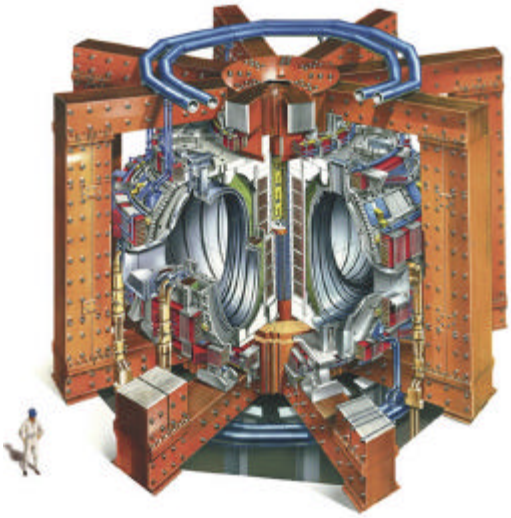

Abbildung 93: JET

Damit die Plasmakammer nicht durch das radioaktive Tritium kontaminiert wurde und für Wartungsarbeiten und Modifikationen problemlos zugänglich blieb, wurde in den ersten Jahren auf Versuche mit Tritium verzichtet und nur mit Deuterium gearbeitet, wobei in Kauf genommen wurde, dass eine Zündung des Plasmas nicht möglich war. Erst als alle vorgesehenen Plasmaexperimente durchgeführt worden waren, wurde in der letzten Betriebsphase mit D-T-Plasmen gearbeitet. Dabei wurde 1997 eine maximale Fusionsleistung von 16 MW freigesetzt, was 65 % der total zugeführten Leistung entsprach. Während 4 Sekunden wurde eine konstante Leistung von 4 MW abgegeben. Die total abgegebene Fusionsenergie betrug 22 MJ. Diese Energie wurde in Form von Wärme abgegeben. Der JET verfügt über keinerlei Einrichtungen, um diese Wärme zu nutzen. Es gibt keine Dampfturbine und keinen elektrischen Generator, da diese Maschinen in Anbetracht der zu erwartenden kurzen Brenndauer des Plamas eine völlig sinnlose Investition gewesen wären. Zeitungsberichte, wie „Im Versuchsreaktor in Culham in der englischen Grafschaft Oxfordshire wurde bei Temperaturen um 300 Millionen Grad mehrere Minuten lang Strom erzeugt [...]“ (Zeitungsmeldung über die ersten erfolgreichen Fusionsversuche 1991), sind absoluter Blödsinn.

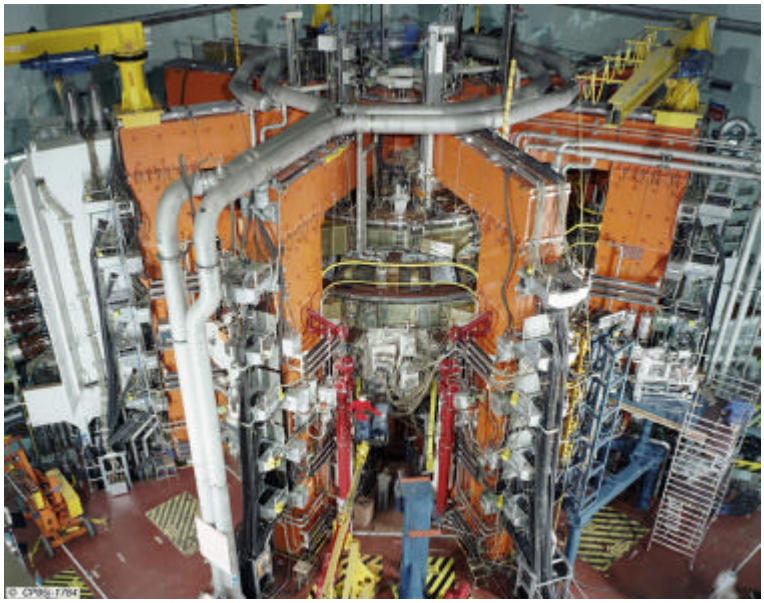

Abbildung 94: JET

Abbildung 95: Plasmakammer des JET

11.4.5 ITER

Der „International Thermonuclear Experimental Reactor“ (ITER) ist ein internationales Forschungsprojekt, an dem die EU, die Schweiz, Japan Russland, die Volksrepublik China, Südkorea, Indien und die USA beteiligt sind. Das Akronym ITER wird häufig auch als das lateinische Wort *iter* für „Weg“ interpretiert.

Als Nachfolger des JET war ursprünglich ein „Next Joint European Torus“ geplant. Da das entsprechende Akronym NJET auf russich „nein“ bedeutet, wurde – um das Schicksal nicht herauszufordern – auf das J verzichtet und der Name „Next European Torus“ mit der Abkürzung NET gewählt. Anstelle des europäischen Projekts NET trat dann

später das internationale Projekt ITER.

Mit der Planung des ITER wurde 1985 begonnen, und 2001 lag ein detaillierter Entwurf vor. Nach langen Verhandlungen wurde 2005 als Standort *Cadarache* in Südfrankreich gewählt (s. Karte Seite 129). Ende 2006 wurde eine internationale Vereinbarung zum Bau des Reaktors unterzeichnet, die Ende 2007 in Kraft trat. Der Baubeginn wurde für 2008 vorgesehen, und die Konstruktion des Tokamaks sollte 2011 beginnen. Die ersten Plasmaexperimente sollten Ende 2016 durchgeführt werden können.

Der ITER hat folgende Zielsetzungen:

- Kurzzeitiger Zustand des Plasmas mit Energieverstärkungsfaktor = 10
  (zehnmal mehr thermische Energie aus den Fusionsreaktionen erhalten, als für das Aufheizen des Plasmas von aussen aufgewendet werden muss).
- Stationärer Zustand des Plasmas mit Energieverstärkungsfaktor = 5.
- Fusionsphase von bis zu 8 Minuten Dauer.
- Zündung eines selbsterhaltend brennenden Plasmas.
- Erproben des Tritium-Brüt-Konzepts.
- Entwicklung des Blankets (Energieübertragung und Abschirmung der Neutronen)
- Entwicklung von Techniken für Fusionskraftwerke (Unterhaltsarbeiten mit Fernmanipulatoren und Robotern, supraleitende Magnete)

Abbildung 96 gibt einen Grössenvergleich von JET und ITER.

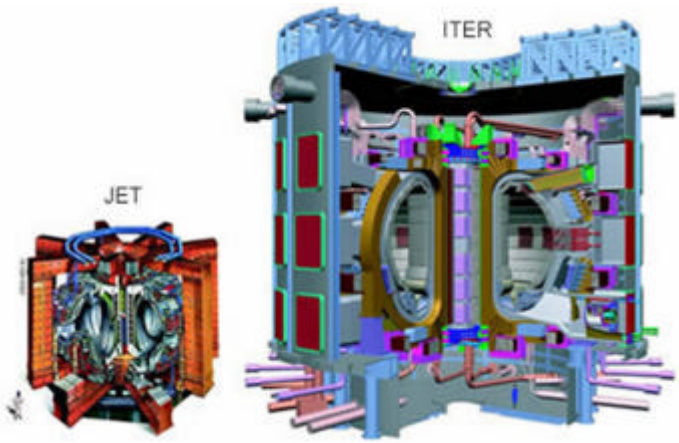

Abbildung 96: Grössenvergleich von JET und ITER

Der ITER hat einen Durchmesser von 21.4 Metern und eine Höhe von 30 Metern. Das Plasma hat einen Radius von 6.2 Metern und ein Volumen von 837 Kubikmetern. Der maximale Plasmastrom beträgt 15 Millionen Ampere. Es wird eine Fusionsleistung von 500 MW erwartet.

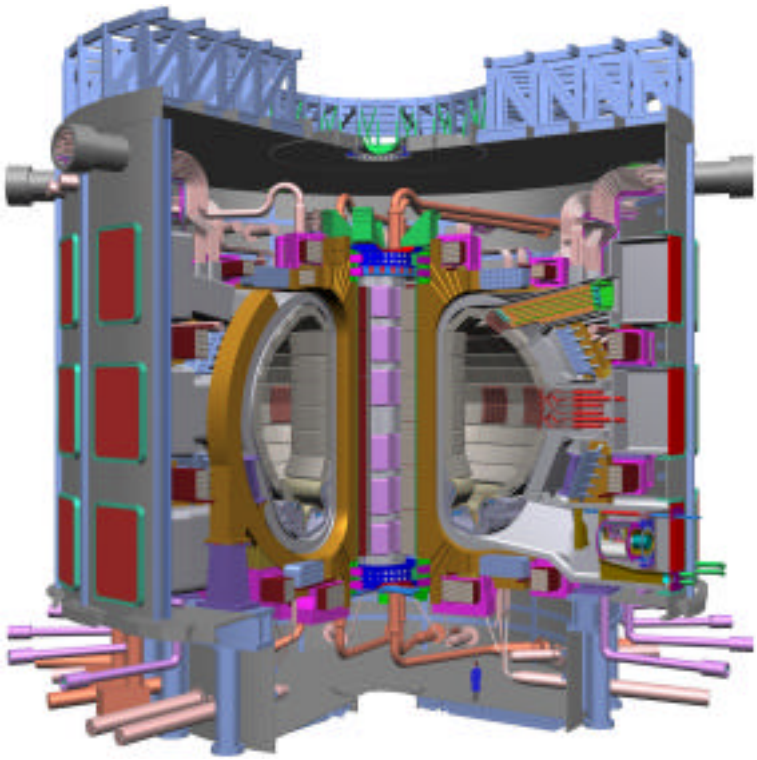

Abbildung 97: ITER

11.5 Trägheitseinschluss

11.5.1 Kompression und Aufheizung des Fusionsbrennstoffs

Beim *Trägheitseinschluss* wird der Fusionsbrennstoff so schnell komprimiert und aufgeheizt, dass ein wesentlicher Bruchteil des Brennstoffs reagiert, bevor die Brennstoffmasse durch die freigesetzte Energie auseinandergerissen wird.

Genau das geschieht bei der Zündung von Fusionswaffen („Wasserstoffbomben“). Die Energie zur Zündung des Fusionsbrennstoffs liefert dabei eine Kernspaltungsbombe. In manchen populären Darstellungen wird das so beschrieben, als ob einfach eine Kernspaltungsbombe in Fusionsbrennstoff eingebettet würde. Eine solche Anordnung würde jedoch nicht funktionieren. Es wäre genau so, wie wenn versucht würde, mit einer Ladung Schiesspulver in einem Kohlehaufen die Kohle zu entzünden. Wenn das Schiesspulver gezündet wird, fliegen die Kohlestücke nach allen Seiten weg, ohne dass sie zu brennen beginnen. In der öffentlich zugänglichen Literatur ist zwar das Prinzip der Energieübertragung von der Kernspaltungsexplosion auf den Fusionsbrennstoff beschrieben worden, aber die Erklärungen sind teilweise widersprüchlich und offenbar sind wesentliche Einzelheiten auch heute immer noch geheim.

Fusionsbrennstoff mit Hilfe einer Kernspaltungsbombe zu zünden, ist offensichtlich eine für die

Energieerzeugung denkbar ungeeignete Methode. Erstens wären die „Zünder“ viel zu teuer. Zweitens wären die einzelnen Explosionen so stark, dass es sehr schwierig wäre, die freigesetzte Energie technisch zu nutzen. Damit das Ganze überhaupt Sinn hätte, müsste ja bei jeder Explosion der Fusionsbrennstoff etwa hundert- bis tausendmal mehr Energie liefern als das Uran oder das Plutonium der Kernspaltungsbombe. Da es aber schwierig ist, Kernspaltungsbomben mit einer Energie von weniger als 1 Kilotonne TNT zu bauen, würden somit bei jeder Explosion die Energie von 100 bis 1000 Kilotonnen TNT freigesetzt. Tatsächlich wurde schon Ende der 50er-Jahre des 20. Jahrhunderts ein Projekt unter dem Namen *PACER* studiert. Dabei sollten in einer unterirdischen Kaverne Wasserstoffbomben gezündet werden. Die dabei freiwerdende Energie sollte genützt werden, indem durch Einleiten von Wasser in die Kaverne Dampf produziert würde, der an der Oberfläche ein Dampfkraftwerk betreiben würde. Wegen der doch ziemlich unsympathischen Aspekte dieses Projekts und weil die zu erwartenden hohen Kosten der Entwicklung und des Betriebs kaum zu amortisieren gewesen wären, wurde das Projekt nicht weiter verfolgt.

Erst als in den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts starke Laser entwickelt wurden, zeichnete sich die Möglichkeit ab, kleine Mengen von Fusionsbrennstoff durch Trägheitseinschluss zu zünden. Später wurde auch die Zündung durch Elektonen- und Ionenstrahlen erforscht. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt jedoch auf der Laserfusion.

11.5.2 Pellets

Der Fusionsbrennstoff wird meist in Form von *pellets* verwendet. Die Pellets sind kleine Hohlkügelchen, die mit einem flüssigen oder festen Gemisch von Deuterium und Tritium gefüllt sind. Es gibt Pellets, die eine recht komplexe innere Struktur aufweisen. Die bei den bisherigen Experimenten verwendeten Kügelchen hatten Durchmesser von 0.2 bis 0.5 mm, während die für die National Ignition Facility (s. Abschnitt 11.5.5) vorgesehenen Kügelchen einen Durchmesser von 2 mm aufweisen (Abbildung 98).

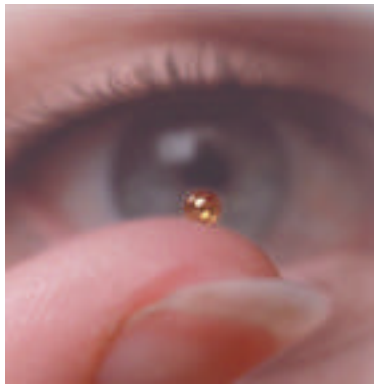

Abbildung 98: Pellet für die National Ignition Facility

Ein einzelner Laser, der *driver*, erzeugt einen Laserstrahl, der in eine Anzahl von Strahlen aufgespalten wird, die dann einzeln um einen Faktor von je 10^{12} oder mehr verstärkt werden. Diese Strahlen werden sodann über Spiegel in eine evakuierte Targetkammer geleitet, wo sie von allen Seiten gleichzeitig auf das Pellet treffen.

Durch die eingestrahlte Energie wird die äusserste Schicht des Pellets so stark aufgeheizt, dass sie verdampft. Der abströmende Dampf erzeugt eine Reaktionskraft auf die Pellet-Oberfläche,

genau so wie der Gasstrahl einer Rakete eine Schubkraft erzeugt. Diese Reaktionskräfte wirken von allen Seiten und bewirken eine Kompression des Pellets. Indem eine Folge von zunehmend stärkeren Laserpulsen eingestrahlt wird, entstehen konzentrisch nach innen laufende Schockwellen, wodurch die Dichte im Zentrum des Pellets um einen Faktor 10^3 bis 10^4 erhöht wird und die Temperatur auf 100 Millionen Grad ansteigt. Dadurch kommt es zur Zündung des D-T-Gemischs, und eine thermonukleare Reaktionsfront läuft nach aussen, wobei mehr Energie freigesetzt wird, als eingestrahlt wurde.

Bei der Kompression können hydrodynamische Instabilitäten auftreten. Zu deren Vermeidung muss die Oberfläche des Pellets perfekt sphärisch sein, und die von allen Seiten auftreffenden einzelnen Laserblitze müssen auf Pikosekunden (10^{-12} s) genau gleichzeitig ankommen. Um eine möglichst gleichmässige „Beleuchtung“ der Pellet-Oberfläche zu erreichen, werden auch *Hohlraum-Targets* (Abbildung 99) verwendet. Dabei befindet sich das Pellet im Inneren eines zylindrischen Hohlraums. Die Laserstahlen treten durch die offenen Stirnflächen des Zylinders ein und heizen dessen Mantelfläche so stark auf, dass diese Röntgenstrahlung emittiert. Diese trifft dann von allen Seiten auf die Pellet-Oberfläche. Dieses Verfahren hat den Vorteil einer gleichmässigeren Aufheizung des Pellets, aber den Nachteil, dass durch die indirekte Heizung Energie verloren geht.

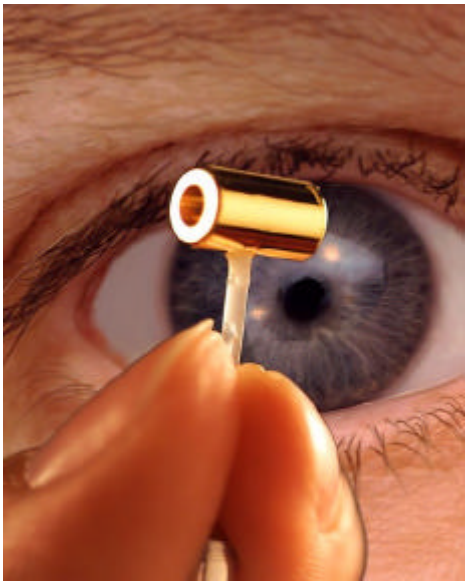

Abbildung 99: Hohlraum-Target für die National Ignition Facility

Für das erfolgreiche Funktionieren eines Reaktors, der durch Laserfusion betrieben wird, sind noch mehrere gravierende Probleme zu lösen. Der Wirkungsgrad der meisten bisher verwendeten Laser ist niedrig, dass netto kaum Energie gewonnen wird. Zudem haben die Laserfusion-Forschungsanlagen Mühe, auch nur einen „Laserschuss“ pro Tag abzufeuern. In einem Kraftwerk müsste die Laseranlage aber etwa 1 bis 10 Laserimpulse pro Sekunde liefern. Ferner könnte die Herstellung der komplexen Pellets viel zu teuer sein.

11.5.3 Shiva

Shiva war einer der ersten starken Laser, mit dem das Prinzip der Laserfusion studiert wurde. Er wurde 1977 in Betrieb gesetzt und hatte 20 Strahlen, die einen Laserpuls von infrarotem Licht

(1062 nm Wellenlänge) mit einer Dauer von 0.5 bis 1 Nanosekunden (10^{-9} s) und einer Energie von 10 kJ lieferten.

11.5.4 Nova

Nova wurde 1984 gebaut und hatte 10 Strahlen Die gesamte Länge der Laserverstärker eines Strahls betrug 200 m. Die Strahlen waren jedoch „gefaltet“, so dass die Laserhalle 20 Laserrohre von je 100 m Länge enthielt.

Abbildung 100: Laserrohre von Nova

Nova lieferte bei einer Wellenlänge von 1054 nm einen Puls von 100 kJ oder bei 351 nm einen Puls von 40 bis 45 kJ. Die Pulslänge war typischerweise 2.5 Nanosekunden, und somit wurde eine Leistung von 16 Terawatt erreicht. Mit einer späteren Modifikation wurde in einem Strahl die Leistung auf 1.25 Petawatt erhöht.

Bei Nova wurden Hohlraum-Targets verwendet, was aber erst 1993 bekannt wurde. Die Technik der Hohlraum-Target hat enge Beziehungen zur Technik der Zündung von Fusionswaffen.

11.5.5 National Ignition Facility

Die *National Ignition Facility* (NIF) ist im Bau und sollte 2010 in Betrieb gehen. Sie hat 192 Strahlen von je 305 m Länge. Ein Puls soll eine Energie von 4 MJ und eine Leistung von 1 Petawatt erreichen. Im November 2006 wurden 96 Strahlen fertiggestellt und in Betrieb genommen. Die Abbildungen 101 und 102 vermitteln einen Eindruck von der Grösse dieser gewaltigen Anlage.

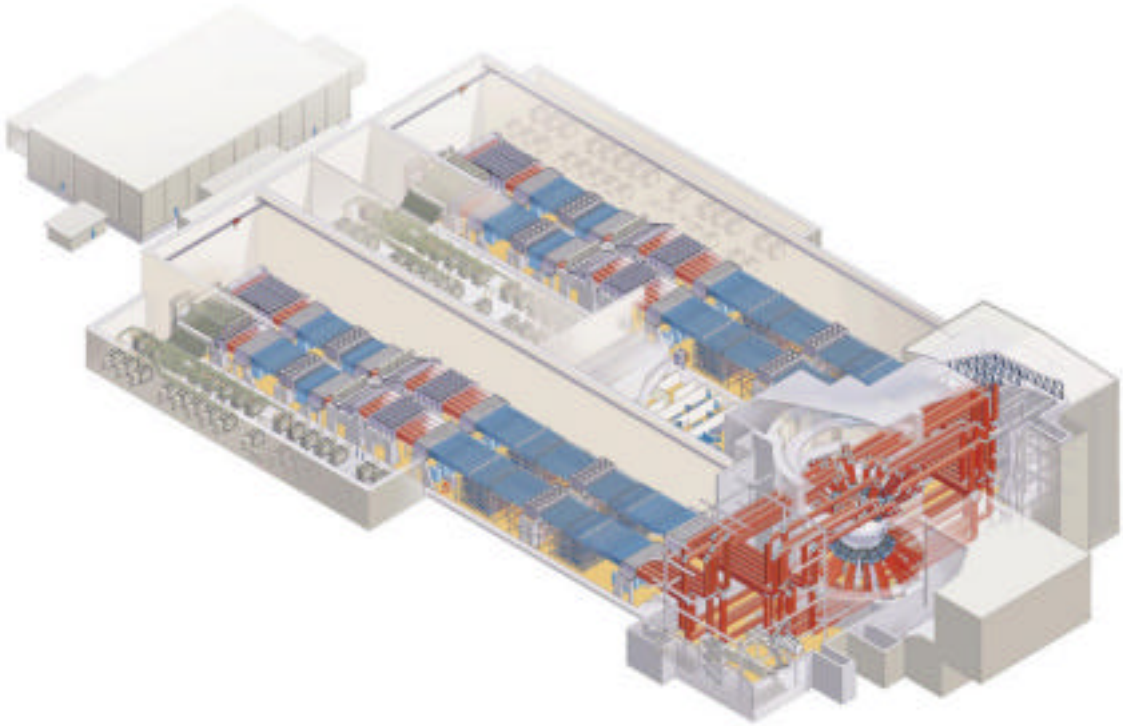

Abbildung 101: National Ignition Facility

Abbildung 102: Targetkammer der NIF

11.6 Prinzip eines Fusionsreaktors

Wie bereits erwähnt, muss das Reaktionsvolumen von einer neutronenabsorbierenden Mantelschicht (*Blanket*) umgeben sein, einerseits als Strahlenschutz und andererseits, weil die Neutronen die nutzbare Energie mit sich führen. Als Blanket kann eine Schicht dienen, in der flüssiges Lithium zirkuliert. Das durch die absorbierten Neutronen aufgeheizte Lithium gibt seine Wärme in einem Wärmeaustauscher an einen Sekundärkreislauf ab, der dann direkt oder indirekt die Turbinen speisen kann. Zudem dient das Lithium zur Erzeugung des in der Natur nicht vorkommenden Tritiums. Das Tritium entsteht hauptsächlich gemäss der Gleichung:

$$^{6}\mathrm{Li} \quad + \quad \mathrm{n} \quad \longrightarrow \quad ^{4}\mathrm{He} \quad + \quad \mathrm{T} \ .$$

11.7 Brennstoff

Deuterium kommt mit einer Häufigkeit von 0.015 % im natürlichen Wasserstoff vor und kann durch verschiedene Verfahren (Destillation, Elektrolyse, chemische Isotopentrennung) aus gewöhnlichem Wasser gewonnen werden.

Lithium kann aus bestimmten Gesteinen, aus der Sole von Salzseen, aus geothermischen und Mineralwasserquellen, aus dem aus Oelfeldern abgepumpten Wasser und aus dem Meerwasser gewonnen werden. Da bei der Fusion total mehr Lithium als Deuterium benötigt wird und zudem die Lithiumvorräte kleiner sind als die verfügbaren Deuteriummengen, sind die Lithiumvorräte massgebend für die durch Fusion insgesamt freisetzbare Energiemenge. Mit den heute bekannten Vorräten könnte das Zehnfache des totalen heutigen Weltenergiebedarfs für weit über 100'000 Jahre gedeckt werden.

11.8 Reaktorprobleme

Selbst wenn es einmal gelingen sollte, ein Fusionsplasma zum Zünden zu bringen, sind noch längst nicht alle Probleme gelöst. Nur einige wenige davon sollen hier erwähnt werden.

Das Wandmaterial der ersten Wand (Schicht zwischen Plasma und Lithium) muss bei hoher Temperatur (ca. 500 bis 800°C) mit Lithium verträglich sein, eine möglichst geringe Neutronenabsorption aufweisen und einer sehr starken Strahlenbeanspruchung standhalten. Vor allem durch den extrem hohen Neutronenfluss erleidet das Wandmaterial eine ganze Reihe von verschiedenartigen Strahlenschäden und wird dabei radioaktiv.

Es muss damit gerechnet werden, dass die erste Wand in bestimmten Intervallen ausgewechselt werden muss, was wegen der starken Radioaktivität der Wand keine einfache Massnahme ist.

Damit überhaupt eine positive Energiebilanz möglich wird, müssen beim magnetischen Einschluss die riesigen Spulen für die starken Magnetfelder aus supraleitendem Material hergestellt werden.

Auch bei der Fusion mit Trägheitseinschluss sind noch gewaltige Probleme zu lösen. Die explodierenden Pellets sollten einerseits ringsum von einem Blanket umgeben sein und anderseits von allen Seiten von den Laser-, Elektronen- oder Ionenstrahlen getroffen werden können, was offensichtlich zu konstruktiven Schwierigkeiten führt. Bei einem Fusionsreaktor müssten etwa 10 Pellets pro Sekunde von den Laser-, Elektronen- oder Ionenstrahlen präzise getroffen werden (möglicherweise in freiem Flug inmitten der Turbulenzen der vorangehenden Mikroexplosion), während bisher in den Versuchsanlagen die Pellets vor jedem „Laserschuss“ in aller Ruhe exakt am richtigen Ort justiert werden konnten.

11.9 Sicherheitsprobleme

Bei einem Versagen des Magnetfeldes in einem Tokamak kommt das Plasma mit der Wand in Kontakt, wodurch Metallatome freigesetzt werden. Da durch diese die Verluste stark erhöht werden, erlischt die Fusionsreaktion sofort. Die im Plasma gespeicherte Energie ist relativ gering und kann ausser an der Wand keinen Schaden anrichten.

Das grösste Gefährdungspotential bildet das radioaktive Tritium, das aber mit den üblichen konstruktiven Sicherheitsmassnahmen (Sicherheitsgebäude) auch beim grössten denkbaren Unfall sicher zurückgehalten werden kann.

Die in dem grossen Magnetfeldvolumen gespeicherte Energie ist recht beträchtlich. In einem Störfall muss diese Energie sicher abgeführt werden. Entsprechende Sicherheitsvorrichtungen sind aber bekannt und bewährt.

Die Sicherheitsmassnahmen gegen Lithiumbrände sind dieselben wie die bei schnellen Brütern gegen Natriumbrände.

Bei der Fusion selbst entsteht im Gegensatz zur Fission kein radioaktiver Abfall. Lediglich die Strukturen des Blankets im Bereich der ersten Wand werden – wie gesagt – durch die Neutronenbestrahlung aktiviert. Die dabei entstehenden Stoffe sind jedoch nicht flüchtig und haben relativ kurze Halbwertszeiten, wodurch das Problem der radioaktiven Abfälle stark entschärft wird. Möglicherweise können sogar nach relativ kurzer Zeit die Strukturmaterialien wieder verwendet werden.

11.10 Der lange Weg zum Fusionsreaktor

Wie in Abschnitt 11.1 erwähnt, können Kernfusionen im Laboratorium mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern durchgeführt werden. John Douglas Cockroft (1897–1967) und Ernest Walton (1903–1995) gelang 1932 die erste durch beschleunigte Teilchen ausgelöste Kernreaktion. Es war die Fusionsreaktion

$$\mathrm{H} \;+\; {}^{7}\mathrm{Li} \;\longrightarrow\; {}^{4}\mathrm{He} \;+\; {}^{4}\mathrm{He}\;.$$

Oliphant, Paul Harteck (1902–1985) und Rutherford entdeckten 1934 das Wasserstoffisotop Tritium. Als sie Deuterium mit Deuteronen (Deuteriumkerne) beschossen, entstand Tritium durch die Fusionsreaktion

$$\mathrm{D} \;+\; \mathrm{D} \;\longrightarrow\; \mathrm{H} \;+\; \mathrm{T}\;.$$

Die ersten Versuche mit thermonuklearen Plasmen wurden 1947 am *Imperial College* in London durchgeführt, und 1954 begannen die Experimente mit der ZETA-Anlage (Zero Energy Toroidal Assembly) in *Harwell*, einer bereits relativ grossen Anlage, mit der Temperaturen von 5 Millionen Grad erreicht wurden.

1957 erschien in der August-Ausgabe der Zeitschrift *hobby* ein Artikel, in dem das von einem Dr. Hsue-shen Tsien entwickelte Konzept eines Fusionsreaktors vorgestellt wurde. In einer Brennkammer von 1000 Metern Länge und 100 Metern Durchmesser sollte eine Fusionsflamme von 120 Metern Länge und 60 Metern Durchmesser mit einer Temperatur von 120 Millionen Grad und unter einem Druck von 100 bar brennen. Die „Verbrennungsgase“ sollten in Gasturbinen geleitet werden, mit denen die Generatoren angetrieben würden, die eine totale elektrische Leistung von 300’000 Megawatt (d.h. rund 300mal mehr als ein grosses KKW) liefern sollten (Abbildung 103).

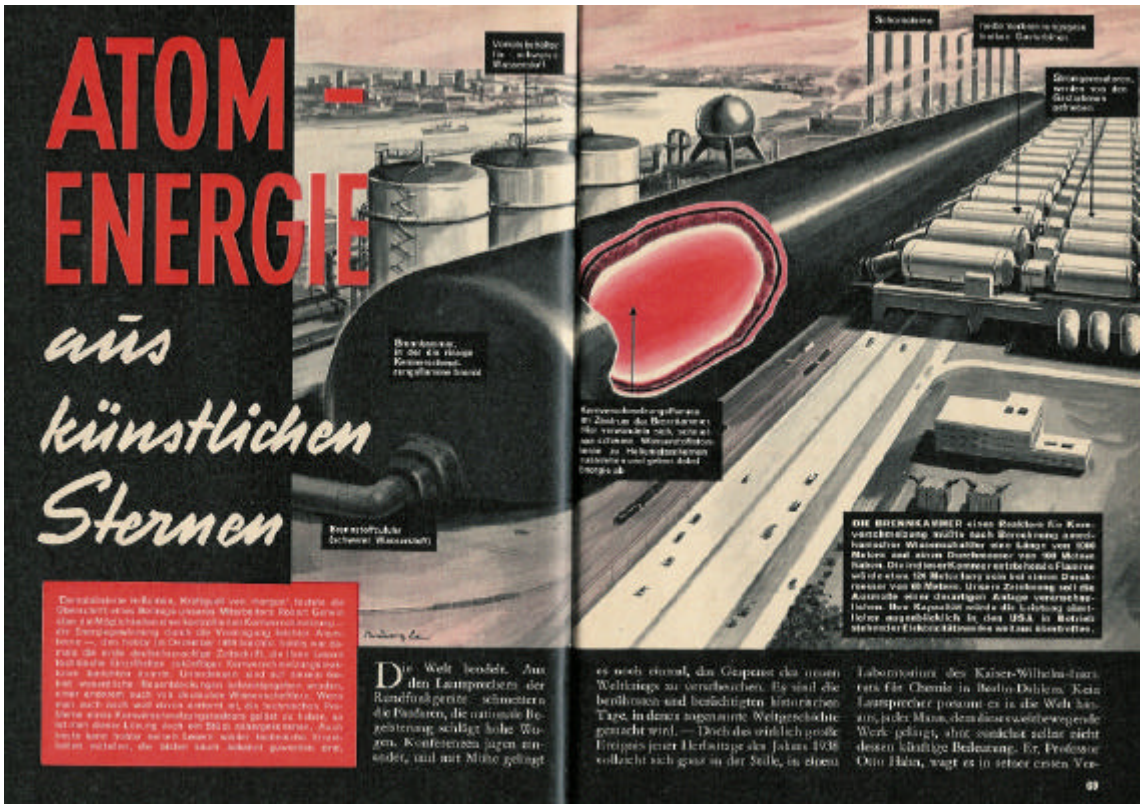

Abbildung 103: Fusionskraftwerk (*hobby*, August 1957)

Das Bild zeigt ein amüsantes Detail: Die Rohrleitung im Vordergrund für die „Brennstoffzufuhr“ hat einen Durchmesser von gut 10 Metern. Eine einfache Rechnung ergibt jedoch, dass für die Zufuhr des schweren Wasserstoffs zur Speisung einer Fusionsflamme, die eine thermische Leistung von 900 GW liefert, ein Röhrchen mit 6 mm Innendurchmesser ausreichen würde. Selbst wenn der Reaktor bei gleicher Leistung konventionell mit Oel befeuert würde, müsste der Innendurchmesser der Brennsto- eitung nicht mehr als 2 Metern betragen.

Weil der Heizwert des Fusionsbrennstoffs rund 8 Millionen mal grösser ist als der von Oel, genügt ein extrem geringer Brennstoffzufluss, um die riesige thermische Leistung von 900 GW zu erzeugen. Dementsprechend gering ist aber auch das abströmende Volumen heisser Gase. Es würde niemals ausreichen, um damit Gasturbinen anzutreiben. Um genügend Gas für die Turbinen zu liefern, müssten der Fusionsflamme relativ grosse Mengen von nichtfusionierendem Gas zugeführt werden. Dadurch würde aber die Fusionsflamme sofort erlöschen. Offenbar ist ein Fusionsreaktor nicht ganz so einfach zu realisieren, wie sich das Dr. Tsien anscheinend vorgestellt hatte.

Die in Abschnitt 11.4.3 erwähnten Probleme führten bald dazu, dass der in den ersten Jahren der Fusionsforschung vorherrschende Optimismus einer grossen Ernüchterung wich. Vorübergehend bezweifelten manche Experten sogar ernsthaft, dass eine kontrollierte selbsterhaltende Kernfusion überhaupt möglich sei. Während in den ersten Jahren relativ schnell Maschinen gebaut wurden, von denen die Freisetzung von Fusionsenergie erwartet wurde, konzentrierten sich nun in den folgenden Jahrzehnten die Anstrengungen auf eine systematische Erforschung der Plasmaphysik.

Nur vier Jahre nach der Entdeckung der Kernspaltung konnte eine kontrollierte selbsterhaltende Kernspaltungs-Kettenreaktion in Gang gesetzt werden, aber nach mehr als 60 Jahren intensiver

Forschung im Bereich der Kernfusion ist es noch nicht gelungen, eine selbsterhaltende kontrollierte Kernfusion zu starten. Dies zeigt deutlich, dass ein Fusionsreaktor sehr viel schwieriger zu verwirklichen ist als ein Fissionsreaktor.

Damit in einem thermonuklearen Plasma eine Fusion selbsterhaltend ablaufen kann, muss das sogenannte Fusionsprodukt einen bestimmten Wert überschreiten. Das Fusionsprodukt ist definiert als

$$n \cdot \tau \cdot T\,, \tag{13}$$

wobei n die Ionendichte (Anzahl Ionen pro m^3), τ die Einschlusszeit (in Sekunden, ein Mass für die Energieverluste des Plasmas) und T die Temperatur (in Kelvin) bedeuten. Abbildung 104 zeigt den Bereich, in dem das Plasma zündet und selbsterhaltend brennt, und die Werte des Fusionsprodukts und der Temperatur, die von den verschiedenen Fusionsexperimenten erreicht wurden, wobei allerdings nur die Experimente mit magnetischem Einschluss dargestellt sind.

Die allerersten Fusionsexperimente liegen noch ausserhalb (d.h. unterhalb) des Bereichs des Diagramms. Bei diesen war das Fusionsprodukt noch mehr als 1 Million mal kleiner als der Minimalwert des Brennbereichs. Durch die systematische Forschung in der Plasmaphysik konnten aber in den letzten Jahrzehnten die vielfältigen Plasmainstabilitäten allmählich verstanden und/oder behoben werden, und die Werte, die mit den heutigen Maschinen erreicht werden, sind weniger als einen Faktor 10 vom Brennbereich entfernt. Der ITER sollte den Brennbereich erreichen, d.h. in ihm sollte zum erstenmal eine kontrollierte Kernfusion selbsterhaltend ablaufen.

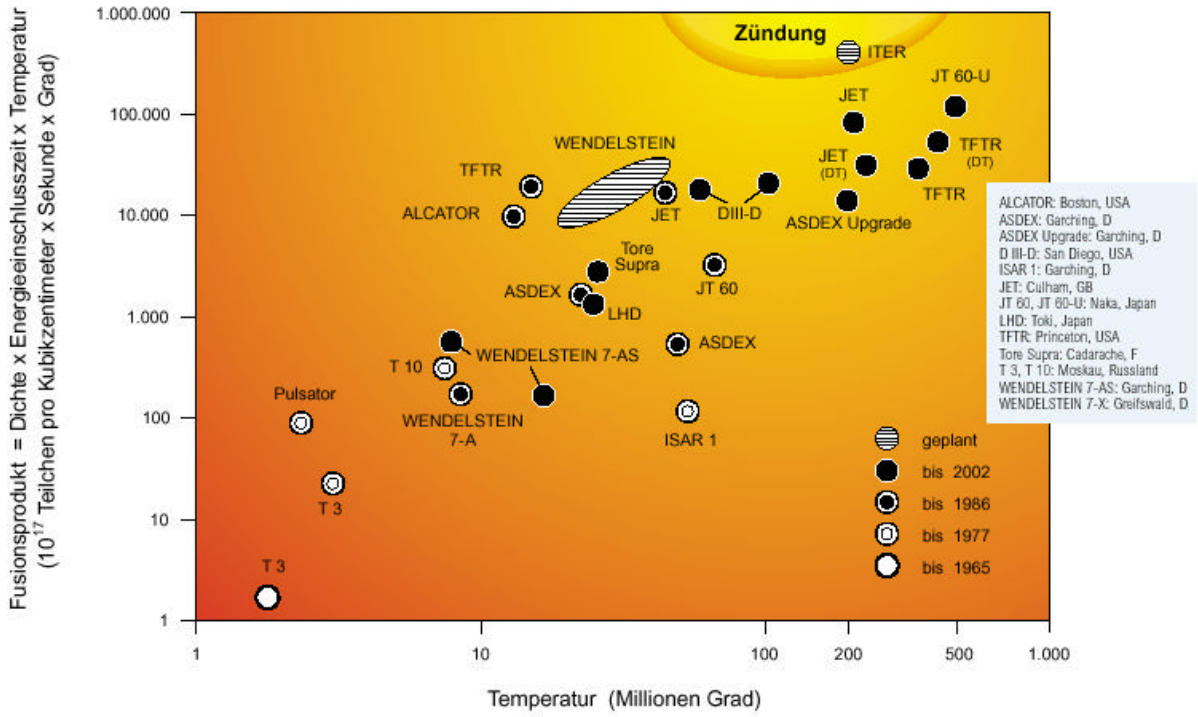

Abbildung 104: Fusionsprodukt und Brennbereich eines thermonuklearen Plasmas

Karten

Abbildung 105: Oak Ridge

Abbildung 106: Hanford und Los Alamos

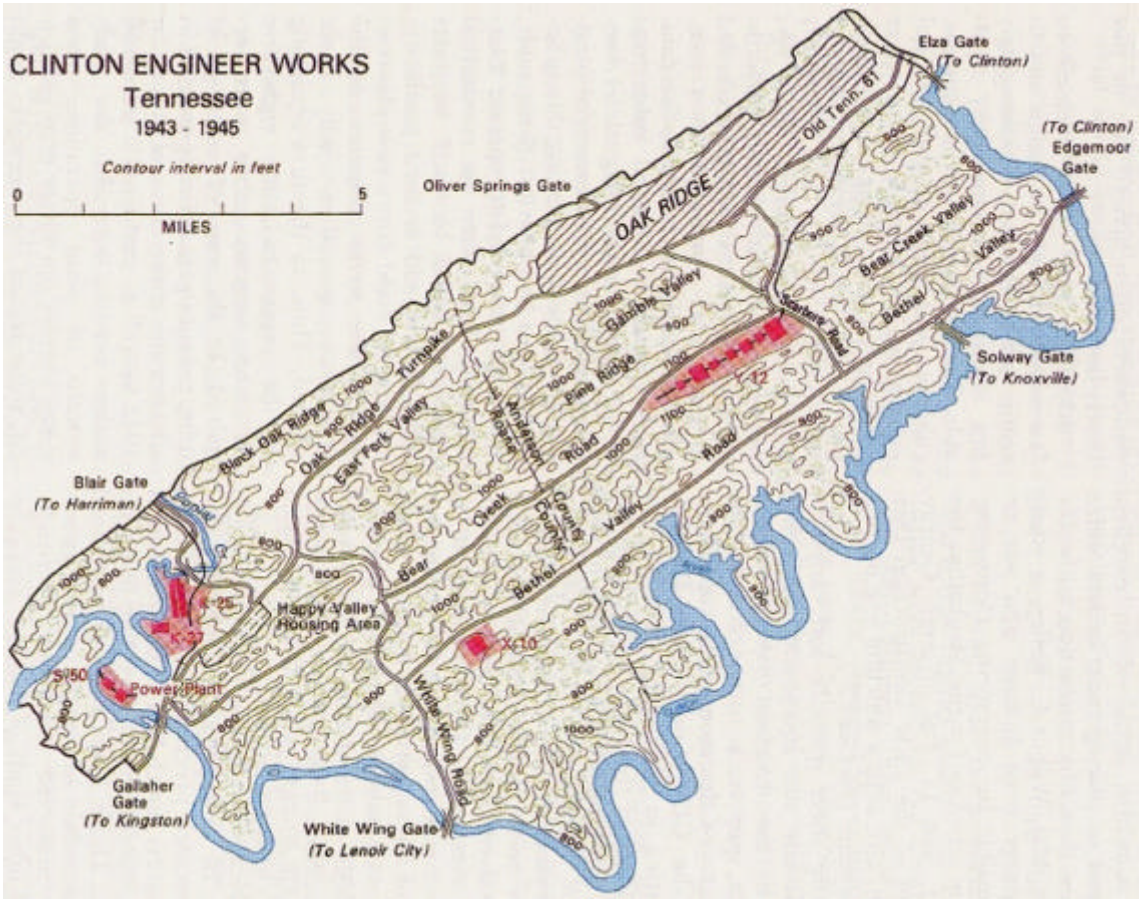

Abbildung 107: Oak Ridge

Y-12	Elektromagnetische Separation
K-25, K-27	Gasdiffusionsanlagen
X-10	Clinton-Pile
S-50	Thermodiffusionsanlage
Power Plant	Kraftwerk

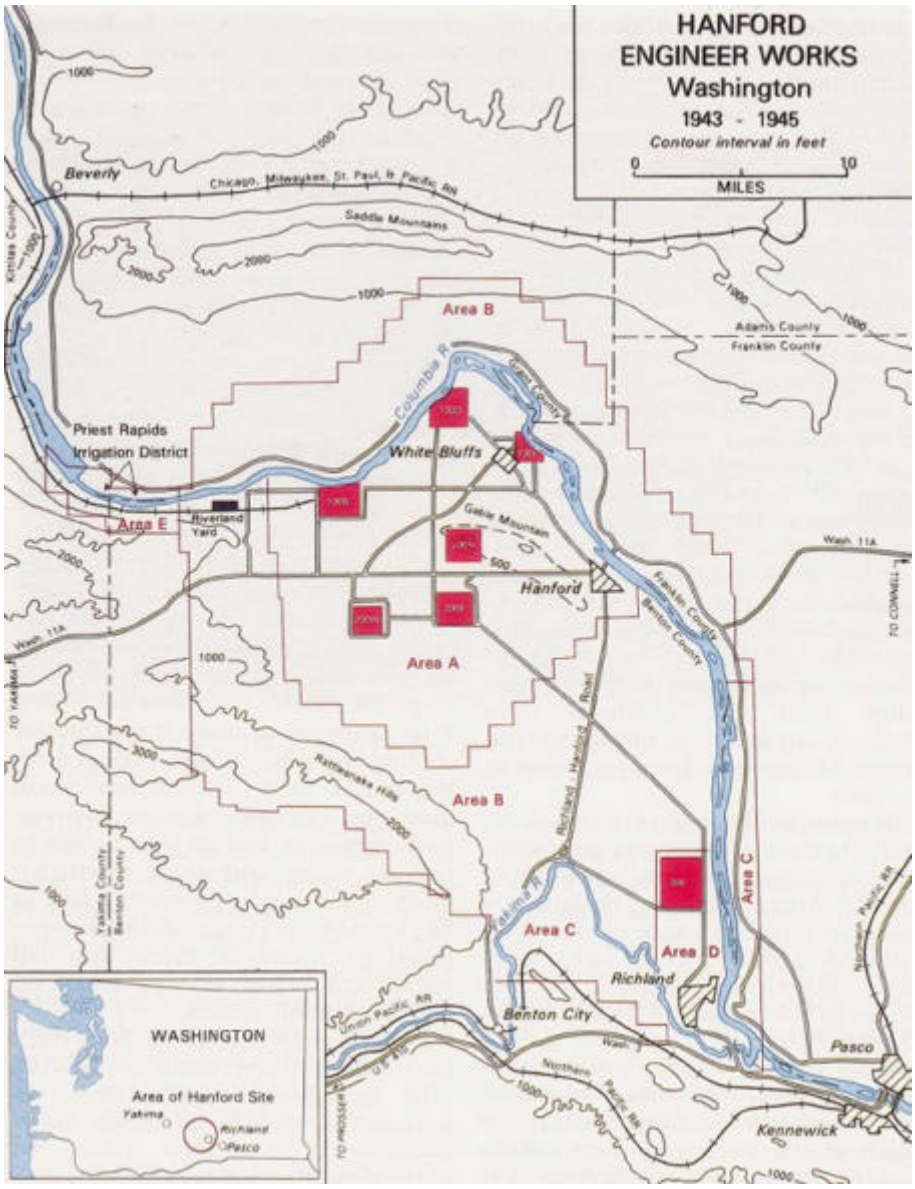

Abbildung 108: Hanford

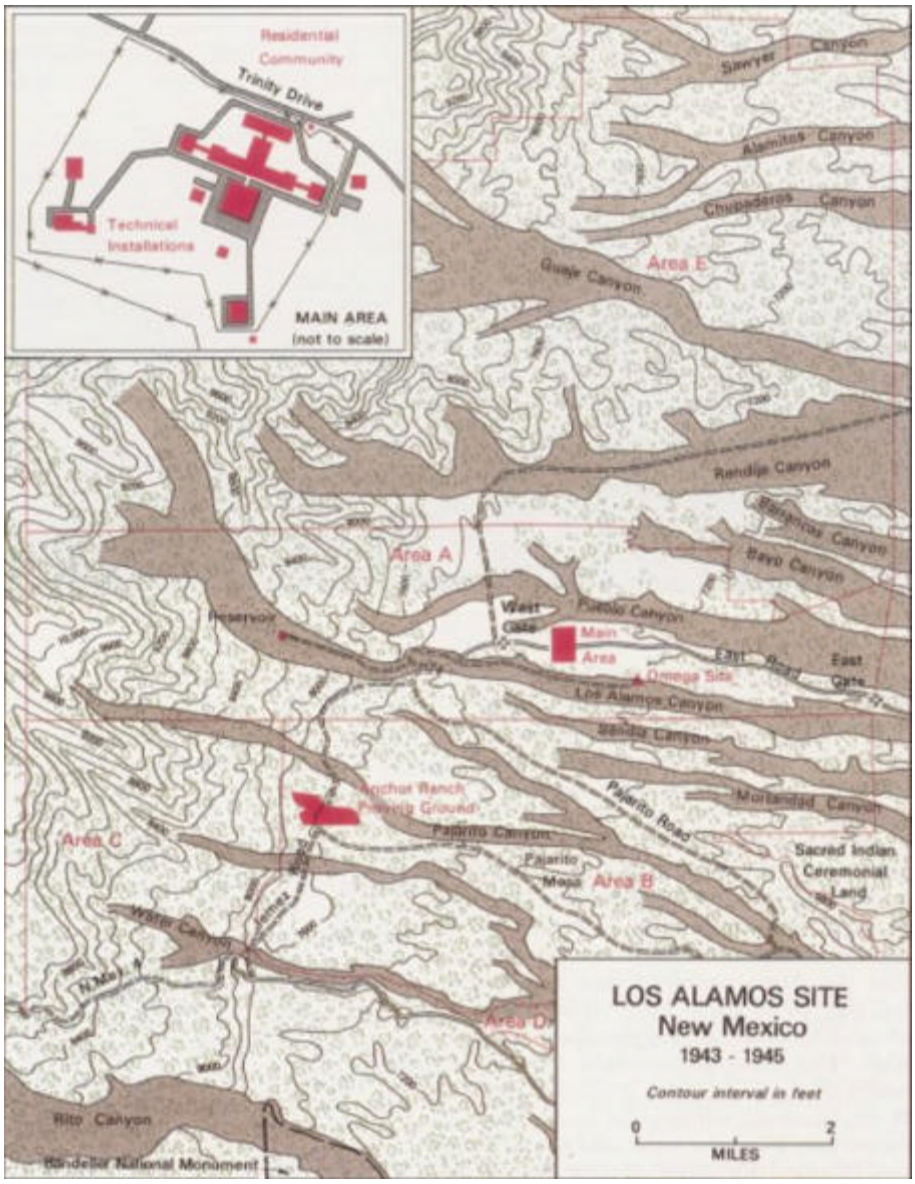

Abbildung 109: Los Alamos

Die eingefügte Karte oben links zeigt einen im Dezember 1942 entworfenen Plan der Gebäude. Die schliesslich gebaute „Technical Area 1“ ist in Abbildung 110 wiedergegeben.

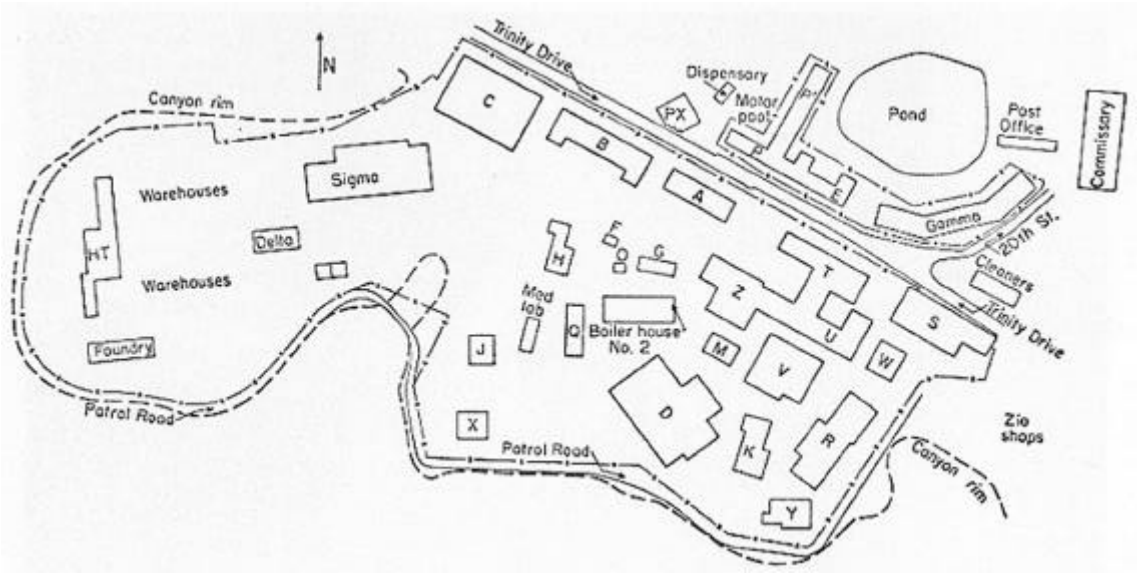

Abbildung 110: Los Alamos, Technical Area 1

Gebäude[46]:

A	Administration
B	Büros, Konferenzräume, Laboratorien
C	Werkstatt
D	Chemie und Metallurgie von Uran und Plutonium
E	Theorie
G	Neutronenquelle
H	Radiochemie
HT	Uran-Bearbeitung
J	Laboratorium
M	Verarbeitung von angereichertem Uran
O	Lager für radioaktive Quellen
P	Büros
Q	Strahlenschutzabteilung
R	Laboratorium
S	Lager
T	Büros, Bibliothek, Photolabor
U	Elektronikwerkstatt
V	Werkstatt
W	Van de Graaff-Generator
X	Zyklotron
Y	Kältelaboratorium
Z	Cockroft-Walton-Generator
Delta	Bearbeitung von Beryllium
Gamma	Waffenphysik
Sigma	Guss und Bearbeitung von Uran

[46] Der Verwendungszweck einzelner Gebäude konnte mit Hilfe von in verschiedenen Quellen verstreuten Informationen ermittelt werden. Leider ist dies jedoch nicht für alle Gebäude gelungen.

Abbildung 111: Culham

Abbildung 112: Cadarache

Anhang A
Statistische Schwankungen

Ein Effekt X soll einerseits durch die Ursache A und andererseits durch die Ursache B bewirkt werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass X durch A verursacht wird, sei p_A, die Wahrscheinlichkeit, dass X durch B verursacht wird, sei p_B. Die Wahrscheinlichkeit p_B sei viel kleiner als p_A. Wie gross muss eine Stichprobe sein, damit der Effekt der Ursache B sicher nachgewiesen werden kann?

Diese Frage soll anhand eines konkreten Beispiels untersucht werden.

Die natürliche Häufigkeit der Krebstodesfälle beträgt 20 Prozent.[47] Es wird vermutet[48], dass eine bestimmte niedrige Strahlendosis eine zusätzliche Krebshäufigkiet von 1 Promille bewirkt. Wie gross muss die Population sein, damit sich dieser Effekt sicher nachweisen lässt?

Bei einer Gruppe von 1000 Personen sind 200 Krebstodesfälle zu erwarten. In einer bestimmten Gruppe von 1000 Personen werden selten gerade genau 200 Krebstodesfälle auftreten, sondern es werden etwas mehr oder etwas weniger Fälle sein.

Es gibt eine *Streuung* oder *Standardabweichung*. Diese ist in der Regel gleich der Wurzel aus dem *Erwartungswert*. Für einen Erwartungswert von 200 beträgt somit die Streuung 14.1. In 68 % aller Fälle liegt die Abweichung des gemessenen Wertes vom Erwartungswert innerhalb der Standardabweichung, und in rund 95 % aller Fälle ist die Abweichung kleiner als zweimal die Standardabweichung, also kleiner als 28.

Wenn also eine ganze Anzahl von Stichproben von je 1000 Personen betrachtet wird, so liegt in 95 % dieser Proben die Zahl der Krebstodesfälle zwischen 172 und 228.

Eine durch die Strahlung bewirkte zusätzliche Krebshäufigkeit von 1 Promille ergibt einen Erwartungswert von 1 zusätzlichen Krebstodesfall. Offensichtlich lässt sich ein zusätzlicher Fall nicht nachweisen, da der Schwankungsbereich der Krebstodesfälle in den Stichproben 56 Fälle beträgt.

Wird die Stichprobe auf 10'000 Personen erhöht, so beträgt der Erwartungswert der natürlichen Krebstodesfälle 2000, die Standardabweichung 44.7 und der Schwankungsbereich (mit Wahrscheinlichkeit 95 %) 1911 bis 2089. Der Erwartungswert der strahlenbedingten Fälle ist 10 und somit immer noch viel kleiner als der Streubereich.

Bei einer Stichprobengrösse von 100'000 Personen ist der Erwartungswert 20'000, die Streuung 141.4, der Schwankungsbereich 19'717 bis 20'283 und es werden zusätzlich 100 Fälle erwartet. Noch immer heben sich die zusätzlichen Fälle nicht von den zufälligen Schwankungen ab.

Für 1'000'000 ergeben sich für die „natürlichen Fälle“ die Werte 200'000, 447 und 199'106 bis 200'894. Es werden 1000 zusätzliche Fälle erwartet, also eine Zahl, die etwas grösser ist als der zweifache Wert der Standardabweichung. Ein Wert von 201'000 Fällen könnte aber immer noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit rein zufällig bedingt sein.

Erst bei einer Stichprobengrösse von 10'000'000 Personen heben sich die durch die Strahlung zusätzlich bewirkten Fälle eindeutig von den statistischen Schwankungen ab. Es werden 2'000'000

[47] Der tatsächliche Wert liegt zwischen 20 und 25 Prozent. Für das Beispiel wird ein Wert von genau 20 Prozent angenommen.

[48] durch Extrapolation des bei relativ hohen Dosen festgestellten Zusammenhangs zwischen Dosis und Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Krebs

natürliche Fälle erwartet mit einem Schwankungsbereich von 1'997'172 bis 2'002'828. Die infolge der Strahlung erwarteten 10'000 Fälle ergeben einen totalen Erwartungswert von 2'010'000 Fällen, also eine Zahl, die (mit grosser Wahrscheinlichkeit) ausserhalb des Bereichs der statistischen Schwankungen liegt.

Es ist klar, dass Stichproben von 10'000'000 Personen sich nicht realisieren lassen. Es müsste eine Gruppe von 10'000'000 Personen, die der zur Diskussion stehenden kleinen zusätzlichen Strahlendosis ausgesetzt ist, verglichen werden mit einer ebenso grossen Kontrollgruppe von Personen, die nicht dieser zusätzlichen Strahlendosis ausgesetzt ist und im übrigen in allen Beziehungen den genau gleichen Bedingungen unterworfen ist wie die erste Gruppe.

Somit lassen sich infolge der statistischen Schwankungen die stochastischen Wirkungen sehr kleiner Strahlendosen im allgemeinen nicht untersuchen.

Ganz allgemein haben statistische Aussagen und Wahrscheinlichkeitsüberlegungen ihre Tücken. Ein Reihe von (un)schönen (und beunruhigenden) Beispielen findet sich zum Beispiel in [4],[49] [9] und [37].

[49] In diesem Buch wird auch an Hand eines sehr anschaulichen Beispiels gezeigt, was von den immer wieder zitierten Häufungen von Leukämiefällen in der Umgebung von Kernkraftwerken zu halten ist.

Anhang B
Mathematische und physikalische Begriffe und Gesetze

Dieser Anhang kann selbstverständlich weder ein Mathematik- noch ein Physik-Lehrbuch ersetzen. Es sollen lediglich die wichtigsten mathematischen und physikalischen Begriffe und Gesetze, die in diesem Skript verwendet werden, möglichst kurz und einfach erklärt werden. Auf Beweise und Herleitungen und auch auf mathematische Strenge wird verzichtet.

Die Erklärungen sollten hinreichend sein, dass die Gedankengänge im Manuskript nachvollzogen werden können. Falls jedoch die eine oder andere knappe Erklärung die Leserin oder den Leser veranlasst, sich anhand eines Lehrbuches genauer zu informieren, hat sie ihren Zweck ebenfalls erfüllt.

A

A = Ampere

allotrope Modifikationen

Allotrope Modifikationen sind verschiedene Kristallformen der gleichen chemischen Substanz.

Alphateilchen

Alphateilchen sind nichts anderes als die Kerne der Atome von Helium[50]. Sie bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

Ampere

1

André Marie Ampère (1775–1836): französischer Mathematiker und Physiker.

2

Ampere ist die Einheit für den elektrischen Strom.

Äquivalentdosis

Siehe Strahlendosis.

[50] Gemeint ist ^{4}He. Natürliches Helium besteht zu 99.999863 % aus ^{4}He und zu 0.000137 % aus ^{3}He. Die Atomkerne von ^{4}He bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen, die Atomkerne von ^{3}He aus zwei Protonen und einem Neutron.

Arbeit

Wird der Angriffspunkt einer Kraft $\vec{F}$ um eine kleine Strecke $d\vec{s}$ verschoben (Abbildung 113), so ist die dabei geleistete Arbeit definiert als

$$dW = F\,ds\,\cos\alpha\,. \tag{14}$$

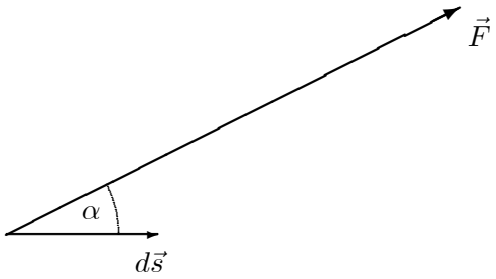

Abbildung 113: Definition der Arbeit

Das d bei $d\vec{s}$ bedeutet, dass nur eine sehr kleine Verschiebung betrachtet wird. Dementsprechend ist auch die geleistete Arbeit dW sehr klein, was wieder durch das d in dW ausgedrückt wird. Eine grössere Verschiebung kann aus vielen kleinen Schritten $d\vec{s}$ zusmmengesetzt werden. Dabei können sowohl die Richtungen von $d\vec{s}$ und $\vec{F}$ als auch der Betrag F bei jedem kleinen Schritt $d\vec{s}$ sich ändern. Die totale Arbeit ist dann die Summe der kleinen Beiträge dW, was durch die Beziehung

$$W = \int F\,\cos\alpha\,ds \tag{15}$$

ausgedrückt wird. Das Symbol $\int$ bedeutet „Integral“, was, vereinfacht gesagt, nichts anderes ist als eine Summe von unendlich vielen unendlich kleinen Summanden.

cos steht für Kosinus. Der Verlauf der Kosinusfunktion ist in Abbildung 114 wiedergegeben.

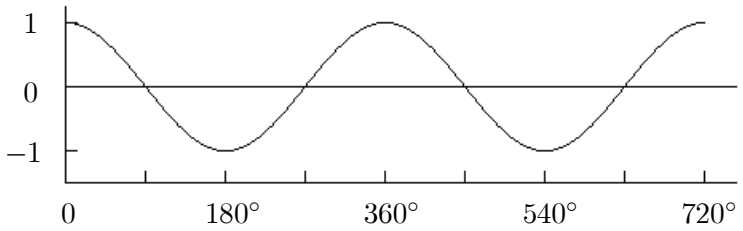

Abbildung 114: Kosinusfunktion

Für eine geradlinige Verschiebung einer konstanten Kraft, die parallel ist zur Verschiebungsrichtung, ist $\alpha = 0$ und $\cos\alpha = 1$, und es ergibt sich die einfache Beziehung

$$W = F\,s\,, \tag{16}$$

was in Worten manchmal als „Arbeit ist gleich Kraft mal Weg“ ausgedrückt wird. Diese einfache Regel gilt aber nur unter den oben genannten Voraussetzungen.

Wenn die Kraft $\vec{F}$ senkrecht steht zur Verschiebungsrichtung $d\vec{s}$, ist $\alpha = 90°$ und $\cos\alpha = 0$ und somit $dW = 0$. Wird also der Angriffspunkt einer Kraft senkrecht zur Richtung der Kraft verschoben, so leistet die Kraft keine Arbeit.

Die Einheit der Arbeit ist das Joule. 1 J = 1 Nm .

bar

bar ist eine Druckeinheit.

1 bar = 10^5 N/m^2

Baryonen

Die *Baryonen* bestehen aus drei Quarks und haben daher halbzahligen Spin. Sie sind somit Fermionen und gehorchen dem Pauli-Prinzip. Zu den Baryonen gehören einerseits die *Nukleonen*, also Protonen und Neutronen, und andererseits schwerere Teilchen, die *Hyperonen* genannt werden.

Beschleuniger

Siehe *Teilchenbeschleuniger*.

Beschleunigung

Die *Beschleunigung* ist die Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}\,. \tag{17}$$

Die so definierte Beschleunigung a ist die mittlere Beschleunigung während des Zeitintervalls Δt. Für die momentane Beschleunigung ergibt sich (vgl. Abschnitt „Geschwindigkeit“):

$$a = \frac{dv}{dt}\,. \tag{18}$$

Die Einheit der Beschleunigung ist m/s^2.

Im allgemeinen Fall ist die Beschleunigung als Vektor darzustellen (vgl. Abschnitt „Geschwindigkeit“):

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}\,. \tag{19}$$

Beugung

In homogenen Medien breiten sich Wellen geradlinig aus. Falls das Medium nicht homogen ist, ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Wellen. Diese Richtungsänderung wird als *Brechung* oder *Refraktion* bezeichnet. Brechung tritt auf, wenn eine Welle auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Wellengeschwindigkeiten auftrifft oder wenn eine Welle in einem inhomogenen Medium läuft, in dem die Wellengeschwindigkeit ortsabhängig ist.

Die Wellenausbreitung wird auch durch Hindernisse beeinflusst. Die durch Hindernisse verursachte Abweichung von der Geradlinigkeit der Ausbreitung in einem homogenen Medium wird als *Beugung* oder *Diffraktion* bezeichnet.

Bosonen

Teilchen mit ganzzahligem Spin werden nach dem indischen Physiker Satyendra Nath Bose (1894–1974) *Bosonen* genannt.

Brennstoff

Spaltstoffe, wie Uran-235 oder Plutonium-239, die zur Freisetzung von Kernenergie dienen, werden häufig als *Kernbrennstoff* oder kurz als *Brennstoff* bezeichnet.

C

C = Coulomb

Cockroft-Walton-Generator

Ein *Cockroft-Walton-Generator* oder *Kaskaden-Generator* ist ein Teilchenbeschleuinger. Er beruht auf der von Heinrich Greinacher (1880–1974) erfundenen Spannungsvervielfachungs-Schaltung. Abbildung 115 zeigt das Prinzipschema.

Mit Kaskadengeneratoren werden Spannungen von ca. 3 MV erreicht. Der erste von Cockroft und Walton gebaute Kaskadengenerator hatte eine Spannung von 700 kV.

Die zu beschleunigenden Ionen werden in einer *Ionenquelle* produziert. Wenn Protonen beschleunigt werden sollen, werden in einer Wasserstoffatmosphäre durch Elektronenbombardement oder durch ein Hochfrequenzfeld Wasserstoffionen H^+ (Protonen) erzeugt.

Coulomb

1

Charles Augustin de Coulomb (1736–1806): französischer Physiker und Ingenieur.

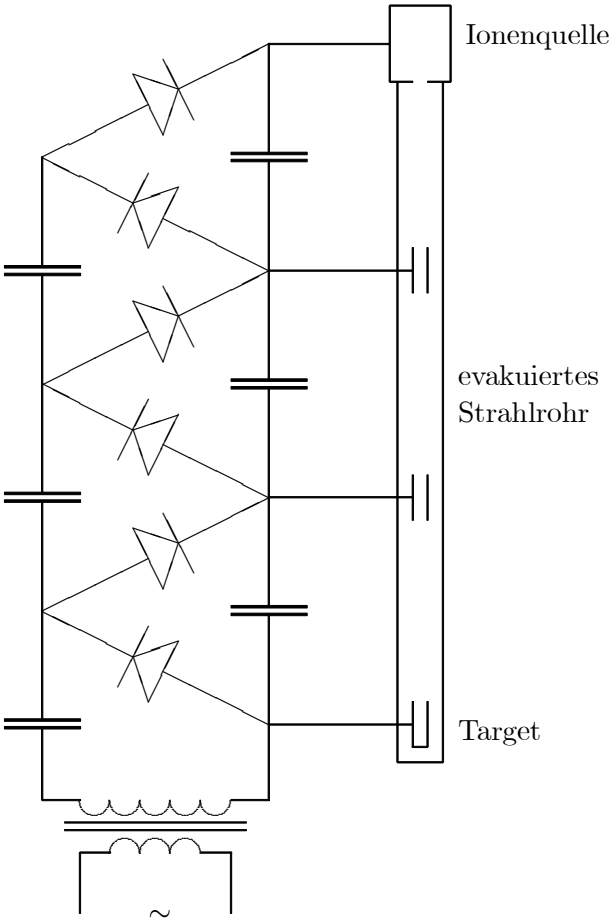

Abbildung 115: Kaskadengenerator

2

Coulomb ist die Einheit der elektrischen Ladung.

1 C = 1 As .

Deuterium

Deuterium, auch *schwerer Wasserstoff* genannt, ist das Wasserstoff-Isotop ^{2}H. Der Kern eines Deuteriumatoms besteht aus einem Proton und einem Neutron.

Deuteron

Das *Deuteron* ist der Kern des Deuteriumatoms.

Dosis

Siehe Strahlendosis.

Drehimpuls

Der *Drehimpuls* einer (punktförmigen) Masse m bezüglich einer Achse ist definiert als

$$L = m\, v_\perp\, r\,. \tag{20}$$

Dabei ist $v_\perp$ die zur Drehachse senkrecht stehende Komponente der Geschwindigkeit der Masse, und r ist der Abstand der Masse von der Achse.

Ein ausgedehnter Körper kann als aus vielen kleinen Massenelementen zusammengesetzt gedacht werden. Wenn er sich um eine Achse dreht, ist sein gesamter Drehimpuls gleich der Summe der Drehimpulse der vielen kleinen Massenelemente:

$$L = m_1 v_1 r_1 + m_2 v_2 r_2 + m_3 v_3 r_3 + \ldots + m_n v_n r_n\,. \tag{21}$$

Mit Hilfe des Summationssymbols Σ lässt sich eine solche Summe kompakter und klarer schreiben:

$$L = \sum_{i=1}^{n} m_i v_i r_i\,. \tag{22}$$

Für die Rotation um eine feste Achse gilt die einfache Beziehung

$$L = J\,\omega\,. \tag{23}$$

Dabei ist J das *Massenträgheitsmoment*, und ω ist die *Winkelgeschwindigkeit*.

Drehimpuls(erhaltungs)satz

Der Drehimpuls eines Systems, auf das kein resultierendes äusseres Drehmoment wirkt, bleibt erhalten.

Der Drehimpulserhaltungssatz manifestiert sich besonders schön bei einer Pirouette eines Eiskunstläufers oder einer Eiskunstläuferin. Wenn eine Drehung mit ausgestreckten Armen (und einem ausgestreckten Bein) gestartet wird, hat der Läufer oder die Läuferin eine bestimmte Drehgeschwindigkeit (*Winkelgeschwindigkeit*) und damit einen bestimmten Drehimpuls. Wenn nun die Arme (und das ausgestreckte Bein) angezogen werden, ändert sich die Massenverteilung (d.h. das *Massenträgheitsmoment* wird kleiner). Da praktisch kein Drehmoment wirkt, muss der Drehimpuls erhalten bleiben und deshalb nimmt die Drehgeschwindigkeit zu (s. Abbildung 116). Dies ergibt sich aus Gleichung (23): Wenn J abnimmt und L konstant bleibt, muss ω zunehmen.

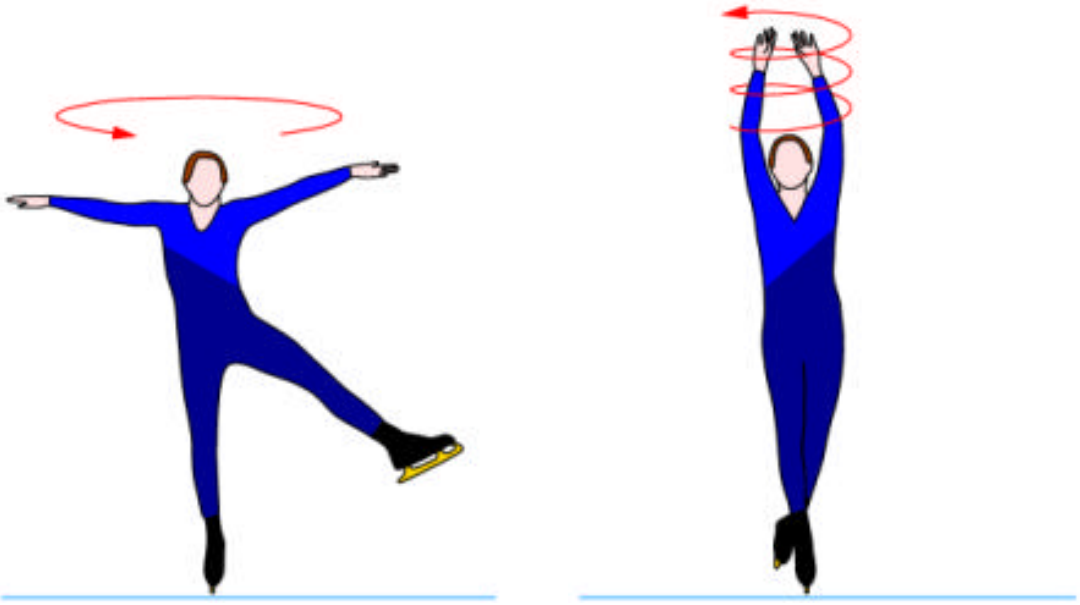

Abbildung 116: Drehimpulserhaltungssatz Grafik: Markus Pössel/Einstein Online

Drehmoment

Für den einfachen Fall, dass ein Körper sich nur um eine feste Drehachse drehen kann, ist das *Drehmoment* einer Kraft F, die im Abstand r von der Drehachse am Körper angreift, gegeben durch die Beziehung

$$M = r \cdot F_{\perp} \,. \tag{24}$$

Dabei ist $F_{\perp}$ die zur Drehachse senkrecht stehende Komponente der Kraft.

Die für den allgemeinen Fall gültige Definition des Drehmomentes erfordert den Begriff des *Vektorprodukts*, der hier nicht zur Verfügung steht.

Einheitenvorsätze

Die Einheitenvorsätze sind Vorsilben, mit denen die dezimalen Vielfachen und Teile der Einheiten bezeichnet werden.

Der Vorsatzname wird unmittelbar vor den Namen der Einheit, bzw. das Vorsatzzeichen unmittelbar vor das Einheitenzeichen geschrieben. Es darf nicht mehr als ein Vorsatz pro Einheit verwendet werden. Bei Potenzen bezieht sich der Exponent auf Vorsatz und Einheit zusammen; zum Beispiel ist $1\ \mathrm{cm}^2 = 1\ \mathrm{cm} \cdot 1\ \mathrm{cm} = 10^{-4}\ \mathrm{m}^2$ und *nicht:* $1\ \mathrm{c(m}^2) = 10^{-2}\ \mathrm{m}^2$.

In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Vorsätze mit ihren Faktoren aufgeführt.

Es existieren noch die Vorsätze Yokto (y, 10^{-24}), Zepto (z, 10^{-21}), Deka (da, 10), Yotta (Y, 10^{21}) und Zetta (Z, 10^{24}), aber diese werden praktisch nie verwendet. Ebenso werden die Vorsätze Atto, Femto, Peta und Exa höchst selten benützt.

Vorsatz	Vorsatz-zeichen	Faktor
Atto	a	10^{-18}
Femto	f	10^{-15}
Piko	p	10^{-12}
Nano	n	10^{-9}
Mikro	μ	10^{-6}
Milli	m	10^{-3}
Zenti	c	10^{-2}
Dezi	d	10^{-1}
Hekto	h	10^{2}
Kilo	k	10^{3}
Mega	M	10^{6}
Giga	G	10^{9}
Tera	T	10^{12}
Peta	P	10^{15}
Exa	E	10^{18}

Tabelle 1: Einheitenvorsätze

Um Verwechslungen zu vermeiden, ist bei abgeleiteten Einheiten auf die Reihenfolge zu achten. Beispielsweise muss für das Produkt „Newton mal Meter“ Nm geschrieben werden und nicht mN, da dies als Millinewton gelesen würde.

elektrischer Dipol

Ein *elektrischer Dipol* besteht aus zwei gleich grossen Punktladungen Q entgegengesetzten Vorzeichens in einem festen Abstand l (s. Abbildung 117).

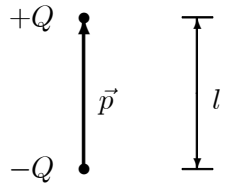

Abbildung 117: Elektrischer Dipol

Das *(elektrische) Dipolmoment* $\vec{p}$ ist ein Vektor, der von der negativen Ladung zur positiven Ladung zeigt und dessen Betrag gleich dem Produkt von Ladung Q und Abstand l ist:

$$|\vec{p}| = Q\,l\,. \tag{25}$$

elektrisches Feld

Wird eine kleine positive Probeladung q in die Nähe einer annähernd punktförmigen positiven Ladung Q gebracht, so wirkt auf sie eine Kraft, die von der Ladung Q weggerichtet ist. Die Grösse dieser Kraft hängt ausser von der Ladung Q (und der Ladung q) vom Abstand ab. Je grösser der Abstand ist, desto kleiner ist die Kraft (genauer: Die Kraft ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes.). Wird die gemessene Kraft mit dem Wert q der Probeladung dividiert, so ergibt sich eine Grösse, die nur noch von der Ladung Q und vom Abstand der Probeladung abhängig ist. Diese Grösse wird *elektrische Feldstärke* genannt. Sowohl Kräfte wie auch Feldstärken sind Grössen, die durch einen Betrag und eine Richtung beschrieben werden. Es genügt nicht, zu sagen, wie gross eine Kraft oder eine Feldstärke ist, es muss auch gesagt werden, in welche Richtung die Kraft oder die Feldstärke zeigt. Grössen, die durch einen Betrag und eine Richtung gegeben sind, können durch einen Pfeil dargestellt werden. Der Pfeil zeigt in die Richtung, in der die Kraft oder die Feldstärke zeigt, und die Länge des Pfeils gibt den Betrag der Kraft oder der Feldstärke. Physikalische Grössen, die durch einen Pfeil dargestellt werden können (und die bestimmte weitere Bedingungen erfüllen), werden als *Vektoren* bezeichnet.

Die Probeladung kann an einen beliebigen Ort in der Umgebung der Ladung Q gebracht werden. In jedem Punkt wird dadurch die elektrische Feldstärke bestimmt (Abbildung 118). Dies kann so beschrieben werden, dass die Ladung Q in ihrer Umgebung ein *elektrisches Feld* erzeugt. Das Feld kann im Prinzip mit Hilfe von Probeladungen bestimmt werden, es existiert aber unabhängig davon, ob Probeladungen vorhanden sind oder nicht.

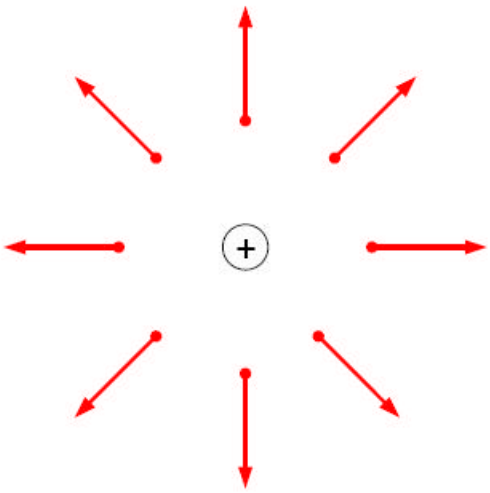

Abbildung 118: Elektrisches Feld

Elektrode

Elektrisch leitender Teil (meist aus Metall), der den Ladungsaustausch mit einem Gas, einer Flüssigkeit oder einem Festkörper ermöglicht oder ein elektrisches Feld erzeugt.

Eine positive Elektrode wird *Anode*, eine negative Elektrode *Kathode* genannt.

elektromagnetische Welle

Eine *Welle* ist eine Störung eines Gleichgewichtszustandes, die sich im Raum ausbreitet. Bei einem materiellen Medium kann die Störung darin bestehen, dass einzelne Massenelemente aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt werden. Durch die Kräfte, die auf die benachbarten Massenelemente wirken, werden diese ebenfalls aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt und stören ihrerseits ihre nächsten Nachbarelemente. So breitet sich die Störung in einem materiellen Medium aus. Wesentlich ist dabei die *Kopplung* benachbarter Teilchen durch elastische Kräfte oder durch Druckkräfte. Bei elastischen Körpern wird die Kopplung durch die Kristallgitterkräfte bewirkt; bei Flüssigkeiten oder Gasen sind es Druckkräfte, welche die Kopplung bewirken.

Bei *elektromagnetischen Wellen* besteht die Störung aus elektrischen und magnetischen Feldern. Elektromagnetische Wellen können sich auch im Vakuum ausbreiten. Die Kopplung benachbarter Raumelemente kommt bei dieser Art von Wellen dadurch zustande, dass ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld ein Magnetfeld erzeugt und ein zeitlich veränderliches Magnetfeld ein elektrisches Feld induziert.

Im Vakuum breiten sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit (299'792'458 m/s) aus.

Lichtwellen sind nichts anderes als elektromagnetische Wellen. Die Wellen des (für Menschen) sichtbaren Lichts haben Wellenlängen zwischen 380 und 780 nm.

Elektronvolt

Wenn ein Teilchen mit einer Elementarladung, z.B. ein Proton oder ein Elektron, eine Spannungsdifferenz von 1 Volt durchläuft, gewinnt es eine Energie von 1 *Elektronvolt* (eV) (Abbildung 119).

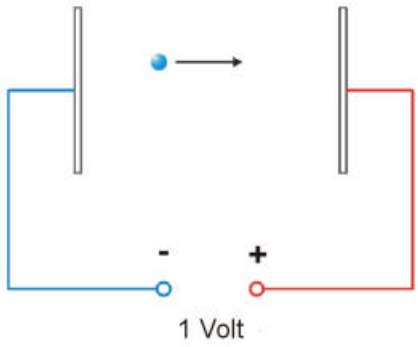

Abbildung 119: Definition des Elektronvolt

Die Umrechnung in die Energieeinheit Joule ist:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}\,. \tag{26}$$

Elektroskop

Ein *Elektroskop* ist ein Gerät zum Nachweis kleiner elektrischer Ladungen. *Elektrometer* sind elektrostatische Spannungs-Messgeräte, d.h. während der Messung fliesst kein (dauernder) Strom. Mit einem Elektrometer können sowohl Spannungen als auch Ladungen gemessen werden.

Das einfachste Elektroskop ist das *Blättchenelektroskop*. Es heisst Elektro*skop* und nicht Elektro*meter*, weil es nur für den qualitativen Nachweis von Ladungen und Spannungen, aber nicht für genaue quantitative Messungen geeignet ist. Es besteht im wesentlichen aus zwei dünnen Gold- oder Aluminiumblättchen, die an einer isoliert montierten Elektrode angebracht sind. Abbildung 120 zeigt schematisch den Aufbau eines Blättchenelektroskops.

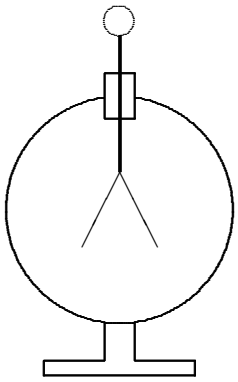

Abbildung 120: Blättchen-Elektroskop

Elementarladung

Die *Elementarladung* e ist die kleinste in der Natur frei vorkommende elektrische Ladungsmenge. Sie beträgt $1.602 \cdot 10^{-19}$ C. C ist das Symbol für Coulomb, die Einheit für die elektrische Ladungsmenge. 1 C = 1 As. A ist das Symbol für Ampere, die Einheit der elektrischen Stromstärke.

Das Elektron trägt eine negative und das Proton eine positive Elementarladung. Quarks tragen drittelzahlige Ladungen ($\pm$ e/3 oder $\pm$ 2e/3), aber sie treten nur in Systemen aus zwei oder drei Quarks auf, die ganzzahlige Ladungen haben.

Elementarteilchen

Die Definition des Begriffs „Elementarteilchen“ ist nicht ganz unproblematisch. Manche Lehrbuch-Autoren verstehen unter „Elementarteilchen“ die kleinsten Bausteine der Materie. Es gibt aber auch Teilchen, die in der Materie nicht als Bausteine auftreten und trotzdem üblicherweise als Elementarteilchen bezeichnet werden.

Andere Autoren bezeichnen Teilchen als elementar, wenn sie keine innere Struktur aufweisen. Auch diese Definition ist nicht restlos befriedigend, da das Vorhandensein einer inneren Struktur erstens vom Kenntnisstand der Physik abhängig ist und zweitens auch eine Frage der Betrachtungsweise ist.

Erstens wurden lange Zeit Atome (wie schon der Name sagt[51]) als unteilbar und also als strukturlos betrachtet, bis die innere Struktur des Atoms entdeckt wurde. Entsprechendes gilt für den Atomkern und für dessen Bausteine, die Nukleonen.

Zweitens ist es in der Thermodynamik bei mittleren Energien der Atome im Bereich von Bruchteilen von Elektronenvolt noch immer durchaus zulässig und sinnvoll, die Atome als unteilbar und strukturlos zu betrachten. In der Atomphysik bei Anregungsenergien in der Grössenordnung von Elektronenvolt muss dagegen die Struktur der Atomhülle berücksichtigt werden, während der Atomkern noch ohne weiteres als elementares Teilchen behandelt werden kann. In der Kernphysik hingegen, bei Energien im Bereich von Millionen Elektronenvolt, spielt die Struktur des Atomkerns eine wesentliche Rolle. Die Struktur der Nukleonen schliesslich macht sich erst im Energiebereich von Milliarden Elektronenvolt bemerkbar.

Aus diesen Gründen verwenden manche Autoren den Begriff „fundamentale Teilchen“ und andere benützen überhaupt nur das Wort „Teilchen“. Dadurch werden aber eigentlich die oben erwähnten Schwierigkeiten nicht behoben. Gleichgültig, welches Wort verwendet wird, es sollte stets beachtet werden, dass der Begriff „. . .-Teilchen“ relativ ist.

Die ursprüngliche Einordnung der Teilchen in Leptonen, Mesonen und Baryonen orientierte sich an den Massen. Leptonen waren die leichtesten Teilchen, Mesonen waren Teilchen mit mittlerer Masse und Baryonen waren die Teilchen mit grosser Masse. Es wurden jedoch Mesonen entdeckt, die eine grössere Masse haben als die leichtesten Baryonen, und es gibt mindestens ein Lepton, das eine grössere Masse hat als die leichtesten Mesonen. Die Teilchen sind daher nicht entsprechend ihrer Masse einzuordnen, sondern auf Grund anderer Kriterien.

Energie

Obwohl „Energie“ ein Begriff ist, der im Alltag häufig verwendet wird, lässt sich der physikalische Begriff *Energie* nur schwer in wenigen Worten richtig und genügend allgemein definieren, zumal es eine grosse Zahl von verschiedenen Energieformen gibt. Eine einfache (aber nicht in allen Fällen zutreffende) Definition lautet: Energie ist Arbeitsvermögen.

Die Einheit der Energie ist das Joule (vgl. Arbeit).

kinetische Energie

Wenn ein Körper aus dem Stillstand auf eine bestimmte Geschwindigkeit gebracht werden soll, muss er beschleunigt werden. Dazu ist eine Kraft erforderlich. Da die Kraft, die den Körper beschleunigen soll, sich mit dem Körper mitbewegen muss, verschiebt sich ihr Angiffspunkt (mit zunehmender Geschwindigkeit). Somit (s. Abschnitt 11.10) wird Arbeit geleistet. Diese Arbeit ist gewissermassen im bewegten Körper gespeichert, er hat eine *kinetische Energie*.

Ein Körper der Masse m, der sich mit der Geschwindigkeit v (die viel kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit c) bewegt, hat die kinetische Energie

$$E_{kin} = \frac{m\,v^2}{2}\,. \tag{27}$$

[51] Das griechische Wort „atomos“ bedeutet „unteilbar“.

Im Prinzip könnte diese Energie wieder in nutzbringende Arbeit umgewandelt werden, wenn der Körper abgebremst wird. Dies ist bei einer geradlinigen Bewegung nicht ganz einfach. Bei einer Drehbewegung wird dies aber tatsächlich ausgenützt, nämlich bei *Schwungrädern*. Mit einem Elektromotor kann ein Schwungrad auf eine hohe Drehzahl gebracht werden. Dabei wird dem Motor elektrische Energie zugeführt, und er leistet mechanische Arbeit, die durch das Schwungrad in kinetische Energie umgesetzt wird. Das Schwungrad kann diese Arbeit zurückliefern, indem es zum Beispiel einen elektrischen Generator antreibt. Dadurch wird es wieder abgebremst, wobei es Arbeit leistet, die im Generator in elektrische Energie umgewandelt wird.

potentielle Energie

Potentielle Energie ist eine Energie, die von der Lage des Körpers oder des Systems im Raum abhängt.

Soll zum Beispiel ein Körper im Schwerefeld der Erde gehoben werden, so muss dafür Arbeit geleistet werden. Am Körper muss eine nach oben gerichtete Kraft F angreifen, die (mindestens) gleich gross ist wie sein Gewicht G. Währenddem der Körper auf die Höhe h gehoben wird, verschiebt sich der Angriffspunkt in der Richtung der Kraft um die Strecke $s = h$. Somit wird die Arbeit $W = F \cdot s = G \cdot h$ geleistet. Diese Arbeit ist in die potentielle Energie

$$E_{pot} = G \cdot h \tag{28}$$

umgewandelt worden. Diese einfache Beziehung gilt nur für Hubhöhen h, die nicht so gross sind, dass das Gewicht G sich ändert.

Die potentielle Energie kann wieder in Arbeit umgesetzt werden, indem der Körper in die ursprüngliche Lage zurückgebracht wird. Dies wird bei Speicherkraftwerken realisiert. Wasser wird aus einem Tal in einen höhergelegenen Stausee gepumpt. Die dabei geleistete Arbeit entspricht der potentiellen Energie des Wassers im Stausee. Wird das Wasser durch eine Druckleitung auf eine Turbine im Tal geleitet, so wird seine potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt und diese leistet die Arbeit, welche die Turbine und damit den elektrischen Generator antreibt.

Potentielle Energie tritt nicht nur im Schwerefeld der Erde, sondern generell in allen Kraftfeldern auf, insbesondere zum Beispiel in einem elektrischen Feld.

Von potentieller Energie wird auch gesprochen, wenn eine Feder gespannt wird. Zum Spannen der Feder muss Arbeit aufgewendet werden. Die gespannte Feder enthält potentielle Energie, die wieder in Arbeit umgesetzt werden kann. Dies wird zum Beispiel bei Federmotoren in Spielzeugen und bei mechanischen Uhren ausgenützt.

elektrische Energie

Elektrische Energie ist (vereinfacht ausgedrückt) gleich Spannung mal Strom mal Zeit.

Ein elektrischer Generator wandelt mechanische Arbeit in elektrische Energie um, und ein Elektromotor verwandelt elektrische Energie in mechanische Arbeit.

innere Energie

Wird ein schnell bewegtes Fahrzeug zum Stillstand abgebremst, so wird die kinetische Energie in *Reibungsarbeit* umgesetzt. Die Kräfte zwischen Bremsscheiben und Bremsklötzen leisten Arbeit. Dabei werden diese erwärmt, d.h. die Temperatur der Bremsscheiben und der Bremsklötze (und auch der Umgebung) steigt an und ihre *innere Energie* nimmt zu. Statt von „innerer Energie“ wird gelegentlich von „innerer Wärme“ oder von „Wärmeenergie“ gesprochen, was aber irreführend ist und vermieden werden sollte.

chemische Energie

Die potentielle Energie in den elektrischen Feldern der Atome und Moleküle manifestiert sich bei chemischen Reaktionen als *chemische Energie*. Bei einer Verbrennung wird die chemische Energie des Brennstoffs freigesetzt, und in einem Akkumulator wird beim Laden die zugeführte elektrische Energie als chemische Energie gespeichert, und bei der Entladung wird chemische Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt.

Energiedosis

Siehe Strahlendosis.

Energie(erhaltungs)satz

All die erfolglosen Bemühungen zahlloser Erfinder, ein *Perpetuum mobile* zu bauen, haben zur Erkenntnis beigetragen, dass ein *Energieerhaltungssatz* gilt.

Ein System, das mit seiner Umgebung weder Materie noch Energie austauscht, wird *abgeschlossen* genannt.

In einem abgeschlossenen System bleibt die Summe aller Energien konstant.

Vielleicht tönt der Energiesatz zusammen mit der Definition des „abgeschlossenen Systems“ beinahe wie eine Tautologie. Die Aussage des Energiesatzes ist jedoch keineswegs selbstverständlich. Es gibt nämlich physikalische Grössen, die in einem abgeschlossenen System keineswegs konstant bleiben (z.B. die Entropie).

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in andere Energieformen umgewandelt werden. Streng genommen gibt es also auch keine „Energieverluste“. Wenn zum Beispiel von „Energieverlusten“ infolge von Reibung gesprochen wird, ist damit gemeint, dass ein Teil der zugeführten Arbeit oder Energie durch Reibungsarbeit in innere Energie umgewandelt wird. Die innere Energie eines Körpers kann aber nur sehr beschränkt oder gar nicht in nutzbringende Arbeit verwandelt werden. Aus dem heissen Dampf in einem thermischen Kraftwerk lässt sich Arbeit und daraus elektrische Energie gewinnen (aber nur mit einem Wirkungsgrad von 30 bis 40 %), aber mit den durch das Bremsen heiss gewordenen Felgen und Bremsklötzen eines Fahrrades lässt sich dieses nicht mehr in Bewegung setzen, obwohl dies auf Grund des Energieerhaltungssatzes nicht ausgeschlossen ist.

erg

erg = Energieeinheit

1 erg = 10^{-7} J

eV

eV = Elektronvolt

Exponentialfunktion

Die *Exponentialfunktion* ist die Funktion (vgl. Abschnitt „Funktion“)

$$y = a^x \,. \tag{29}$$

Die Konstante a ist die sogenannte Basis. Sie muss grösser als null sein ($a > 0$), x hingegen ist beliebig. Im Spezialfall $a = 1$ wird die Funktion zu einer Konstanten: $y = 1$.

Die Exponentialfunktion zur Basis $a = e = 2.718281828459045\ldots$ hat in der Physik eine besonders grosse Bedeutung.

$$y = e^x \tag{30}$$

wird als „natürliche Exponentialfunktion“ oder kurz als „e-Funktion“ bezeichnet. Ihre besondere Bedeutung beruht auf ihrer Eigenschaft, dass die Zunahme der Funktion gleich dem Funktionswert ist, d.h. es gilt

$$\frac{dy}{dx} = y \,. \tag{31}$$

Der Funktionswert y nimmt umso schneller zu, je grösser der Funktionswert schon ist.

Feld

Ein *Feld* ist eine physikalische Grösse, die in einem Raumbereich in jedem Punkt als Funktion des Ortes definiert ist.

Falls diese Grösse durch eine einizige Zahl bestimmt ist, wird von einem *Skalarfeld* gesprochen (Beispiel: Wenn in einem gewissen Raumbereich in jedem Punkt die Temperatur gegeben ist, kann von einem Temperaturfeld gesprochen werden.).

Falls dagegen die Grösse durch einen Vektor beschrieben wird, handelt es sich um ein *Vektorfeld* (Beispiele: In einer Strömung ist die Strömungsgeschwindigkeit ein Vektor, der eine Funktion des Ortes ist. Die Strömung bildet ein *Vektorfeld*. Elektrische und magnetische Felder sind ebenfalls Vektorfelder.).

Feldlinien

Ein Vektorfeld kann durch die sog. *Feldlinien* veranschaulicht werden. Feldlinien sind Kurven, die so verlaufen, dass in jedem Kurvenpunkt der entsprechende Feldvektor tangential zur Kurve gerichtet ist. Feldlinien existieren selbstverständlich nicht in Wirklichkeit. Sie sind aber ein nützliches Hilfsmittel, um elektrische Felder zu beschreiben. Sie lassen sich sogar sichtbar machen, indem kleine isolierende Partikel (z.B. kleine Griesskörner) in einem gut isolierenden Fluid (z.B. Terpentinöl) verteilt werden. Wird dieses Gemisch in ein elektrisches Feld gebracht, so ordnen sich die Partikel längs der Feldlinien an und liefern so (wenigstens in einer Ebene) ein qualitatives Bild des Feldverlaufs.

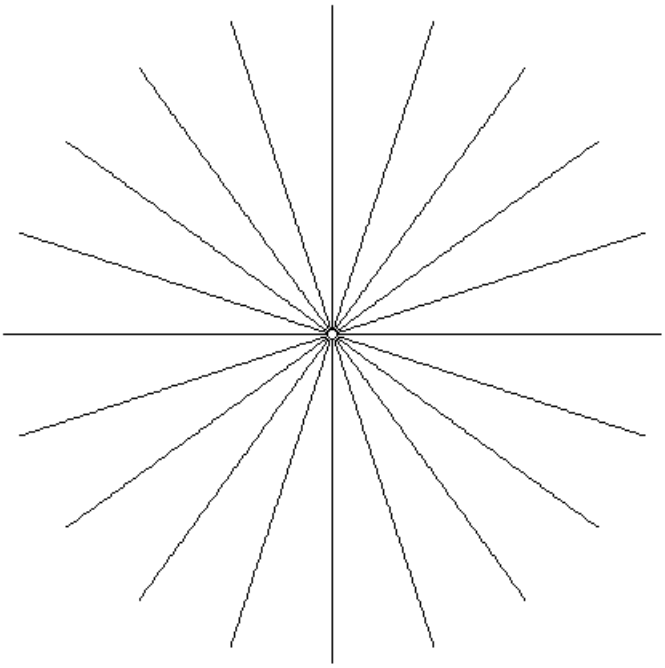

Abbildung 121: Feldlinienbild einer Punktladung

Abbildung 121 zeigt das Feldlinienbild einer Punktladung und in Abbildung 122 ist das Feldlinienbild eines elektrischen Dipols dargestellt.

Fermionen

Teilchen mit halbzahligem Spin werden nach dem italienischen Physiker Fermi als *Fermionen* bezeichnet.

Fluoreszenz

Lichtemission, die nicht durch die Temperatur des Körpers verursacht wird, sondern durch eine andere Art von Anregung zustandekommt, wird als *Lumineszenz* bezeichnet.

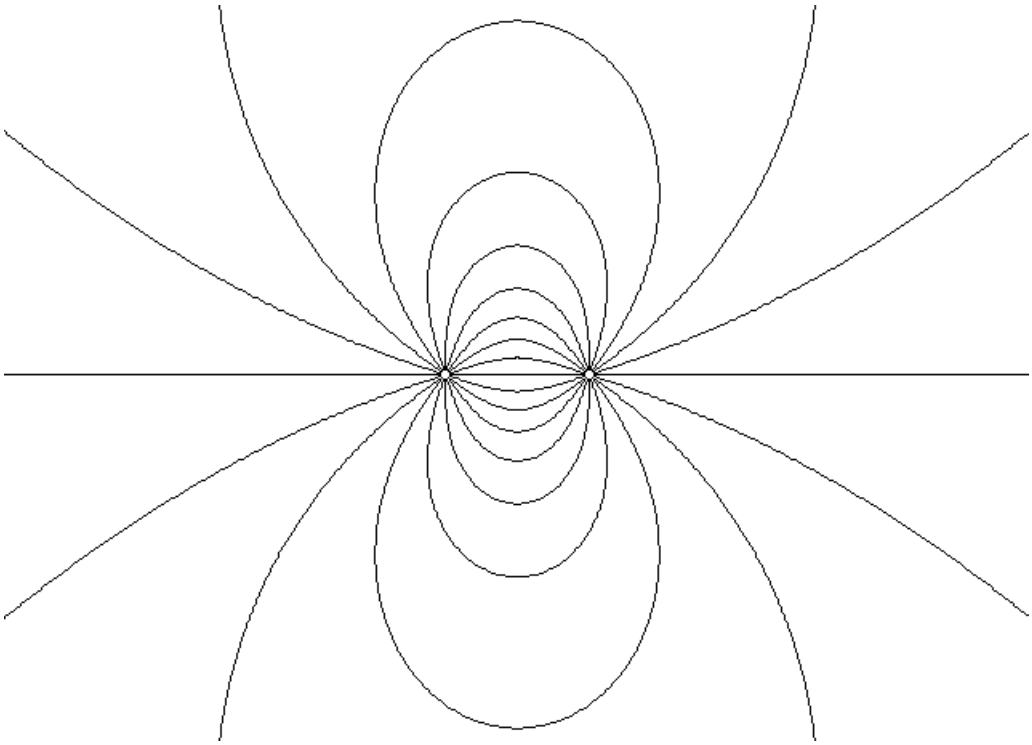

Abbildung 122: Feldlinienbild von zwei ungleichnamigen Punktladungen gleicher Grösse

Es wird zwischen *Fluoreszenz* und *Phosphoreszenz* unterschieden.

Wenn die Lumineszenz praktisch gleichzeitig mit der Anregung erlischt (d.h. wenn die Zeitkonstante des exponentiellen Abklingens etwa 10^{-8} s beträgt), wird von „Fluoreszenz“[52] gesprochen.
Beispiele: Bildschirme, Leuchtstoffröhren.

freie Weglänge

Die *freie Weglänge* ist die Strecke, die ein Teilchen zurücklegen kann bis zum nächsten Stoss oder zur nächsten Wechselwirkung.

Funktion

Eine *Funktion*

$$y = f(x) \tag{32}$$

ist eine „Vorschrift“, mit der jedem Wert der Variablen x ein Wert der Variablen y zugeordnet wird.

[52] Das lateinische Wort „fluere“ bedeutet u.a. „fliessen“. Flußspat (Fluorit, Calciumfluorid, CaF_2) wurde schon im Mittelalter als Flussmittel beim Schmelzen von Erzen verwendet. An den grün und blau gefärbten Exemplaren des Flußspates wurde zum erstenmal (violette) Fluoreszenz beobachtet.

Einfache Beispiele von Funktionen:

$$\begin{aligned} y &= x + 3 \\ y &= 2\,x \\ y &= 3\,x - 5 \\ y &= x^2 \\ y &= 4\,x^3 + 2.3\,x^2 - 6.4\,x + 5.2 \end{aligned}$$

Geschwindigkeit

Die *Geschwindigkeit* ist die zurückgelegte Wegstrecke pro Zeiteinheit:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}\,. \tag{33}$$

Wird ein endliches Zeitintervall Δt gewählt (z.B. 1 Sekunde, 1 Minute oder 1 Stunde), so ist v die *mittlere* Geschwindigkeit während dieses Zeitintervalls. Die *momentane* Geschwindigkeit ergibt sich, wenn das Zeitintervall Δt „unendlich klein“ gemacht wird. Die mathematische Operation, die erlaubt, Δt gegen null gehen zu lassen und dabei den sogenannten Grenzwert von $\Delta s/\Delta t$ zu berechnen, heisst *Differenzieren*. Im Grenzfall $\Delta t \to 0$ wird statt

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{34}$$

dann

$$v = \frac{ds}{dt} \tag{35}$$

geschrieben. Im Internationalen Einheitensystem ist die Einheit der Geschwindigkeit m/s.

Im allgemeinen Fall müssen sowohl der Ort als auch die Geschwindigkeit durch einen Vektor dargestellt werden. Dann ist

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}\,. \tag{36}$$

GeV

1 GeV = 10^9 eV

Gewicht

Das *Gewicht* oder die Gewichtskraft eines Körpers ist die Kraft, mit welcher der Körper von der Erde[53] angezogen wird.

[53] oder von dem Planeten oder Satelliten, auf dem sich der Körper befindet

Die Maßeinheit für das Gewicht ist das Newton (N). Im Alltag wird das Gewicht eines Körpers meist fälschlicherweise in Kilogramm ausgedrückt.

Im Gegensatz zur Masse ist das Gewicht eines Körpers ortsabhängig. Das Gewicht eines Körpers ist auf einem hohen Berg kleiner als auf Meereshöhe und wegen der Abplattung der Erde an den Polen grösser als am Äquator. Ein Körper mit einer Masse von 1 kg wiegt fast überall in der Schweiz 9.81 N. Auf dem Mond dagegen hat ein Körper mit einer Masse von 1 kg nur noch ein Gewicht von 1.62 N.

Infolge der Erddrehung wird das tatsächlich gemessene Gewicht eines Körpers noch zusätzlich etwas beeinflusst. Einen weiteren noch kleineren Einfluss haben Mond und Sonne durch die Gezeitenwirkung.

Gray

1

Louis Harold Gray (1905–1965): englischer Physiker.

2

Gray ist die Einheit der Energiedosis.

$1\ \mathrm{Gy} = 1\ \mathrm{J/kg}$.

Gy

Gy = Gray

h

h = Plancksches Wirkungsquantum
$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js
$\hbar = h/(2\,\pi)$

Hadronen

Die aus den Quarks zusammengesetzten, stark wechselwirkenden Teilchen werden *Hadronen* genannt. Sie werden unterteilt in *Mesonen* und *Baryonen*.

Halbleiter

Ein *Halbleiter* ist (stark vereinfacht ausgedrückt) ein Material, das einen elektrischen Widerstand hat, dessen Grösse zwischen dem der Metalle und dem der Isolatoren liegt und der stark temperaturabhängig ist.

Halbleiterdiode

Eine *Halbleiterdiode* (oder kurz *Diode*) ist ein Halbleiterbauelement mit zwei Elektroden, das als Gleichrichter wirken kann. Der elektrische Widerstand der Diode ist in der einen Richtung sehr klein und in der umgekehrten Richtung sehr gross.

Halbwertszeit

Die *Halbwertszeit* ist die Zeit, in der die Hälfte einer Anzahl gleichartiger Atomkerne oder Elementarteilchen zerfällt.

In der zweiten Halbwertszeit zerfällt nicht etwa die andere Hälfte, sondern wiederum nur die Hälfte davon.

Da über den Zerfall der einzelnen Kerne oder Teilchen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden können, ist die Zahl der Kerne oder Teilchen, die in einer bestimmten Zeit zerfallen, statistischen Schwankungen unterworfen. Von ursprünglich 1000 Kernen oder Teilchen zerfallen in einer Halbwertszeit im Mittel 500 Kerne oder Teilchen. Es können im Einzelfall aber auch 479, 492, 503 oder 518 Kerne oder Teilchen sein, die in der ersten Halbwertszeit zerfallen.

Abbildung 123 zeigt den (theoretischen) zeitlichen Verlauf des Zerfalls.

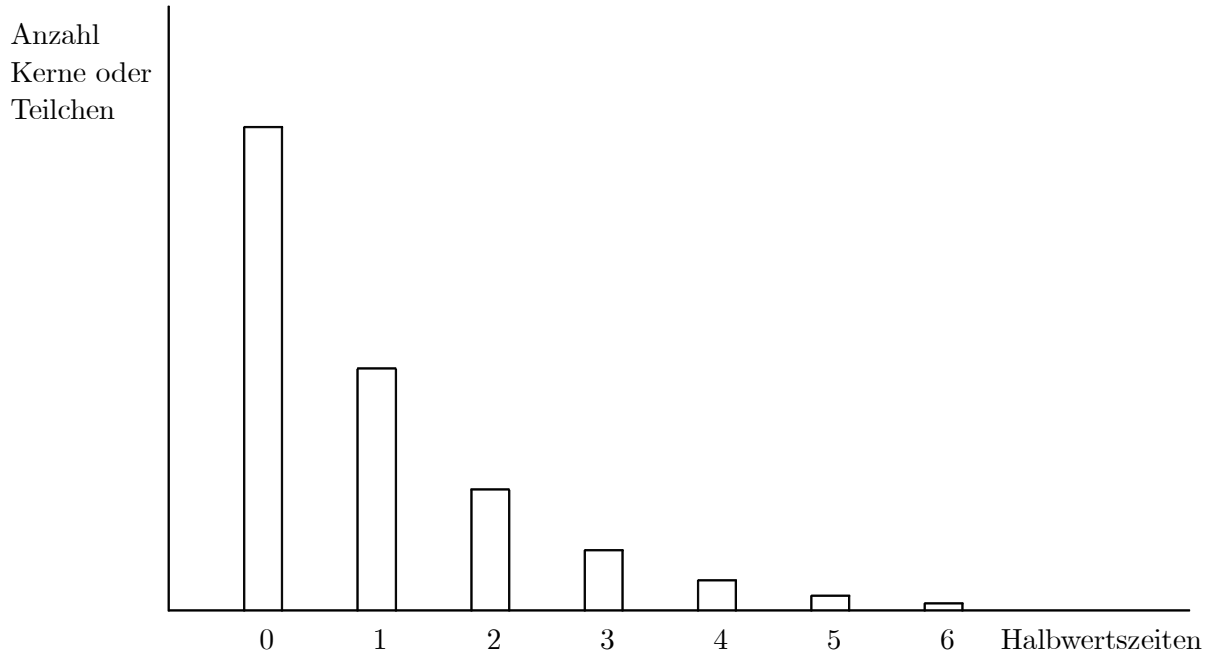

Abbildung 123: Zerfall

Impuls

Der *Impuls* eines Körpers ist definiert als $\vec{p} = m\,\vec{v}$.

Impuls(erhaltungs)satz

Der Gesamtimpuls eines Systems von Körpern, auf das keine äusseren Kräfte wirken, bleibt konstant.

Induktion

Die (*elektromagnetische*) *Induktion* ist die Erzeugung elektrischer Felder mit geschlossenen Feldlinien durch zeitlich veränderliche Magnetfelder.

Wird eine geschlossene Leiterschleife von einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld durchsetzt, so fliesst infolge des induzierten elektrischen Feldes in der Schleife ein elektrischer Strom.

Isotop

Isotope sind Nuklide, deren Kerne gleich viele Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten. Sie haben die gleiche Ordnungszahl Z, aber unterschiedliche Massenzahlen A.

Die übliche Schreibweise für ein Isotop des chemischen Elementes X mit der Ordnungszahl Z und der Massenzahl A ist:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \ . $$

Da die Zuordnung zwischen chemischem Element X und seiner Ordnungszahl Z eindeutig ist, wird diese auch oft weggelassen: ${}^{A}\mathrm{X}$.

J

J = Joule

Joule

1

James Prescott Joule (1818–1889): englischer Physiker.

2

Joule ist die Einheit für Arbeit und Energie. Wird ein Gewicht von 1 Newton auf eine Höhe von 1 Meter gehoben, so wird eine Arbeit von 1 Joule (J) geleistet.

1 J = 1 Nm .

K

K = Kelvin

Kelvin

1

Lord Kelvin (1824–1907): englischer Physiker (bürgerlicher Name: William Thomson).

2

Kelvin ist die Einheit der absoluten Temperatur. Die absolute Temperaturskala beginnt beim absoluten Nullpunkt (−273.15°C). Die Umrechnung von der Temperatur in Grad Celsius zur Temperatur in Kelvin ist gegeben durch die Beziehung:

$$T = \vartheta + 273.15$$

ϑ = Temperatur in Grad Celsius
$\dot{\mathrm{T}}$ = Temperatur in Kelvin

Für Temperaturen im Bereich von 100 Millionen Grad spielt es keine Rolle mehr, ob die Temperatur in Grad Celsius oder in Kelvin gemeint ist.

Kernbrennstoff

Spaltstoffe, wie Uran-235 oder Plutonium-239, die zur Freisetzung von Kernenergie dienen, werden häufig als *Kernbrennstoff* oder kurz als *Brennstoff* bezeichnet.

keV

1 keV = 10^3 eV

Ladungen

Ladung ist die Eigenschaft eines physikalischen Objekts, mit einem Feld in Wechselwirkung zu treten.

Eine *elektrische Ladung* erzeugt ein elektrisches Feld (und wenn sie bewegt ist, auch ein magnetisches Feld), und durch ein elektromagnetisches Feld wird eine Kraft auf eine Ladung bewirkt.

Analog erzeugt eine Masse ein Gravitationsfeld, und durch ein Gravitationsfeld wird eine Kraft auf eine Masse bewirkt. Masse kann daher als *gravitative Ladung* aufgefasst werden.

Entsprechend gibt es eine *schwache Ladung*, die zur schwachen Wechselwirkung gehört.

Bei der starken Wechselwirkung gibt es drei verschiedene Ladungen, die als *Farbladungen* bezeichnet werden. Diese werden „rot“, „grün“ und „blau“ genannt, wobei diese Farben natürlich rein gar nichts mit den sichtbaren Farben von Objekten zu tun haben.

Leistung

Leistung ist Arbeit oder Energie pro Zeiteinheit.

Die Einheit der Leistung ist das Watt. 1 Watt ist 1 Joule pro Sekunde.

1 W = 1 J/s .

Dementsprechend sind Wattsekunden (Ws), Wattstunden (Wh) und Kilowattstunden (kWh) Energie-Einheiten.

1 Ws = 1 J 1 kWh = $3.6{\cdot}10^6$ J

Hingegen ist die Grösse „Watt/Stunde“, die im Zusammenhang mit Energie oder Leistung leider nicht allzu selten angetroffen werden kann, völliger Blödsinn. W/h würde an sich eine Zunahme (oder Abnahme) der Leistung pro Stunde bedeuten, aber das ist jeweils nicht gemeint, sondern die Einheiten Watt und Wattstunden sind nicht verstanden worden.

Leptonen

Leptonen sind Teilchen, die nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Sie lassen sich in drei *Familien* oder *Generationen* einteilen. Da sie bisher keinerlei Anzeichen einer inneren Struktur gezeigt haben, werden sie als elementar betrachtet. Sie haben Spin 1/2 und sind somit *Fermionen.*,

In der Tabelle 2 sind die heute bekannten Leptonen mit ihren Eigenschaften aufgeführt. Die Masse von (Elementar-)Teilchen wird häufig gemäss der Beziehung $E = mc^2$ in Energieeinheiten angegeben.

Generation	Leptonen	Masse (MeV)	Ladung (e)	L_e	L_μ	L_τ
1	ν_e	> 0	0	1	0	0
	e	0,511	-1	1	0	0
2	ν_μ	> 0	0	0	1	0
	μ^-	106	-1	0	1	0
3	ν_τ	> 0	0	0	0	1
	τ	1784	-1	0	0	1

Tabelle 2: Leptonen

Die L_k sind die *Leptonenzahlen.* L_e bedeutet die *Elektronenzahl*, L_μ die *Myonenzahl* und L_τ die *Tauzahl.*

Zu jedem der sechs Leptonen existiert ein *Antiteilchen.* Für dieses haben die Ladung und die Leptonenzahl das entgegengesetzte Vorzeichen. Beispielsweise das Antiteilchen des Elektrons ist das Positron, das positive Ladung und eine negative Elektronenzahl hat.

Die Elektronen-, Myonen- und Tauzahlen bleiben bei einer Wechselwirkung erhalten. Daraus folgt zum Beispiel, dass bei einem Beta-Zerfall

$$\mathrm{n} \longrightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e} + \overline{\nu}_e$$

ein Antineutrino $\overline{\nu}_e$ entstehen muss. Da die Elektronenzahl vor dem Zerfall gleich Null ist und das entstehende Elektron die Elektronenzahl 1 hat, muss das „Neutrino“ die Elektronenzahl -1

haben und somit ein Antineutrino sein. Die Erhaltung der Leptonenzahlen zeigt auch, dass Neutrinos und Antineutrinos sowie Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos voneinander verschieden sein müssen.

Genau genommen ist es natürlich umgekehrt. Durch viele Experimente wurde festgestellt, dass die verschiedenen Neutrinoarten sich voneinander unterscheiden, und das Gesetz der Leptonenzahlerhaltung ist lediglich eine elegante Zusammenfassung der empirisch festgestellten Tatsachen.

Während das Elektron und die Neutrinos stabil sind, zerfallen das Myon und das Tauon durch die schwache Wechselwirkung. Das Myon zerfällt in ein Elektron, ein Myon-Neutrino und ein Elektron-Antineutrino:

$$\mu^- \longrightarrow \mathrm{e}^- + \overline{\nu}_e + \nu_\mu \ .$$

Die Lebensdauer beträgt $2,2 \cdot 10^{-6}$ s.

Das Tauon hat verschiedene Zerfallsarten und eine Lebensdauer von $3,4 \cdot 10^{-13}$ s.

Das Myon und das Tauon unterscheiden sich vom Elektron nur in der Masse, und es ist bis heute nicht klar, warum diese „schwereren Elektronen“ überhaupt existieren.

Lichtjahr

Ein *Lichtjahr* ist die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.

1 Lichtjahr $= 9.45 \cdot 10^{15}$ m .

Ein Lichtjahr ist also eine *Längeneinheit* und *keine Zeiteinheit* (wie leider immer wieder mal gemeint wird).

magnetischer Dipol

Während elektrische Felder durch elektrische Ladungen erzeugt werden, entstehen magnetische Felder durch elektrische Ströme oder durch bewegte elektrische Ladungen. Es gibt keine „magnetische Ladungen“.

Zu den einfachsten Magnetfeldern gehören die Magnetfelder, die von einem Kreisstrom oder einer Zylinderspule erzeugt werden.

Das Feldlinienbild eines Kreisstromes oder einer Zylinderspule sieht in Abständen, die gross sind verglichen mit den Abmessungen des Kreisstromes oder der Spule, genau gleich aus wie das Feldlinienbild eines elektrischen Dipols (vgl. Abbildungen 124 und 125). Aus diesem Grund kann ein Kreisstrom oder eine Zylinderspule als *magnetischer Dipol* betrachtet werden.

Nicht nur ein Kreisstrom oder eine Zylinderspule, sondern nahezu jede stromdurchflossene geschlosssene Leiterschleife ist ein magnetischer Dipol.

Für eine beliebige ebene geschlossene Leiterschleife ist das *magnetische Dipolmoment* (oder kurz das *magnetische Moment*) definiert als:

$$\vec{m} = A\, I\, \vec{n}\,. \tag{37}$$

I ist der Strom in der Leiterschleife, und A ist die von der Leiterschleife umschlossene Fläche. $\vec{n}$ ist ein Einheitsvektor, der senkrecht steht zur Fläche der Leiterschleife und so orientiert ist, dass die Stromrichtung zusammen mit $\vec{n}$ eine Rechtsschraube ergibt.

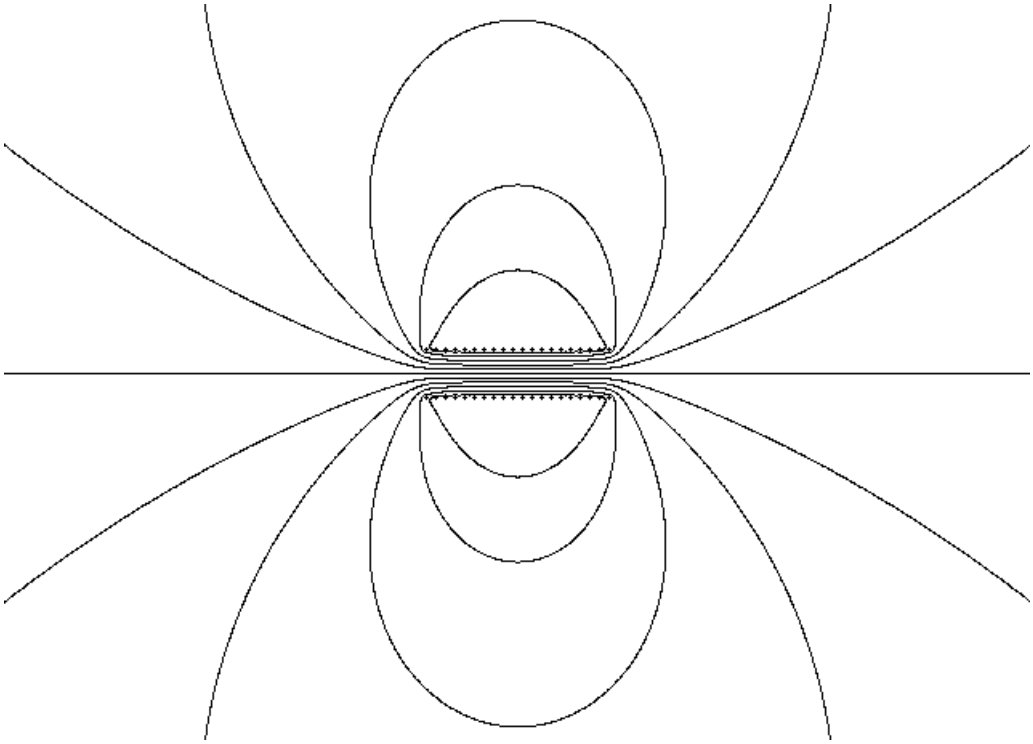

Abbildung 124: Feldlinien eines magnetischen Dipols

magnetisches Feld

Ein *magnetisches Feld* oder *Magnetfeld* wird nicht (wie ein elektrisches Feld) durch ruhende Ladungen, sondern durch bewegte Ladungen oder durch elektrische Ströme erzeugt.

Elementarteilchen, die einen Spin haben, weisen auch ein *magnetisches Moment* auf, d.h. sie haben ein Magnetfeld. Das Magnetfeld eines Permanentmagneten ist auf das magnetische Moment der Elektronen zurückzuführen.

Auf ein geladenes Teilchen, das sich in einem Magnetfeld $\vec{B}$ mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ bewegt, wirkt eine Kraft $\vec{F}$, die sog. *Lorentzkraft* (s. Abbildung 126).

magnetisches Moment

Siehe magnetischer Dipol.

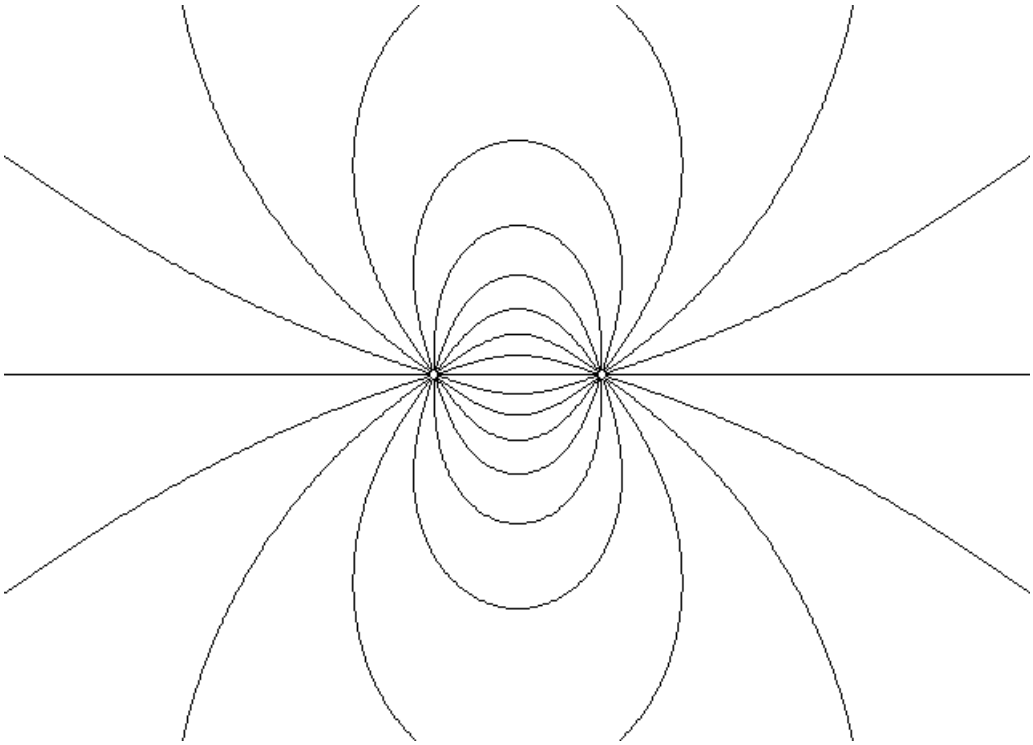

Abbildung 125: Feldlinien eines elektrischen Dipols

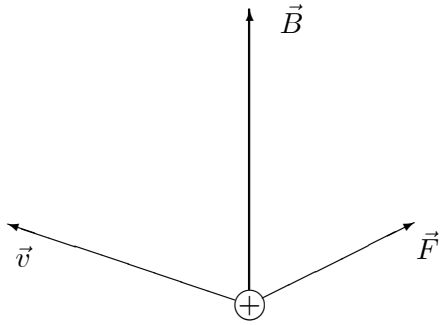

Abbildung 126: Lorentzkraft

Masse

Die *Masse* m eines Körpers ist eine fundamentale Eigenschaft des Körpers. Zunächst kann unterschieden werden zwischen *träger* und *schwerer* Masse.

Die träge Masse eines Körpers ist ein Maß für seine „Trägheit“ gegenüber einer Änderung seines Bewegungszustandes. Je grösser die träge Masse, desto grösser ist die Kraft, die für eine bestimmte Änderung der Geschwindigkeit erforderlich ist.

Die schwere Masse eines Körpers ist ein Maß für die Kraft, mit der ein Körper von einem anderen

Körper (z.B. von der Erde) angezogen wird. Je grösser die schwere Masse eines Körpers ist, desto grösser ist sein Gewicht.

Da es sich herausgestellt hat, dass schwere und träge Masse stets streng proportional sind, kann der Proportionalitätsfaktor gleich eins gesetzt werden, und es muss zwischen schwerer und träger Masse nicht unterschieden werden. Es wird daher meist nur von *Masse* gesprochen. Dank der Proportionalität zwischen schwerer und träger Masse lassen sich Massen durch Wägen bestimmen. Ferner bildet die strenge Proportionalität zwischen schwerer und träger Masse die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Die Maßeinheit für die Masse ist das Kilogramm (kg).

Im Gegensatz zum Gewicht ist die Masse eines Körpers ortsunabhängig. Ein Körper, der auf der Erde eine Masse von 1 kg aufweist, hat auch auf dem Mond eine Masse von 1 kg.

Massenträgheitsmoment

Ein ausgedehnter Körper kann als aus vielen kleinen Massenelementen zusammengesetzt gedacht werden. Wenn er sich um eine Achse dreht, ist sein *Massenträgheitsmoment* definiert als die Summe:

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \ldots + m_n r_n^2 \,. \tag{38}$$

r_i ist der Abstand des Massenelementes m_i von der Drehachse.

Mit Hilfe des Summationssymbols Σ lässt sich diese Summe einfacher schreiben:

$$J = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \,. \tag{39}$$

Mesonen

Die *Mesonen* bestehen aus einem Quark und einem Antiquark und haben daher ganzzahligen Spin. Sie sind somit Bosonen.

MeV

1 MeV = 10^6 eV

μm

μm = Mikrometer. 1 μm = 10^{-3} m

Multiplikation

In der Mathematik, in den Naturwissenschaften und in der Technik wird die Multiplikation von zwei Zahlen oder Symbolen mit einem Punkt ausgedrückt:

$$3 \cdot 5 = 15\,, \tag{40}$$

oder allgemein:

$$a \cdot b\,. \tag{41}$$

Das Malzeichen $\times$ bedeutet in der Mathematik eine allgemeinere Operation als die gewöhnliche Multiplikation.

Da als Symbole für mathematische oder physikalische Grössen in der Regel nur einzelne Buchstaben verwendet werden, kann ohne Gefahr von Missverständnissen bei der Multiplikation von Symbolen der Multiplikationspunkt auch weggelassen werden:

$$a \cdot b = a\,b\,, \tag{42}$$

was bei der Multiplikation von zwei Zahlen natürlich nicht möglich ist:

$$3 \cdot 5 \neq 3\,5\,. \tag{43}$$

Jedoch ist $3\,a$ eindeutig:

$$3\,a = 3 \cdot a\,. \tag{44}$$

Multiplikationsfaktor

Der *Multiplikationsfaktor* ist definiert durch die Beziehung:

$$k = \frac{n_{i+1}}{n_i}\,. \tag{45}$$

Dabei ist n_i die Zahl der Neutronen in der i-ten „Generation“ und n_{i+1} die Zahl der Neutronen in der „Generation“ $i + 1$.

N

N = Newton

Nebelkammer

Eine *Nebelkammer* oder *Wilsonkammer* ist ein Gefäss, das zeitweise oder ständig eine übersättigte Dampfatmosphäre enthält.

In einer *Expansions-Nebelkammer* befindet sich ein Gemisch von Gas (z.B. Luft oder Argon) und Dampf (z.B. Wasserdampf oder Alkoholdampf) im Sättigungszustand. Beim Durchgang eines geladenen Teilchens durch dieses Gas-Dampf-Gemisch, entstehen Ionen. Wenn nun das Gas-Dampf-Gemisch expandiert wird, indem in einem mit dem Gefäss verbundenen Zylinder ein Kolben schnell nach aussen bewegt wird, kühlt sich das Gemisch ab, wodurch es übersättigt wird. Die geladenen Ionen wirken als Kondensationskeime und es bilden sich kleine Tröpfchen an den Stellen, wo sich die Ionen befinden. Damit wird die Teilchenbahn als Nebelspur sichtbar. Eine Expansionskammer zeigt Teilchenspuren nur während der Expansion.

Bei einer *Diffusions-Nebelkammer* wird durch ein Temperaturgefälle dafür gesorgt, dass in der Kammer ständig eine Zone von übersättigtem Dampf besteht. Im oberen Bereich der Kammer verdunstet z.B. Alkohol aus einer flachen Rinne. Der Boden der Kammer wird gekühlt, so dass dort der Alkoholdampf laufend kondensiert. Dazwischen ist ein Bereich, in dem der Alkoholdampf übersättigt ist. Als Kondensationskeime wirken die Ionen, die beim Durchgang eines geladenen Teilchens erzeugt werden. Eine Diffusionskammer ist dauernd sensitiv, aber zeigt Teilchenspuren nur in der Zone, in der Übersättigung herrscht.

Auf dem gleichen Prinzip beruht die Entstehung von Kondensstreifen von hochfliegenden Flugzeugen. Falls die Atmosphärenschicht, die das Flugzeug durchquert, übersättigt ist mit Wasserdampf, so wirken die Russpartikel in den Triebwerksstrahlen als Kondensationskeime, die die Nebelbildung auslösen. Die Kondensstreifen können in diesem Fall zu einer Wolkenbank anwachsen. Falls die Atmosphärenschicht jedoch nicht übersättigt aber nahezu gesättigt ist, kommt es lokal vorübergehend zur Übersättigung, da die Triebwerksabgase grosse Mengen an Wasserdampf enthalten. Die Russpartikel wirken wieder als Kondensationskeime, und im Bereich des Triebwerkstrahls entsteht Nebel. In diesem Fall löst sich der Kondensstreifen in einem gewissen Abstand hinter dem Flugzeug wieder auf.

Neutron

Das *Neutron* ist ein elektrisch neutrales Teilchen, dessen Masse um 1.3 Promille grösser ist als die Masse eines Protons. Es ist wie das Proton ein Kernbaustein. Alle Atomkerne ausser dem Kern des normalen Wasserstoffs (1H) enthalten Neutronen.

Ein Neutron besteht aus einem up- und zwei down-Quarks.

Newton

1

Sir Isaac Newton (1643–1727): englischer Physiker, Mathematiker und Astronom.

2

Newton ist die Einheit der Kraft. 1 Newton (N) ist die Kraft, die einer Masse von 1 kg eine Beschleunigung von 1 m/s^2 erteilt:

$1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kgms}^{-2}$.

Newtonsche Gesetze

1. Newtonsches Gesetz

Jeder Körper beharrt in seinem Zustand der Ruhe oder gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

Das erste Newtonsche Gesetz wird auch als „Trägheitsgesetz“ bezeichnet.

2. Newtonsches Gesetz

Die Änderung der Bewegung [eines Körpers] ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.

Dies kann auch kurz so ausgedrückt werden:

Die momentane zeitliche Änderung des Impulses ist gleich der einwirkenden Kraft.

Das entspricht der folgenden Beziehung:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}\,. \tag{46}$$

Dabei ist $\vec{F}$ die Kraft und $\vec{p}$ der Impuls. In der klassischen Mechanik ist die Masse m konstant und die Newtonsche Gleichung kann auch so geschrieben werden:

$$\vec{F} = m\,\frac{d\vec{v}}{dt} = m\,\vec{a}\,. \tag{47}$$

Das zweite Newtonsche Gesetz wird auch als „dynamisches Grundgesetz“ oder als „Aktionsprinzip“ bezeichnet.

3. Newtonsches Gesetz

Die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.

Dieses Gesetz kann durch die folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$\vec{F}_{BA} = -\,\vec{F}_{AB}\,. \tag{48}$$

Dabei ist $\vec{F}_{AB}$ die Kraft, mit der der Körper A auf den Körper B wirkt, und $\vec{F}_{BA}$ ist die Kraft, mit der der Körper B auf den Körper A wirkt.

Das dritte Newtonsche Gesetz wird auch als „Wechselwirkungsgesetz“ oder „Reaktionsprinzip“ bezeichnet. Häufig wird dafür auch die Formulierung in lateinischer Sprache verwendet:

„actio = reactio“ .

nichtrelativistisch

Von *nichtrelativistisch* wird gesprochen, wenn beim betrachteten Vorgang oder Zustand die Geschwindigkeit der Teilchen so klein ist verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit, dass die Gleichungen der Newtonschen Mechanik eine hinreichend genaue Näherung liefern.

nm

nm = Nanometer. 1 nm = 10^{-9} m

Nuklid

Ein *Nuklid* ist eine Atomkernart mit einer bestimmten *Ordnungszahl* Z und einer bestimmten *Massenzahl* A. Ein Nuklid wird durch das Symbaol ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ dargestellt, wobei X für das chemische Symbol steht. Beispiele: ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ für Wasserstoff, ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ für schweren Wasserstoff (Deuterium), ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ für Sauerstoff und ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ für das Uranisotop, das in Kernreaktoren als „Brennstoff“ dient.

Nukleon

Ein *Nukleon* ist ein Baustein eines Atomkerns, also ein Proton oder ein Neutron.

Pa

Pa = Pascal

Partikelbeschleuniger

Siehe *Teilchenbeschleuniger*.

Pascal

1

Blaise Pascal (1623–1662): französischer Philosoph, Mathematiker und Physiker.

2

Pascal ist die Einheit des Druckes. 1 Pascal ist 1 Newton pro Quadratmeter.

1 Pa = 1 Nm^{-2} .

Pauli-Prinzip

Das *Paulische Ausschliessungsprinzip*, oft auch kurz *Pauli-Prinzip* genannt, besagt, dass sich zwei Fermionen nicht im gleichen Zustand befinden können. Seine allgemeine Formulierung lautet: Die Gesamtwellenfunktion eines Systems von Fermionen ist total antisymmetrisch bezüglich der Vertauschung zweier Teilchen. Die Gesamtwellenfunktion eines Systems von Bosonen ist dagegen total symmetrisch bezüglich der Vertauschung zweier Teilchen.

Perpetuum mobile

Seit Hunderten von Jahren haben sich ungezählte Erfinder vergeblich bemüht, ein Perpetuum mobile zu konstruieren. Die erste bekannte schriftliche Erwähnung eines Perpetuum mobile stammt aus dem Jahr 1150. Ein Perpetuum mobile ist genau genommen nicht das, was der Name besagt, nämlich einfach eine beständig laufende Maschine, sondern eine Maschine, die ohne jede äussere Energiezufuhr beständig mechanische (oder elektrische) Arbeit abgibt. Die zahllosen vergeblichen Versuche, eine solche Maschine zu konstruieren, waren nicht völlig nutzlos, sondern haben zur Gewinnung der Erkenntnis beigetragen, dass ein Energieerhaltungssatz gilt. Die Ueberzeugung, dass ein Perpetuum mobile weder auf rein mechanischer noch auf irgendeiner andern Basis möglich ist, festigte sich gegen Ende des 18. Jahrhunderts, und 1775 beschloss die französische Akademie, keine weiteren Entwürfe eines Perpetuum mobile mehr entgegenzunehmen.

Die früheren Perpetuum mobile waren fast ausnahmslos mehr oder weniger raffinierte mechanische Konstruktionen mit Hebeln, Zahnrädern, Schwungrädern, Schneckengetrieben und dergleichen.

Abbildung 127 zeigt ein solches Beispiel eines Perpetuum mobile. Die Meinung ist, dass das Wasserrad einerseits den Schleifstein dreht und andererseits die Wasser-Förderschnecke antreibt, die das Wasser wieder in den oberen Wasserbehälter hochhebt. Natürlich würde die Förderschnecke niemals soviel Wasser hochtransportieren, wie für den Antrieb des Wasserrades gebraucht wurde. Das obere Wasserreservoir würde sich daher schnell entleeren, und die ganze Maschinerie würde zum Stillstand kommen.

In neuerer Zeit ist es zu einer Art Renaissance des Perpetuum mobile in Form von meist recht komplizierten elektrischen oder elektronischen Geräten mit elektrostatischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern gekommen, wobei die heutigen Erfinder von Vakuumenergie, Tachyonen-Energie, „free energy“ und ähnlichen Begriffen sprechen. Es gibt ganze „Kongresse“ zum Thema „Freie Energie“, in denen Erfinder ihre neuen „Theorien“ und „Vakuumenergiemaschinen“ vorstellen. Dabei können bezeichnenderweise die Prototypen oft aus „patentrechtlichen Gründen“ nicht gezeigt werden, oder das Vorführmodell braucht einstweilen noch mehr elektrische Energie als es abgibt, wobei versichert wird, dass eine entsprechend grössere Version (die erst noch finanziert werden müsste) eine positive Energiebilanz hätte.

Leider lassen sich diese meist nicht leicht durchschaubaren (oder aus „patentrechtlichen Gründen“ überhaupt nicht einmal *anschaubaren*!) Geräte nicht so ohne weiteres mit dem Hinweis auf den Energieerhaltungssatz als Unsinn abqualifizieren.

Erstens ist der Energiesatz letzten Endes nur ein empirisches Gesetz, und es wäre mindestens prinzipiell denkbar, dass eines Tages eine spezielle Situation gefunden wird, in der er nicht gültig ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist allerdings sehr klein. Das zeigt sich zum Beispiel daran, dass es nach der Entdeckung der Radioaktivität bereits eine solche Situation gab, in der der Energiesatz verletzt zu sein schien (s. Abschnitte 4.1 und 4.2). Dies erschien den Physikern aber so unglaubhaft,

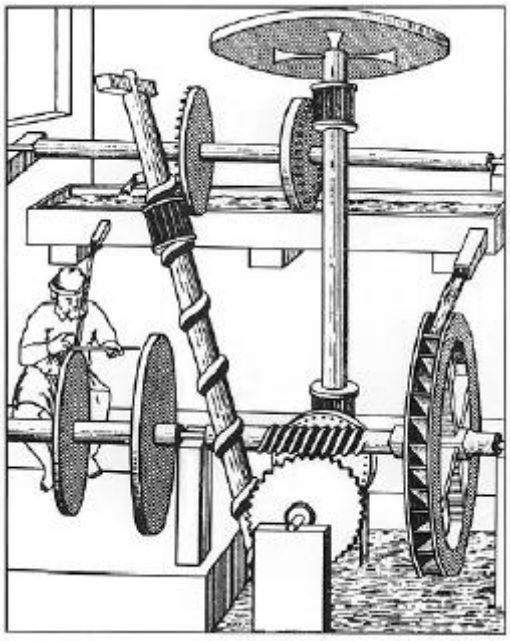

Abbildung 127: Perpetuum mobile

dass sie während 26 Jahren lieber an die Existenz eines neuen, praktisch kaum nachweisbaren Elementarteilchens, als an die Verletzung des Energiesatzes glaubten. Und mit dieser Ansicht behielten sie recht. Der Energiesatz hatte sich einmal mehr als richtig erwiesen. Der Energiesatz ist ein ausgezeichnet bestätigter Satz, und es ist äusserst unwahrscheinlich, dass er mit einer raffinierten elektromagnetischen Anordnung verletzt werden kann.

Zweitens gibt es in der Quantenfeldtheorie tatsächlich Spekulationen, dass es mehrere Vakuumzustände mit verschiedenen Energien geben könnte. Wenn „unser Vakuum“ sich nicht im energetisch tiefsten Zustand befinden würde, wäre es möglich, dass ein Übergang in einen tieferen Energiezustand stattfinden könnte. Grundsätzlich wäre es denkbar, dass ein solcher Übergang künstlich ausgelöst werden könnte. Falls das möglich wäre und dadurch Energie gewonnen werden könnte, wäre das keine Verletzung des Energieerhaltungssatzes, da bei Berücksichtigung der Vakuumenergie in der Energiebilanz die Gesamtenergie konstant bleiben würde. Es ist aber sehr fraglich, erstens, ob ein Vakuumübergang verursacht werden kann, und zweitens, ob das in kontrollierter Weise möglich ist. Es ist nämlich anzunehmen, dass ein Raumbereich mit tieferer Vakuumenergie sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausdehnen würde. Somit gäbe es nicht eine neue Energiequelle, sondern eine totale Katastrophe, die das Universum, so wie wir es kennen, zerstören würde. Daher ist sehr zu hoffen, dass die Erfinder von „Vakuumenergiemaschinen“ nicht (zuviel) Erfolg haben werden. Vieles spricht jedoch dafür, dass man in dieser Hinsicht sehr zuversichtlich sein darf.

Phosphoreszenz

Lichtemission, die nicht durch die Temperatur des Körpers verursacht wird, sondern durch eine andere Art von Anregung zustande kommt, wird als *Lumineszenz* bezeichnet.

Es wird zwischen *Fluoreszenz* und *Phosphoreszenz* unterschieden.

Wenn die Lumineszenz nach Abschalten der Anregung länger andauert (Sekunden bis Stunden), wird sie als „Phosphoreszenz“[54] bezeichnet.
Beispiel: Leuchtziffern.

Plasma

In der Physik wird unter *Plasma* ein (eventuell vollständig) ionisiertes Gas verstanden. Ein ionisiertes Gas besteht aus positiven Ionen, freien Elektronen und (bei unvollständiger Ionisation) aus neutralen Teilchen. Ein *Ion* ist ein elektrisch geladenes Teilchen, das aus einem Atom oder Molekül durch Hinzufügen (negatives Ion) oder Entfernen (positives Ion) von einem oder mehreren Elektronen entsteht.

Polymerisation

Polymerisation ist eine chemische Reaktion, bei der sich niedermolekulare Moleküle zu Makromolekülen (*Polymeren*) verbinden.

Potenzen

Die Multiplikation einer Zahl a mit sich selbst wird abgekürzt geschrieben als a^2:

$$a \cdot a = a\,a = a^2\,. \tag{49}$$

a^2 wird als „a Quadrat“, „a im Quadrat“ oder seltener „a hoch zwei“ ausgesprochen.

Entsprechend wird geschrieben:

$$\begin{array}{lcll} a\,a\,a & = & a^3 & \\ a\,a\,a\,a & = & a^4 & \\ a\,a\,a\,a\,a & = & a^5 & \text{usw.} \end{array}$$

a^3 wird als „a hoch 3“ ausgesprochen. Die hochgestellte Zahl wird als „Exponent“ bezeichnet.

a^n ist die n-te *Potenz* von a.

Offensichtlich gilt z.B.:

$$a^2 \cdot a^3 = a^5 = a^{2+3}\,. \tag{50}$$

Diese Regel gilt ganz allgemein:

$$a^m \cdot a^n = a^{m+n}\,. \tag{51}$$

[54] Das griechische Wort „phos“ bedeutet „Licht“. Weisser Phosphor leuchtet im Dunkeln infolge langsamer Oxidation deutlich. Durch die dabei entwickelte Wärme beschleunigt sich die Oxidation, bis es schliesslich zur Selbstentzündung kommt.

Ferner ist

$$\frac{a^5}{a^3} = a^2\,, \tag{52}$$

oder, allgemein:

$$\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}\,. \tag{53}$$

Damit diese Rechenregeln uneingeschränkt gelten, sind folgende Festlegungen sinnvoll:

$$a^{-n} = \frac{1}{a^n} \qquad \text{und} \qquad a^0 = 1\,. \tag{54}$$

Es ist auch leicht einzusehen, dass

$$(a^m)^n = a^{m\cdot n} \tag{55}$$

gilt.

Zweckmässigerweise wird noch

$$a^{1/n} = \sqrt[n]{a} \tag{56}$$

definiert (s. Abschnitt „Wurzeln“). Dann können auch gebrochene Zahlen als Exponenten verwendet werden.

Produkt

Das Resultat einer Multiplikation wird *Produkt* genannt. Auch der Ausdruck $a \cdot b$ wird als Produkt bezeichnet.

Proportionalität

Wenn zwischen zwei Variablen x und y die Beziehung $y = a \cdot x$ gilt, wobei a eine Konstante ist, sind y und x zueinander *proportional*. a ist die *Proportionalitätskonstante*.

Wenn $y = a/x$ gilt, sind y und x zueinander *umgekehrt proportional*.

Beispiele:

$\vec{p} = m\vec{v}$. Der Impuls $\vec{p}$ ist proportional zu $\vec{v}$.

$E_{kin} = \dfrac{m\,v^2}{2}$. Die kinetische Energie E_{kin} ist proportional zu v^2.

$p = \dfrac{h}{\lambda}$. Der Impuls p ist umgekehrt proportional zu λ.

Proton

Ein *Proton* ist der Kern des (normalen) Wasserstoffatoms. Das Proton trägt eine positive Elementarladung und hat eine 1836mal grössere Masse als das Elektron.

Ein Proton besteht aus einem down- und zwei up-Quarks.

Quantenchromodynamik

Die *Quantenchromodynamik* ist die Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung.

Quantenelektrodynamik

Die *Quantenelektrodynamik* ist die Quantenfeldtheorie der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Quantenfeldtheorie

Die *Quantenfeldtheorie* ist die relativistische Theorie der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen. In der Quantenfeldtheorie sind nicht nur (wie in der Quantenmechanik) die Zustände der Teilchen, sondern auch die Felder der Wechselwirkungen quantisiert[55]. Die Quantenfeldtheorie beschreibt auch die Erzeugung und Vernichtung von Teilchen und Quanten (z.B. die Emission und Absorption von Lichtquanten).

Quantenmechanik

Die klassische Mechanik versagt bei der Beschreibung des Verhaltens kleinster Teilchen, wie Elektronen, Protonen, Atome, Moleküle. Die *Quantenmechanik* ist die Theorie, die auch für solche Teilchen richtig ist. Meistens wird unter „Quantenmechanik“ die *nichtrelativistische* Theorie verstanden.

Quantentheorie

Der Begriff *Quantentheorie* wird nicht einheitlich verwendet. Er wird sowohl als Synonym zu *Quantenmechanik* als auch als Oberbegriff zu *Quantenmechanik* und *Quantenfeldtheorie* gebraucht.

Quarks

Die Quarks sind stark wechselwirkende Teilchen. Sie haben wie die Leptonen Spin 1/2 und gehören somit ebenfalls zu den Fermionen. Wie die Leptonen lassen sich auch die Quarks in drei Familien einteilen. In der Tabelle 3 sind die heute bekannten Quarks mit ihren Eigenschaften aufgeführt. Die Masse von (Elementar-)Teilchen wird häufig gemäss der Beziehung $E = mc^2$ in Energieeinheiten angegeben.

[55] Zum Beispiel ergeben sich durch die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes die Photonen.

Generation	Quarks	Masse (MeV)	Ladung (e)	Baryonenzahl
1	u	3	2/3	1/3
	d	7	−1/3	1/3
2	c	1200	2/3	1/3
	s	100	−1/3	1/3
3	t	≈ 170000	2/3	1/3
	b	4200	−1/3	1/3

Tabelle 3: Quarks

Es bedeuten:

u = up c = charm t = truth oder top
d = down s = strange b = beauty oder bottom .

Die sechs verschiedenen „Sorten“ von Quarks werden als *flavours* (englisch: flavour = Geschmack, Duft, Aroma) oder *flavors* (amerikanisch) bezeichnet.

Da es bis jetzt nicht gelungen ist, die Quarks im freien Zustand zu beobachten, sind die angegebenen Massen indirekt bestimmt und modellabhängig.

Wie bei den Leptonen existiert zu jedem Quark ein Antiquark. Dieses hat im Vergleich zum entsprechenden Quark entgegengesetzte Ladung und Baryonenzahl.

Reaktivität

Die *Reaktivität* ϱ ergibt sich aus dem *Multiplikationsfaktor* k durch die Beziehung:

$$\varrho = \frac{k-1}{k}\,. \tag{57}$$

relativistisch

Von *relativistisch* wird gesprochen, wenn beim betrachteten Vorgang oder Zustand die Geschwindigkeit der Teilchen nicht klein ist verglichen mit der Lichtgeschwindigkeit, so dass die Gleichungen der Newtonschen Mechanik nicht genau genug sind und mit den Gleichungen der Relativitätstheorie gerechnet werden muss.

schweres Wasser

Normales Wasser ist H_2O, d.h. ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. *Schweres Wasser* ist D_2O. d.h. ein Molekül des schweren Wassers besteht aus zwei Deuteriumatomen und einem Sauerstoffatom.

schwerer Wasserstoff

Schwerer Wasserstoff, auch *Deuterium* genannt, ist das Wasserstoff-Isotop ^{2}H. Der Kern eines Deuteriumatoms besteht aus einem Proton und einem Neutron.

Sievert

1

Rolf Maximilian Sievert (1896–1966): schwedischer Physiker.

2

Sievert ist die Einheit der Äquivalentdosis.

$1\ \mathrm{Sv} = 1\ \mathrm{J/kg}$.

Sperrschicht

Die *Sperrschicht* ist die an Ladungsträgern verarmte Zone in einer in Sperrrichtung geschalteten Halbleiterdiode.

Spin

Der *Spin* ist eine inhärente Eigenschaft eines Elementarteilchens. Es ist der Drehimpuls des Elementarteilchens, der nicht durch die Bahnbewegung des Teilchens bedingt ist, sondern ein „Eigendrehimpuls“ ist. Er lässt sich innerhalb der klassischen Physik nicht verstehen. Die klassische Vorstellung, dass sich das Elementarteilchen wie eine Kugel um eine Achse drehe, führt sofort zu Widersprüchen. Der Spin lässt sich nur in der relativistischen Quantenmechanik richtig verstehen.

Der Spin kann nur ganz- oder halbzahlige Vielfache von $\hbar$ annehmen. Oft wird er in diesen Einheiten ausgedrückt. Wenn von einem Teilchen gesagt wird, es habe „Spin $\frac{1}{2}$“, so ist damit gemeint, dass der Spin gleich $\frac{1}{2}\,\hbar$ ist.

Strahlendosis

Die *Strahlendosis* ist ein Maß für die Wirkung ionisierender Strahlung.

Die Einheit für die *Energiedosis* ist das *Gray* (Gy). $1\ \mathrm{Gy} = 1\ \mathrm{J/kg}$.

Verschiedene Strahlenarten können bei gleicher Energiedosis unterschiedliche biologische Wirkungen haben. Die biologische Wirkung wird durch die *Äquivalentdosis* in *Sievert* (Sv) gemessen. Sie ergibt sich durch Multiplikation der Energiedosis mit einem von der Strahlenart abhängigen Qualitätsfaktor.

Sv

Sv = Sievert

Teilchenbeschleuniger

Zur Untersuchung der Kerneigenschaften und der Kernkräfte werden schnelle Teilchen auf Atomkerne geschossen. Die ersten Kernreaktionen wurden 1919 mit Hilfe von Alphateilchen von radioaktiven Kernen untersucht. Cockroft und Walton erzeugten 1932 zum erstenmal Kernreaktionen mit Protonen, die durch eine Maschine beschleunigt worden waren. Parallel mit der Entwicklung der *Teilchenbeschleuniger* für immer grössere Energien machte die Kernphysik rasche Fortschritte.

Soll statt der Struktur der Atomkerne die Struktur der Nukleonen untersucht werden, so sind noch bedeutend höhere Energien erforderlich. Bei diesen Energien entstehen zudem durch direkte Umwandlung von Energie in Masse ganz neue Teilchen. Die in diesem Energiebereich auftretenden Probleme werden von der *Hochenergiephysik* oder *Teilchenphysik* studiert.

Dass zur Untersuchung immer kleinerer Dimensionen immer höhrere Energien notwendig sind, ist ein allgemeines Prinzip, das auf den Wellencharakter der Teilchen zurückzuführen ist.

Beschleuniger lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten einteilen. Es kann einmal unterschieden werden zwischen Beschleunigern für Elektronen und solchen für Protonen und andere schwere Teilchen (Deuteronen, Alphateilchen, schwere Ionen). Ein wesentlicher Unterschied für die beiden Beschleunigertypen besteht darin, dass Elektronen wegen ihrer kleinen Ruhemasse sehr schnell auf relativistische Geschwindigkeiten kommen, während die schweren Teilchen dafür eine bedeutend höhere Energie aufnehmen müssen.

Ferner lässt sich zwischen *Einfach-* und *Mehrfach-Beschleunigern* unterscheiden. Schliesslich lassen sich die Beschleuniger einteilen in *Geradeaus-* oder *Linearbeschleuniger* und *Kreis-* oder *Zirkularbeschleuniger*.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Beschleunigertypen aufgeführt:

Linearbeschleuniger	
Elektrostatische Beschleuniger	Einfach-Beschleuniger
Kaskadengenerator	Einfach-Beschleuniger
Van de Graaff-Generator	Einfach-Beschleuniger
Tandem-Van de Graaff	Mehrfach-Beschleuniger
Hochfrequenz-Linearbeschleuniger	Mehrfach-Beschleuniger
Zirkularbeschleuniger	Mehrfach-Beschleuniger
Zyklotron	Mehrfach-Beschleuniger
Synchrozyklotron	Mehrfach-Beschleuniger
Isochronzyklotron	Mehrfach-Beschleuniger
Synchrotron	Mehrfach-Beschleuniger
Betatron	Mehrfach-Beschleuniger

Der erste Teilchenbeschleuniger von Cockroft und Walton lieferte eine maximale Teilchenenergie von etwa 700 keV. Heutige Beschleuniger erreichen Energien im Bereich von TeV. Der *Large Hadron Collider* am CERN produziert zwei gegenläufige Protonenstrahlen mit je 7 TeV. Somit beträgt die bei der Kollision der Protonen freiwerdende Energie 14 TeV.

TeV

1 TeV = 10^{12} eV

thermische Neutronen

Thermische Neutronen sind Neutronen, deren mittlere kinetische Energie gleich der mittleren Energie der umgebenden Atome und Moleküle ist. Bei Zimmertemperatur haben sie eine Energie von rund 0.025 eV.

Thermoelement

Wenn der Kontakt K zwischen zwei verschiedenen Metallen oder Legierungen A und B eine andere Temperatur T hat als die Temperatur T_U der Kontakte K_1 und K_2, entsteht eine elektrische Spannung U, die ein Maß ist für die Temperaturdifferenz $T - T_U$ (s. Abbildung 128). Der Effekt kann sowohl zur Temperaturmessung als auch zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet werden.

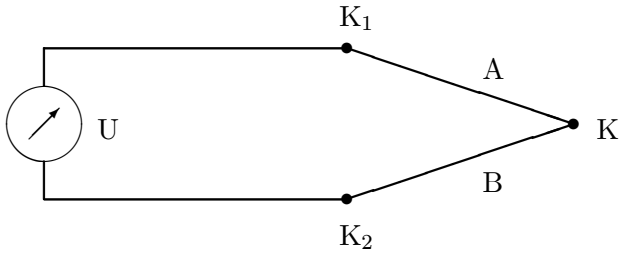

Abbildung 128: Thermoelement

TNT

TNT ist die Abkürzung für *Trinitrotoluol*. Trinitrotoluol, $C_6H_2(CH_3)(NO_2)_3$, ist ein hochbrisanter Explosivstoff für militärische und technische Zwecke. Bei der Explosion von 1 kg TNT wird eine Energie von $4.2 \cdot 10^6$ J freigesetzt.

Diese Zahl mag auf den ersten Blick erstaunen, wenn sie mit dem Heizwert von Benzin verglichen wird. Bei der Verbrennung von 1 kg Benzin werden rund $4.2 \cdot 10^7$ J freigesetzt. Also liefert 1 kg Benzin zehnmal mehr Energie als 1 kg Trinitrotoluol.

Das hat zwei Gründe. TNT, wie jeder Sprengstoff, benötigt für die Reaktion keinen Sauerstoff, während für die Verbrennung von 1 kg Benzin noch etwa 3.5 kg Sauerstoff aus der Luft verbraucht werden, d.h. die $4.2 \cdot 10^7$ J werden eigentlich nicht von 1 kg Benzin, sondern von Benzin + Sauerstoff mit einer Gesamtmasse von 4.5 kg geliefert. Ferner erhöhen die drei NO_2-Gruppen im TNT zwar die Masse, aber tragen nichts zur Energiefreisetzung bei.

Tritium

Tritium ist das Wasserstoff-Isotop ${}^3_1\mathrm{H}$. Der Kern des Tritiumatoms besteht aus einem Proton und zwei Neutronen.

V

V = Volt

Van de Graaff-Generator

Robert J. Van de Graaff (1901–1967) entwickelte 1931 den *Bandgenerator*, der auch *Van de Graaff-Generator* genannt wird. Ein über zwei Walzen umlaufendes endloses Gummiband transportiert elektrische Ladung in das Innere einer isoliert montierten Elektrode. Da das Innere eines leitenden Hohlraumes elektrisch feldfrei ist, kann eine mit einer kleinen Öffnung versehene metallische Hohlkugel nahezu unbegrenzt aufgeladen werden, indem Ladungen durch die Öffnung transportiert und auf der Innenseite an die Hohlkugel übertragen werden. Das Prinzip eines Bandgenerators, der als Teilchenbeschleuniger dient, ist in Abbildung 129 dargestellt.

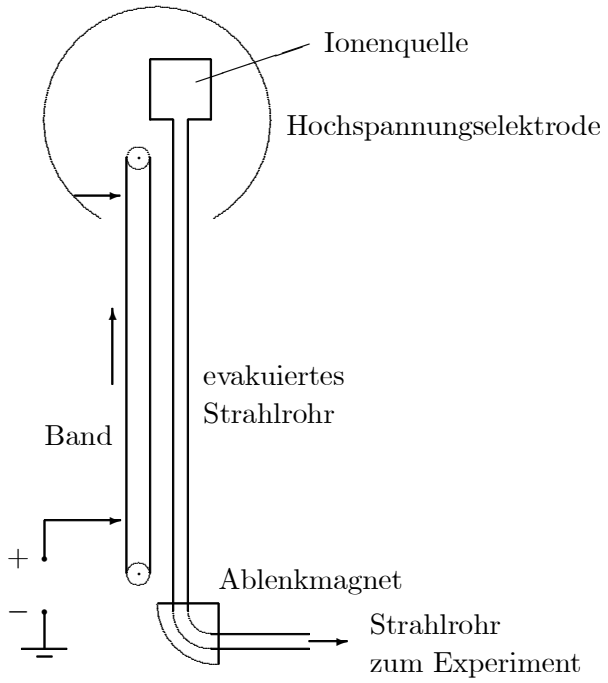

Abbildung 129: Van de Graaff-Generator

In der Luft beträgt die maximale Feldstärke etwa 3 MV/m. Bei höheren Feldstärken kommt es zum Durchbruch, d.h. freie Elektronen werden längs ihrer freien Weglängen so stark beschleunigt, dass sie beim nächsten Zusammenstoss mit einem Luftmolekül dieses ionisieren, womit ein Funkenüberschlag ausgelöst wird. Mit einer Hochspannungselektrode von 2 m Durchmesser sollten sich 3 MV erzielen lassen. In der Praxis wird etwa ein Drittel der theoretisch möglichen Spannung erreicht.

Höhere Spannungen werden ermöglicht, indem der Bandgenerator in einem Drucktank betrieben wird. Als Druckgas wird zum Beispiel ein Gemisch von 80 Prozent Stickstoff und 20 Prozent Kohlendioxid verwendet. Mit Schwefelhexafluorid (SF_6) werden noch höhere Durchschlagfestigkeiten erhalten. Die Drücke betragen bis zu etwa 20 bar, und es werden Spannungen bis zu 30 MV erreicht.

Statt Gummibänder wurden auch Nylonbänder und mit Gummi imprägnierte Baumwollbänder verwendet. Alle Bänder wiesen aber verschiedene Nachteile auf. Die Bänder waren feuchtigkeitsempfindlich und hatten eine beschränkte Lebensdauer. Entlang der Bänder traten häufig Gleitentladungen auf, und die erzeugte Spannung war nicht sehr stabil. Der Abrieb der Bänder produzierte Staub, weshalb periodische Revisionen erforderlich waren.

Ab etwa 1960 wurden die Bandgeneratoren mehr und mehr durch die *Pelletrons* verdrängt. In einem Pelletron wird statt eines Bandes eine (oder mehrere) Kette(n) verwendet. Die Kettenglieder bestehen abwechslungsweise aus runden Metallköpern und isolierenden Verbindungsstücken. Die Pelletronketten haben eine grössere Lebensdauer, erzeugen praktisch keinen Abrieb, sind unempfindlich auf Feuchtigkeit, produzieren keine Gleitentladungen und liefern stabile Spannungen.

Bei den normalen Van de Graaff-Beschleunigern befindet sich die Ionenquelle im Innern der Hochspannungselektrode. Die Teilchen werden auf dem Weg von der Hochspannungselektrode zur Experimentierapparatur beschleunigt, die sich auf Erdpotential befindet.

Mit einem raffinierten Prinzip kann die Hochspannung zweimal ausgenützt werden. Ein solcher Beschleuniger wird *Tandem-Van de Graaff* oder *Tandem-Beschleuniger* genannt. Die Ionenquelle befindet sich auf Erdpotential und erzeugt negative Ionen, die gegen die positive Hochspannungselektrode beschleunigt werden. Dort werden sie durch einen Gaskanal oder eine Stripper-Folie umgeladen. Die nun positiven Ionen werden wieder zur Erde weiterbeschleunigt und haben also effektiv die doppelte Spannung durchlaufen. Ein Tandem-Van de Graaff, mit dem eine Spannung von 6 MV erreicht werden kann, wird also Protonen auf 12 MeV beschleunigen. Allgemein lassen sich mit der Hochspannung U schwere Ionen mit der Kernladung Ze auf die maximale Energie

$$T = (Z + 1)\, e\, U \tag{58}$$

beschleunigen. Beim Umladungsprozess entstehen jedoch eine ganze Reihe von Ionen mit verschiedenen Ladungszuständen, die auf entsprechend verschiedene Energien beschleunigt werden. Damit Experimente mit Ionen von wohldefinierter Energie durchgeführt werden können, wird der Strahl nach dem Beschleuniger durch einen *Analysiermagneten* geführt.

Tandem-Beschleuniger lassen sich relativ schnell auf andere Energien und andere Ionen einstellen.

Variable

Die Oberfläche A einer Kugel mit dem Radius r wird mit Hilfe der Formel

$$A = 4\,\pi\, r^2 \tag{59}$$

berechnet. Dabei sind 4 und $\pi = 3.1415926\ldots$ *Konstanten*, d.h. diese Zahlen sind für alle Kugeln gleich. Der Radius r und die Oberfläche A sind dagegen *Variablen*, d.h. r und A haben für verschiedene Kugeln verschiedene Zahlenwerte.

Vektoren

Vektoren sind – vereinfacht gesagt – mathematische Objekte, die durch einen Betrag (d.h. eine positive Zahl) und eine Richtung im (dreidimensionalen) Raum charakterisiert werden können und

bestimmte Rechenregeln und gewisse Transformationsbedingungen beim Übergang von einem zu einem anderen Koordinatensystem erfüllen. Nicht alle Grössen, denen ein Betrag und eine Richtung zugeordnet werden können, sind Vektoren. Als Symbol für einen Vektor wird häufig ein Buchstabe mit einem darübergestellten Pfeil verwendet: $\vec{a}$.

Viele Grössen in der Physik lassen sich durch Vektoren darstellen. Beispiele sind: Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Impuls und elektrische, magnetische oder gravitative Feldstärke.

Statt durch seinen Betrag $a = |\vec{a}|$ und die Richtungswinkel ϑ und φ kann der Vektor $\vec{a}$ auch durch seine Komponenten a_x, a_y, a_z gegeben werden:

$$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)\,. \tag{60}$$

Die Komponenten eines Vektors sind seine Projektionen auf die Koordinatenachsen. Wird der Vektor parallel zu sich selbst mit seinem Anfangspunkt in den Koordinatenursprung verschoben, können die Komponenten a_x, a_y, a_z leicht abgelesen werden (Abbildung 130).

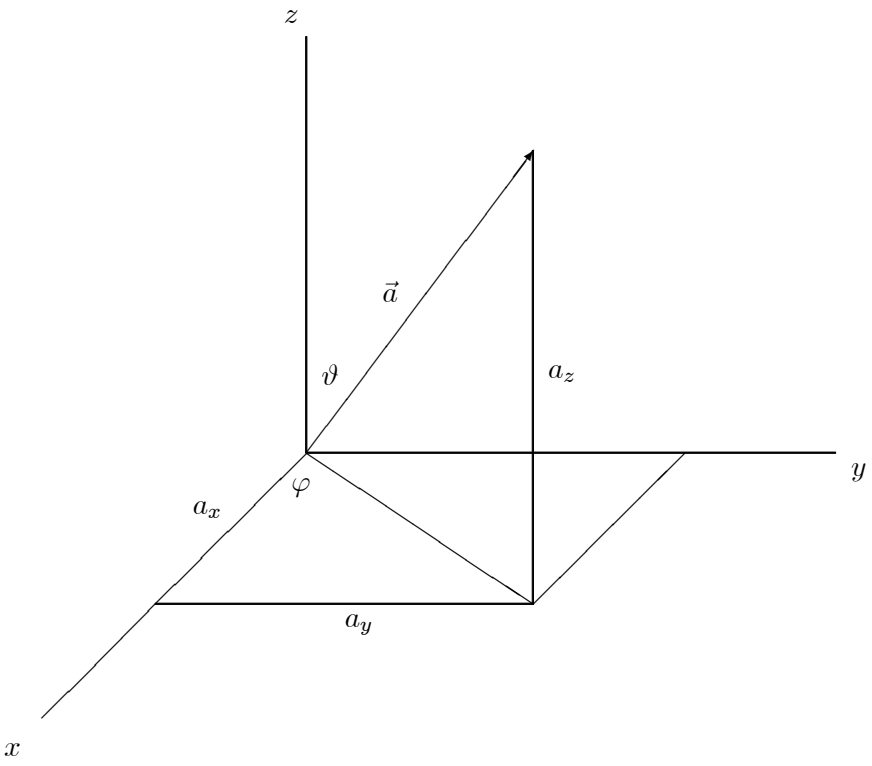

Abbildung 130: Komponenten eines Vektors

Volt

Volt ist die Einheit für die elektrische Spannung.

W

W = Watt

Wärme

Werden zwei Körper verschiedener Temperatur miteinander in Berührung gebracht, so kühlt sich der wärmere Körper ab, während sich der kältere erwärmt. Ohne äussere Einwirkung kommt der Vorgang dann zum Stillstand, wenn die beiden Körper die gleiche Temperatur aufweisen.

Dieser Vorgang wurde früher dadurch erklärt, dass vom wärmeren zum kälteren Körper ein unsichtbarer und unwägbarer Wärmestoff, das *Caloricum*, übergehe. Diese Vorstellung hielt sich bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts, obwohl schon etwa hundert Jahre vorher der Gedanke aufgetaucht war, „Wärme“ könnte etwas mit der Bewegung der kleinsten Stoffteilchen zu tun haben, und gegen Ende des 18. Jahrhunderts die Argumente sich gehäuft hatten, die gegen den Stoffcharakter der Wärme sprachen.

B. Thompson, später Graf Rumford, (1753–1814) entdeckte 1798 beim Bohren von Kanonenrohren, dass mit einem stumpfen Bohrer unbegrenzt viel Wärme produziert werden konnte. Es entstand Wärme so lange, wie der Bohrer von den Pferden angetrieben wurde. Somit konnte die Wärme wohl kaum bereits vorher als Stoff im Eisen enthalten sein.

1799 brachte H. Davy (1778–1829) zwei Eisstücke durch Reiben zum Schmelzen. Auch dieses Experiment liess sich mit der Vorstellung eines Wärmestoffs kaum erklären.

Dass die Produktion von Wärme durch Reibungsarbeit keine effiziente Heizmethode ist, war natürlich schon Rumford völlig klar. Er schrieb: „But no circumstances can be imagined in which this method of procuring heat would not be disadvantageous; for more heat might be obtained by using the fodder necessary for the support of a horse as fuel.“

Im kleinen Maßstab ist jedoch die Erwärmung durch Reibung durchaus von Bedeutung. Die wohl älteste Methode der Entfachung von Feuer beruht darauf, dass zwei Hölzer aneinander gerieben werden. Mit Hilfe einer Bogensehne, die um einen Hartholzstab gewickelt ist, wird dieser in einem weicheren Holz schnell hin und her gedreht. Auch die moderneren Methoden der Feuererzeugung beruhen immer noch auf Reibungsarbeit. Bei Streichhölzern wird der Kopf durch die Reibungswärme auf die Temperatur gebracht, bei der die chemische Reaktion einsetzt. Bei Feuerzeugen werden durch Reibung winzige glühende Partikel von „Cereisen“ (50 % Eisen und 50 % Cer) weggeschleudert, die das Gas oder den Benzindampf entzünden.

Erst 1842 stellte der Arzt Julius Robert Mayer (1814–1878) die Behauptung auf, dass Arbeit in Wärme umgewandelt werden kann und dass dabei die Energie erhalten bleibt. Er bestimmte als erster das *mechanische Wärmeäquivalent*, d.h. den Umrechnungsfaktor von den mechanischen Arbeitseinheiten in die Wärmeeinheit *Kalorie*.

Die Kalorie war die Einheit für kalorimetrische Messungen, bei denen Wärmemengen miteinander verglichen wurden. Die Kalorie wurde folgendermassen definiert:

Die Kalorie ist die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 g Wasser bei normalem Atmosphärendruck von 14,5 auf 15,5°C zu erwärmen.

Neben dieser Definition der sog. 15°-Kalorie gibt es eine Reihe von weiteren Kalorie-Definitionen, die aber nur um etwa 1 Promille voneinander abweichen.

Für die vor der Einführung der SI-Einheiten[56] meistens verwendete *Internationale Tafelkalorie* [57]

[56] SI = Système International d'Unités, Internationales Einheitensystem. Das SI ist das 1960 von der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht festgelegte Einheitensystem.

[57] von Dampf*tafel* (Tabellen der Wasserdampf-Zustände).

gilt die Umrechnung:

$$1 \text{ kcal} = 4186,8 \text{ J}\,. \tag{61}$$

Obschon heute auch der Nährwert von Nahrungsmitteln in Kilojoule ausgedrückt wird, wird in diesem Zusammenhang häufig noch der Begriff „Kalorie“ verwendet. Dabei ist mit „Kalorie“ aber stets *Kilokalorie* (also 1 kcal = 1000 cal) gemeint! Das ist noch auf die Zeit zurückzuführen, als zwischen „kleinen“ (cal) und „grossen“ (Cal) Kalorien unterschieden wurde, eine Bezeichnungsweise und Notation, die natürlich besonders häufig zu Missverständnissen und Verwechslungen Anlass gab. Eine grosse Kalorie entsprach 1000 kleinen Kalorien (1 Cal = 1000 cal). Bei Nährwerten waren dann immer die „grossen Kalorien“ gemeint.

Leider wurden die Arbeiten von Mayer kaum beachtet. Erst als in den Jahren 1843 bis 1850 James Prescott Joule (1818–1889) in vielen verschiedenartigen Experimenten das mechanische Wärmeäquivalent genau bestimmte und Hermann von Helmholtz (1821–1894) 1847 den Energiesatz in allgemeiner Form unter Berücksichtigung aller Energieformen aufstellte, setzten sich die neuen Erkenntnisse durch.

Bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts wurde zwischen den Begriffen „Wärme“ und „Temperatur“ oft nicht klar unterschieden, eine Verwirrung, die sich bis heute in manchen Redewendungen des alltäglichen Sprachgebrauchs widerspiegelt. Leider wird der Begriff „Wärme“ auch heute noch (und nicht nur im alltäglichen Sprachgebrauch) häufig in missverständlicher Weise verwendet. Zwar wird „Wärme“ nicht mehr mit „Temperatur“ verwechselt, aber gelegentlich im Sinn von „innerer Energie“ gebraucht, was unbedingt vermieden werden sollte. Auch die irreführenden Begriffe „Wärmeinhalt“ und „innere Wärme“ sollten nicht verwendet werden.

Es ist möglich, den Begriff *Wärme* streng axiomatisch zu definieren, so dass Missverständnisse ausgeschlossen werden können. Dieser Weg ist jedoch aufwändig und etwas anspruchsvoll. Eine etwas vereinfachte, aber widerspruchsfreie Definition der Wärme lautet folgendermassen:

Wärme ist Energie, die aufgrund einer Temperaturdifferenz übertragen wird. Die Wärme fliesst stets von der höheren zur tieferen Temperatur.

Watt

1

James Watt (1736–1819): britischer Physiker, Mathematiker und Astronom.

2

Watt (W) ist die Einheit für die Leistung. 1 Watt ist 1 Joule pro Sekunde.

$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$

Wechselwirkung

Der Begriff *Wechselwirkung* hat in der Physik zwei Bedeutungen.

Im weiten Sinn bedeutet *Wechselwirkung* jede Wirkung von Systemen, Teilchen oder Felder aufeinander. Da auf Grund des Reaktionsprinzips die Wirkung immer gegenseitig ist, wird von *Wechsel*wirkung gesprochen.

Im engeren Sinn wird unter *Wechselwirkung* eine der vier Grundkräfte der Physik verstanden.

Die vier fundamentalen Wechselwirkungen sind:

- starke Wechselwirkung (Kernkräfte)
- elektromagnetische Wechselwirkung
- schwache Wechselwirkung (z.B. Beta-Zerfall)
- Gravitation (Schwerkraft)

Wellen

Eine *Welle* ist eine Störung eines Gleichgewichtszustandes, die sich im Raum ausbreitet.

In weitaus den meisten Fällen sind Wellen *periodisch*, d.h. nach jeweils einer *Periode* wiederholt sich der Verlauf der Welle.

Besonders einfache periodische Funktionen sind die Sinus- und Kosinus-Funktionen, die sog. *harmonischen Funktionen* (Abbildungen 131 und 132).

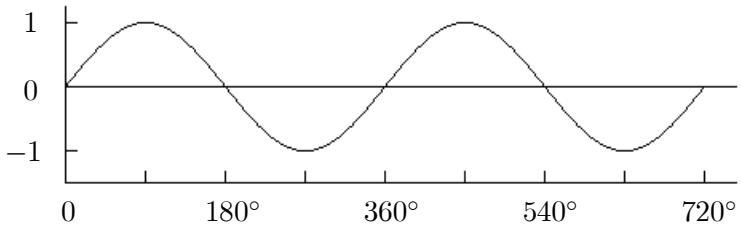

Abbildung 131: Sinusfunktion

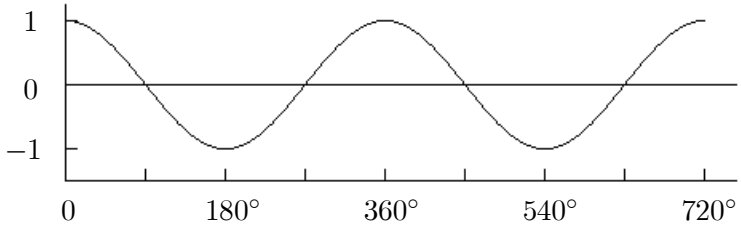

Abbildung 132: Kosinusfunktion

Da unter sehr allgemeinen Voraussetzungen eine beliebige periodische Funktion stets als eine Summe von harmonischen Funktionen dargestellt werden kann, genügt es in der Regel, harmonische Funktionen zu betrachten.

Die Periode in der Zeit wird auch als *Schwingungsdauer* bezeichnet, während die räumliche Periode *Wellenlänge* genannt wird (Abbildung 133).

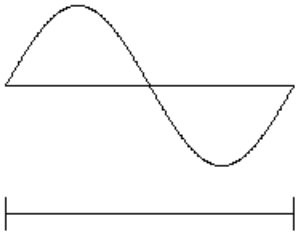

Abbildung 133: Wellenlänge

Winkel

Winkel können in verschiedenen Einheiten gemessen werden. Besonders häufig wird die 90-Grad-Teilung des rechten Winkels verwendet. In der Mathematik, in den Naturwissenschaften und in der Technik ist aber das *Bogenmass* oft zweckmässiger. Der Winkel im Bogenmass ist die Bogenlänge s dividiert durch den Radius r,

$$\varphi = \frac{s}{r}\,, \tag{62}$$

oder anders ausgedrückt, die Bogenlänge auf dem Einheitskreis.

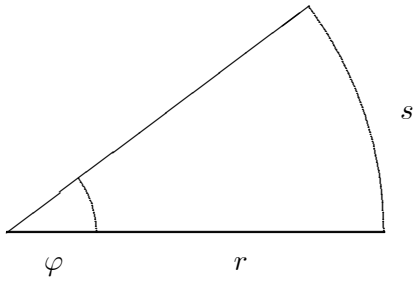

Abbildung 134: Winkel im Bogenmass

Die Einheit des Bogenmasses ist der *Radiant*, abgekürzt *rad*. Der rechte Winkel hat $\frac{\pi}{2}$ rad.

Winkelgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit einer Drehung kann durch die *Winkelgeschwindigkeit* in rad/s ausgedrückt werden. Da rad eine *dimensionslose* Grösse ist (sie ergibt sich ja aus der Division der Länge s durch

die Länge r), kann die Einheit rad auch weggelassen werden. Dann wird die Winkelgeschwindigkeit in der Einheit 1/s angegeben.

Analog zur Geschwindigkeit ist die Winkelgeschwindigkeit definiert als

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}\,. \tag{63}$$

Wirkung

Die *Wirkung* ist eine physikalische Grösse, die die Dimension Energie mal Zeit hat. Sie hat somit die Einheit J·s. Die Wirkung spielt in der abstrakten Formulierung der Mechanik und in der Quantenfeldtheorie eine wesentliche Rolle.

Wirkungsquerschnitt

Wird eine Materieschicht mit irgendwelchen Partikeln oder Quanten beschossen, so treten Wechselwirkungen auf zwischen diesen und den Molekülen, Atomen oder Atomkernen der Materieschicht. Die beschossene Materieschicht wird oft als *Target* [58] bezeichnet. Je nachdem, welche Wechselwirkung betrachtet wird, sind die Targetteilchen also Moleküle, Atome, Elektronen, Atomkerne oder Nukleonen. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Wechselwirkung auftritt, wird durch den ihr zugehörigen *Wirkungsquerschnitt* σ angegeben. Dieser ist eine dem gedachte Fläche, die dem Targetpartikel zugeordnet wird. Wenn diese Fläche von einem Geschosspartikel getroffen wird, findet die entsprechende Reaktion statt (s. Abbildung 135).

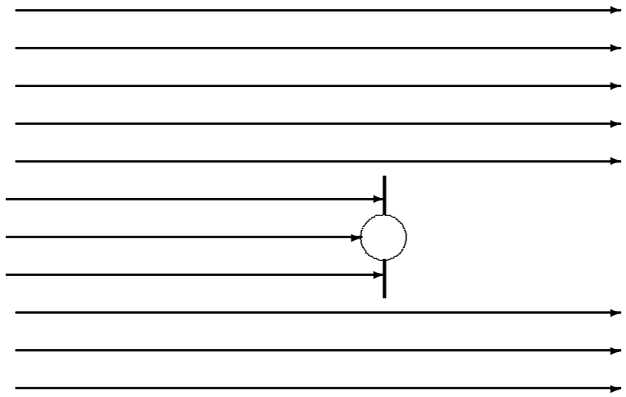

Abbildung 135: Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt kann sowohl grösser als auch kleiner sein als die Querschnittsfläche des Targetteilchens. Für ein und dasselbe Targetteilchen kann der Wirkungsquerschnitt je nach Reaktion sehr verschieden sein.

[58] Das englische Wort „target“ bedeutet „Zielscheibe“.

Wurzeln

Die *Quadratwurzel* (oder kurz „Wurzel“) $\sqrt{a}$ bedeutet diejenige Zahl, die mit sich selbst multipliziert a ergibt. Wenn also

$$\sqrt{a} = b\,, \tag{64}$$

dann gilt:

$$b^2 = a\,. \tag{65}$$

Es ist z.B.

$$\sqrt{4} = 2\,, \qquad \sqrt{9} = 3\,, \qquad \sqrt{16} = 4 \quad \text{usw.} \tag{66}$$

Eine Wurzel lässt sich auch berechnen, wenn das Ergebnis nicht ganzzahlig ist. Es ist z.B.:

$$\sqrt{2} = 1.41421356\ldots \quad \text{und} \quad \sqrt{3} = 1.73205080\ldots\,. \tag{67}$$

$\sqrt{2}$ und $\sqrt{3}$ sind Beispiele von sogenannten *irrationalen Zahlen.* Sie sind keine ganze Zahlen und können auch nicht als Brüche von ganzen Zahlen geschrieben werden. Der Dezimalbruch einer irrationalen Zahl ist „unendlich“ und nicht periodisch, d.h. die Folge der Ziffern hinter dem Dezimalpunkt bricht nie ab und die Ziffern sind nicht eine Gruppe von Ziffern, die sich immer wiederholt (wie z.B. bei $1/7 = 0.142857142857142857\ldots$).

Analog ist die dritte Wurzel $\sqrt[3]{a}$ definiert durch:

$$\sqrt[3]{a} = b \qquad b^3 = a\,. \tag{68}$$

Zum Beispiel ist $\sqrt[3]{64} = 4$, weil $4^3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$ ist. Genauso kann auch die n-te Wurzel definiert werden:

$$\sqrt[n]{a} = b \qquad b^n = a\,. \tag{69}$$

Zehnerpotenzen

Sehr grosse und sehr kleine Zahlen sind unhandlich zu schreiben und schwierig auszusprechen und es ist mühsam, damit zu rechnen, wenn sie ausgeschrieben werden. Zum Beispiel ist die Strahlungsleistung der Sonne

$$L = 387'000'000'000'000'000'000'000\text{ Watt}\,, \tag{70}$$

also 387 Quadrillionen Watt. Wenn dies jemandem übermittelt werden soll, ist noch fraglich, ob der Empfänger dieser Information überhaupt weiss, was eine „Quadrillion“ ist. Wenn die Zahl geschrieben oder gelesen werden soll, müssen die Nullen (oder zumindest die Dreiergruppen der Nullen) jedesmal gezählt werden. Zudem beansprucht die geschriebene Zahl unsinnig viel Platz.

Zehnerpotenzen sind eine Schreibweise, die das Schreiben und Lesen solcher Zahlen und vor allem auch das Rechnen damit sehr erleichtert. Die folgende Tabelle erklärt sich gewissermassen selber.

$10^1 = 10$
$10^2 = 100$
$10^3 = 1'000$
$10^4 = 10'000$
$10^5 = 100'000$
$10^6 = 1'000'000$
$10^7 = 10'000'000$
$10^8 = 100'000'000$

Die hinter der Zehn hochgestellte Zahl gibt offenbar einfach die Zahl der Nullen, die hinter der Eins zu schreiben sind.

Der mittlere Radius der Erdbahn beträgt rund 150 Millionen km. Mit Zehnerpotenzen lässt sich diese Entfernung folgendermassen schreiben:

$150 \cdot 10^6$ km oder
$1.5 \cdot 100 \cdot 10^6$ km $= 1.5 \cdot 10^8$ km .

Der Punkt in etwa halber Höhe der Zeile ist ein Multiplikationszeichen. Die Zahl in der ersten Zeile bedeutet also 150 mal 1 Million. Das ist natürlich gleichviel, wie das, was in der zweiten Zeile steht, nämlich 1.5 mal 100 Millionen oder eben 1.5 mal 10^8.

Völlig analog werden negative Zehnerpotenzen verwendet:

$10^{-1} = 0.1$
$10^{-2} = 0.01$
$10^{-3} = 0.001$
$10^{-4} = 0.0001$
$10^{-5} = 0.000'01$
$10^{-6} = 0.000'001$

Die Regel ist hier offenbar genauso einfach: Die hinter der Zehn hochgestellte negative Zahl zeigt, wieviele Nullen zu schreiben sind. Dabei muss die Null vor dem Dezimalpunkt mitgezählt werden.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie einfach Zehnerpotenzen miteinander multipliziert werden können:

$10^1 \cdot 10^1 = 10^{1+1} = 10^2$
$10^1 \cdot 10^2 = 10^{1+2} = 10^3$
$10^2 \cdot 10^3 = 10^{2+3} = 10^5$
$10^6 \cdot 10^{-2} = 10^{6-2} = 10^4$
$10^3 \cdot 10^{-5} = 10^{3-5} = 10^{-2}$

Die hinter der Zehn hochgestellten Zahlen werden „Exponenten“ genannt. Wie leicht ersichtlich, werden zwei Zehnerpotenzen miteinander multipliziert, indem die Exponenten einfach addiert werden.

Genauso einfach wird die Division:

$10^6/10^4 = 10^{6-4} = 10^2$
$10^5/10^2 = 10^{5-2} = 10^3$
$10^3/10^6 = 10^{3-6} = 10^{-3}$
$10^2/10^{-5} = 10^{2-(-5)} = 10^{2+5} = 10^7$

Bei der Division werden die Exponenten voneinander subtrahiert.

Das Rechnen wird durch die Potenzschreibweise viel einfacher.

Da z.B. $100/100 = 1$ und andererseits $10^2/10^2 = 10^{2-2} = 10^0$ ist, wurde konsequenterweise definiert:

$$10^0 = 1\,. \tag{71}$$

Die Strahlungsleistung der Sonne lässt sich nun viel kürzer und übersichtlicher schreiben als

$$L = 387 \cdot 10^{24}\ \text{Watt} \tag{72}$$

oder

$$L = 3.87 \cdot 10^{26}\ \text{Watt}\,. \tag{73}$$

Zerfallsreihe

Das durch einen radioaktiven Zerfall entstehende Nuklid kann ebenfalls radioaktiv sein. Es können so mehrere aufeinanderfolgende Zerfälle auftreten. Eine solche Kette von Zerfällen wird als *Zerfallsreihe* bezeichnet.

Die *natürlichen Zerfallsreihen* sind in den Abbildungen 136 bis 138 und Tabellen 4 bis 6 etwas vereinfacht[59] wiedergegeben. Selbstverständlich sind viele der Alpha- und Betazerfälle von der Emission von Gammaquanten begleitet, da nur ein Teil aller Zerfälle direkt zum Grundzustand des Tochterkerns führt.

In den Tabellen wurden folgende Symbole für die Halbwertszeiten verwendet: a = Jahre, d = Tage, h = Stunden, min = Minuten, s = Sekunden, ms = Millisekunden, μs = Mirkosekunden.

[59] Verzweigungen mit extrem kleinen Zerfallswahrscheinlichkeiten wurden weggelassen.

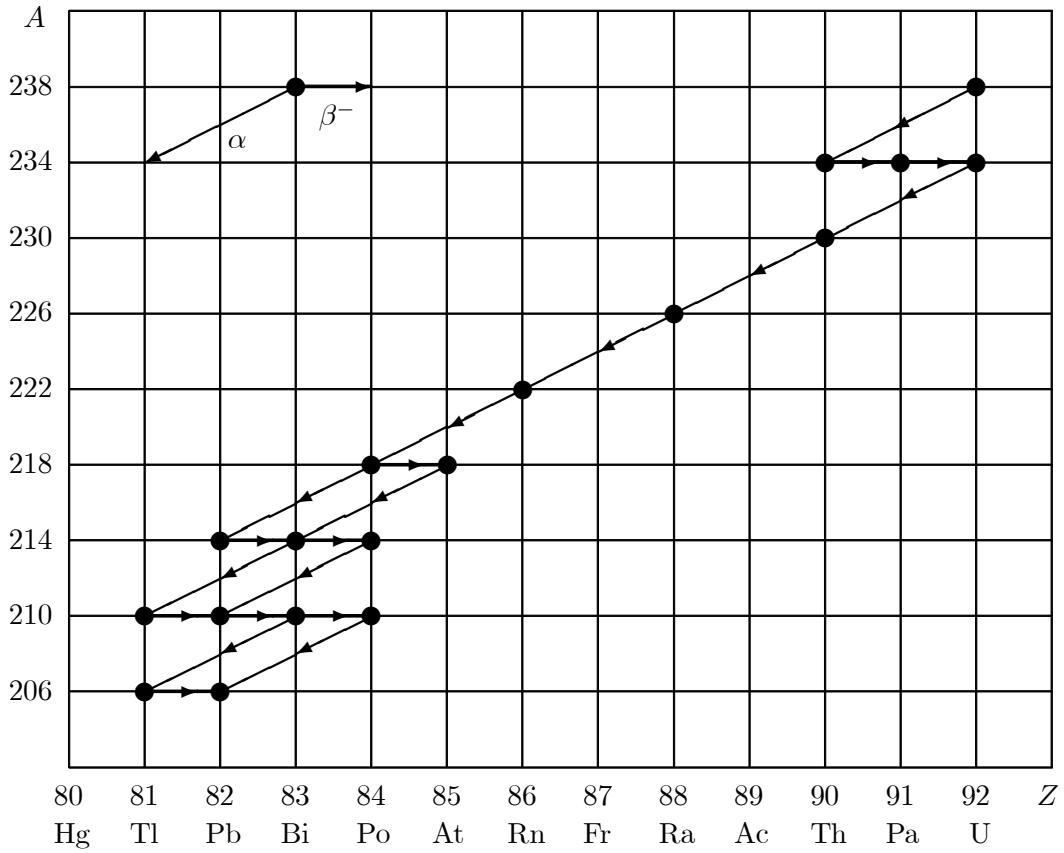

Abbildung 136: Uran-Radium-Reihe

Nuklid	Element	Historische Namen und Symbole		Halbwertszeit	Zerfallsart	
					α	β^-
^{238}U	Uran	Uran I	U I	$4,47 \cdot 10^9$ a	100 %	
^{234}Th	Thorium	Uran X_1	U X_1	24,1 d		100 %
^{234m}Pa	Protactinium	Uran X_2	U X_2	1,17 min		100 %
^{234}U	Uran	Uran II	U II	$2,46 \cdot 10^5$ a	100 %	
^{230}Th	Thorium	Ionium	Io	$7,54 \cdot 10^4$ a	100 %	
^{226}Ra	Radium	Radium	Ra	1600 a	100 %	
^{222}Rn	Radon	Ra-Emanation	Rn	3,82 d	100 %	
^{218}Po	Polonium	Radium A	Ra A	3,10 min	$\approx$ 100 %	0,02 %
^{214}Pb	Blei	Radium B	Ra B	26,8 min		100 %
^{218}At	Astatin	Radium B′	Ra B′	1,5 s	$\approx$ 100 %	0,1 %
^{214}Bi	Bismut	Radium C	Ra C	19,9 min		100 %
^{214}Po	Polonium	Radium C′	Ra C′	164 μs	100 %	
^{210}Th	Thallium	Radium C″	Ra C″	1,30 min		100 %
^{210}Pb	Blei	Radium D	Ra D	22,3 a		100 %
^{210}Bi	Bismut	Radium E	Ra E	5,01 d	10^{-4} %	$\approx$ 100 %
^{210}Po	Polonium	Radium F	Ra F	138 d	100 %	
^{206}Th	Thallium	Radium E″	Ra E″	4,20 min		100 %
^{206}Pb	Blei	Radium G	Ra G	∞		

Tabelle 4: Uran-Radium-Reihe

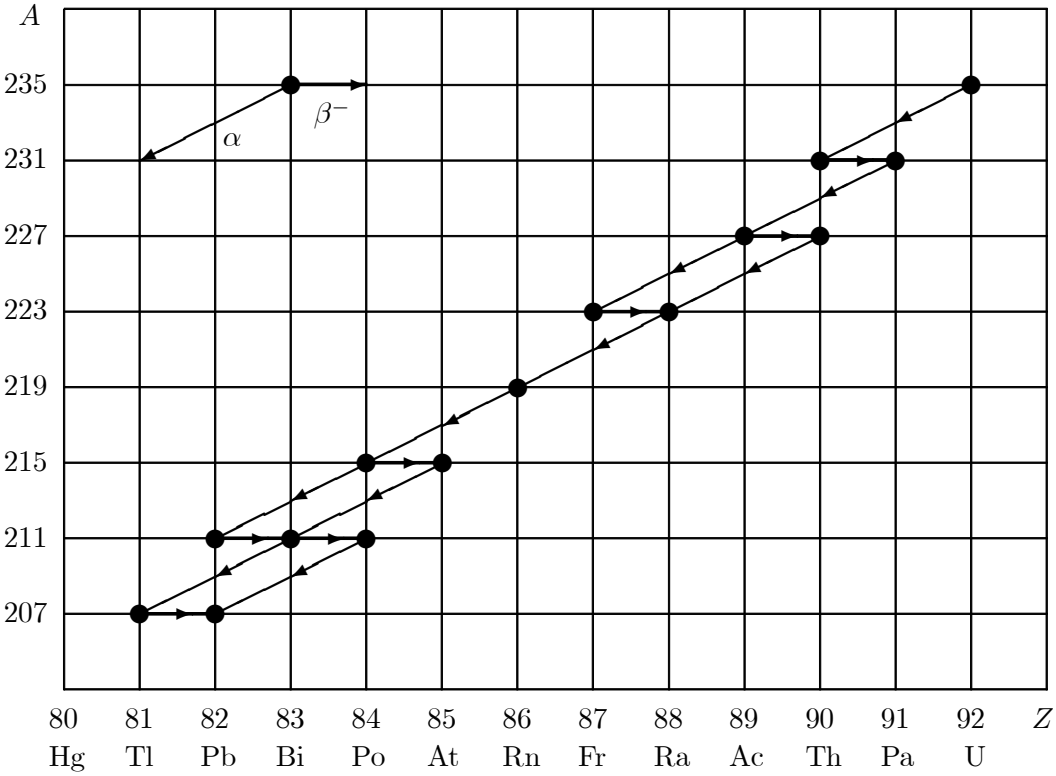

Abbildung 137: Uran-Actinium-Reihe

Nuklid	Element	Historische Namen und Symbole		Halbwertszeit	Zerfallsart	
					α	β^-
^{235}U	Uran	Actinouran	Ac U	$7,04 \cdot 10^8$ a	100 %	
^{231}Th	Thorium	Uran Y	U Y	25,6 h		100 %
^{231}Pa	Protactinium	Protactinium	Pa	$3,28 \cdot 10^4$ a	100 %	
^{227}Ac	Actinium	Actinium	Ac	21,8 a	1,4 %	98,6 %
^{227}Th	Thorium	Radioactinium	Rd Ac	18,7 d	100 %	
^{223}Fr	Francium	Actinium K	Ac K	22,0 min	$\approx$ 100 %	
^{223}Ra	Radium	Actinium X	Ac X	11,4 d	100 %	
^{219}Rn	Radon	Actinon	An	3,96 s	100 %	
^{215}Po	Polonium	Actinium A	Ac A	1,78 ms	$\approx$ 100 %	0,0002 %
^{211}Pb	Blei	Actinium B	Ac B	36,1 min		100 %
^{215}At	Astatin	Astatin	At	100 μs	100 %	
^{211}Bi	Bismut	Actinium C	Ac C	2,14 min	99,7 %	0,3 %
^{207}Tl	Thallium	Actinium C″	Ac C″	4,77 min		100 %
^{211}Po	Polonium	Actinium C′	Ac C′	0,516 s	100 %	
^{207}Pb	Blei	Actinium D	Ac D	∞		

Tabelle 5: Uran-Actinium-Reihe

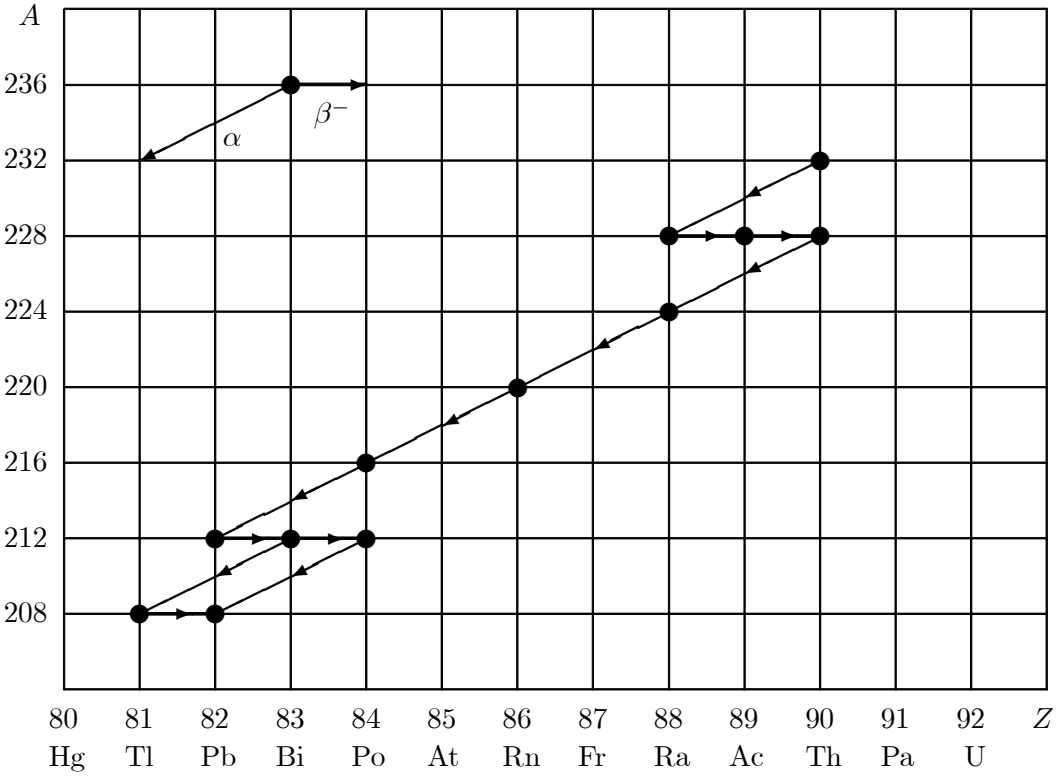

Abbildung 138: Thorium-Reihe

Nuklid	Element	Historische Namen und Symbole		Halbwertszeit	Zerfallsart	
					α	β^-
^{232}Th	Thorium	Thorium	Th	$1,40 \cdot 10^{10}$ a	100 %	
^{228}Ra	Radium	Mesothorium 1	Ms Th_1	5,75 a		100 %
^{228}Ac	Actinium	Mesothorium 2	Ms Th_2	6,15 h		100 %
^{228}Th	Thorium	Radiothorium	Rd Th	1,91 a	100 %	
^{224}Ra	Radium	Thorium X	Th X	3,66 d	100 %	
^{220}Rn	Radon	Thoron	Tn	55,6 s	100 %	
^{216}Po	Polonium	Thorium A	Th A	0,145 s	100 %	
^{212}Pb	Blei	Thorium B	Th B	10,6 h		100 %
^{212}Bi	Bismut	Thorium C	Th C	60,5 min	35,9 %	64,1 %
^{212}Po	Polonium	Thorium C′	Th C′	0,299 μs	100 %	
^{208}Tl	Thallium	Thorium C ″	Th C″	3,05 min		100 %
^{208}Pb	Blei	Thorium D	Th D	∞		

Tabelle 6: Thorium-Reihe

In der Natur existieren 20 Radionuklide mit sehr langer Halbwertszeit, die sich durch einen einzigen Zerfall in ein stabiles Nuklid umwandeln. Diese Nuklide mit ihren Halbwertszeiten T sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Nuklid	Element	T	Nuklid	Element	T
^{40}K	Kalium	$1,28 \cdot 10^{9}$ a	^{147}Sm	Samarium	$1,06 \cdot 10^{11}$ a
^{82}Se	Selen	$1,0 \cdot 10^{19}$ a	^{148}Sm	Samarium	$7,0 \cdot 10^{15}$ a
^{87}Rb	Rubidium	$4,8 \cdot 10^{10}$ a	^{152}Gd	Gadolinium	$1,1 \cdot 10^{14}$ a
^{113}Cd	Cadmium	$9 \cdot 10^{15}$ a	^{176}Lu	Lutetium	$3,6 \cdot 10^{10}$ a
^{115}In	Indium	$4 \cdot 10^{14}$ a	^{174}Hf	Hafnium	$2,0 \cdot 10^{15}$ a
^{123}Te	Tellur	$1,24 \cdot 10^{13}$ a	^{180} Ta	Tantal	$> 10^{13}$ a
^{128}Te	Tellur	$1,5 \cdot 10^{24}$ a	^{187}Rh	Rhodium	$5 \cdot 10^{10}$ a
^{130}Te	Tellur	$1,0 \cdot 10^{21}$ a	^{186}Os	Osmium	$2 \cdot 10^{15}$ a
^{138}La	Lanthan	$1,35 \cdot 10^{11}$ a	^{190}Pt	Platin	$6,1 \cdot 10^{11}$ a
^{144}Nd	Neodym	$2,1 \cdot 10^{15}$ a	^{204}Pb	Blei	$> 1,4 \cdot 10^{17}$ a

Tabelle 7: Natürliche Radionuklide ohne Zerfallsreihen

Zoll

1 Zoll = 2.54 cm

Zyklotron

Ein *Zyklotron* ist ein Teilchenbeschleuniger. In einem Zyklotron werden die Teilchen durch ein Magnetfeld auf spiralförmige Bahnen gezwungen. Zwei hohle, D-förmige Elektroden (*Dees*), an die eine hochfrequente Wechselspannung angelegt wird, beschleunigen die Teilchen. Das Prinzip der Anordnung ist in Abbildung 139 schematisch dargestellt. Zur Vereinfachung sind im Aufriss nur die Polschuhe des Zyklotronmagenten gezeichnet und im Grundriss ist die Vakuumkammer mit den Hochspannungsdurchführungen für die Hochfrequenzspannung der Dees und für die Hochspannung der Auslenkelektrode weggelassen.

Im Zentrum der Maschine befindet sich die Ionenquelle. Die emittierten Ionen werden bei jedem Umlauf durch das elektrische Feld zwischen den Dees beschleunigt.

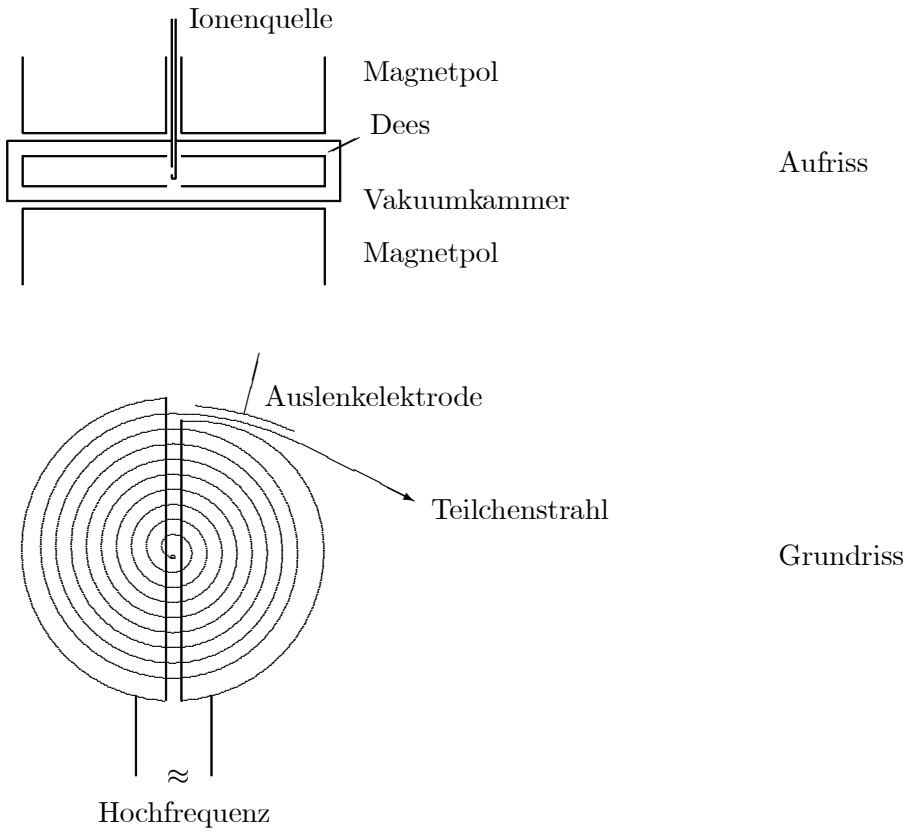

Abbildung 139: Zyklotron

Literatur

[1] Alvarez, Luis W.
Alvarez. Adventures of a Physicist
Basic Books, New York 1987.

[2] Anderson, William R.; Blair, Clay
Die abenteuerliche Fahrt der Nautilus
Kurt Deutsch, München 1959.

[3] Beach, Edward L.
Unter Wasser um den Erdball
Günther, Stuttgart 1954.

[4] Beck-Bornholdt, Hans-Peter; Dubben, Hans-Hermann
Der Hund, der Eier legt. Erkennen von Fehlinformation durch Querdenken
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 1998.

[5] Bernstein, Jeremy
Prophet der Energie: Hans Bethe
Hirzel, Stuttgart 1988.

[6] Böhm, Karl; Dörge, Rolf
Gigant Atom
Verlag neues Leben, Berlin 1960.

[7] Chen, W.L. et al.
Is Chronic Radiation an Effective Prophylaxis Against Cancer?
Journal of American Physicians and Surgeons **9**, No. 1, 6 (2004).

[8] Corliss, William R.
Nuclear Propulsion for Space
U.S. AEC, Division of Technical Information

[9] Dubben, Hans-Hermann; Beck-Bornholdt, Hans-Peter
Mit an Wahrscheinlichkeit grenzender Sicherheit. Logisches Denken und Zufall
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 2005.

[10] Fermi, Enrico
Experimental Production of a Divergent Chain Reaction
American Journal of Physics **20**, 536 (1952).

[11] Fermi, Enrico
Nuclear Physics
University of Chicago Press, Chicago 1958.

[12] Feynman, Richard P.
„Surely You're Joking, Mr. Feynman!“
Unwin Paperbacks, London 1986.

[13] Feynman, Richard P.
„What Do You Care What Other People Think?“
W.W.Norton, New York 1988.

[14] Fischer, Ernst Peter
Niels Bohr
Piper, München 1987.

[15] Frisch, Otto Robert
Woran ich mich erinnere
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1981.

[16] Fritz-Niggli, Hedi
Strahlengefährdung/Strahlenschutz
Hans Huber, Bern 1991.

[17] Gabler, Ulrich
Unterseebootbau
Bernard & Graefe, Bonn 1997.

[18] Glasstone, Samuel; Sesonske, Alexander
Nuclear Reactor Engineering
D. Van Nostrand, Princeton 1967.

[19] Gleick, James
Genius. The Life and Science of Richard Feynman
Pantheon Books, New York 1992.

[20] Goodchild, Peter
J. Robert Oppenheimer
Ex Libris, Zürich 1984.

[21] Gribbin, John und Mary
Richard Feynman
Piper, München 1997.

[22] Groueff, Stephane
Manhattan Project
iUniverse, Lincoln NE 2000.

[23] Hahn, Otto
Mein Leben
Piper, München 1986.

[24] Hanle, W. et al.
Isotopentechnik
Karl Thiemig, München 1964.

[25] Hanle, W. Hrsg.
Partikel-Beschleuinger
Karl Thiemig, München 1967.

[26] Hawkins, David; Truslow, Edith; Smith, Ralph Carlisle
Project Y. The Los Alamos Story
Tomash Publishers, Los Angeles, San Francisco 1983.

[27] Hermann, Armin
Die Jahrhundertwissenschaft.
Werner Heisenberg und die Geschichte der Atomphysik
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 1993.

[28] Hermann, Armin
Heisenberg
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 1976.

[29] Hermann, Armin
Planck
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 1973.

[30] Hertz, G. Hrsg.
Lehrbuch der Kernphysik
Band 1 Experimentelle Verfahren
Teubner, Leipzig 1958.

[31] Hertz, G. Hrsg.
Lehrbuch der Kernphysik
Band 2 Physik der Atomkerne
Teubner, Leipzig 1958.

[32] Hoddeson, L.; Henriksen, P.W.; Meade, R.A.; Westfall, C.
Critical Assembly
Cambridge University Press, New York 1993.

[33] Jacobi, Wolfgang
Strahlenschutzpraxis
Teil I Grundlagen
Karl Thiemig, München 1962.

[34] Kiefer, H.; Koelzer, W.
Strahlen und Strahlenschutz
Springer, Berlin, Heidelberg 1986.

[35] Krafft, Fritz Hrsg.
Vorstoss ins Unbekannte. Lexikon grosser Naturwissenschaftler
Wiley-VCH, Weinheim 1999.

[36] Kragh, Helge
Quantum Generations. A History of Physics in the Twentieth Century
Princeton University Press, Princeton, New Jersey 2002.

[37] Krämer, Walter
Denkste! Trugschlüsse aus der Welt der Zahlen und des Zufalls
Piper, München, Zürich 2000.

[38] von Laue, Max
Geschichte der Physik
Ullstein, Frankfurt am Main, Berlin 1966.

[39] Macrae, Norman
John von Neumann
Birkhäuser, Basel 1994.

[40] Neffe, Jürgen
Einstein
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 2005.

[41] Niu, Keishiro
Nuclear fusion
Cambridge University Press, Cambridge 1989.

[42] Norris, Robert S.
Racing for the Bomb
Steerforth Press, South Royalton, Vermont 2002.

[43] Pais, Abraham
Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World
Oxford University Press, New York 1988.

[44] Peierls, Rudolf
Bird of Passage
Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1985.

[45] Raeder, J. et al.
Kontrollierte Kernfusion
Teubner, Stuttgart 1981.

[46] Rausch, Ludwig
Strahlenrisiko!?
Piper, München 1979.

[47] Rebhan, Eckhard
Heisser als das Sonnenfeuer. Plasmaphysik und Kernfusion
Piper, München 1992.

[48] Rhodes, Richard
Die Atombombe
Greno, Nördlingen 1988.

[49] Ruh, Arthur
Atom- und Quantenphysik
HSR[60], Rapperswil 2002.

[50] Ruh, Arthur
Kontrollierte Kernfusion
ITR[61], Rapperswil 1992.

[51] Segrè, Emilio
Die grossen Physiker und ihre Entdeckungen
Piper, München 1981.

[52] Smyth, Henry DeWolf
Atomic Energy for Military Purposes
Stanford University Press, Stanford 1989.

[53] Villani, S. ed.
Uranium Enrichment
Topics in Applied Physics, Volume 35
Springer, Berlin Heidelberg 1979.

[60] Hochschule für Technik, Rapperswil
[61] Interkantonales Technikum Rapperswil, heute: HSR, Hochschule für Technik, Rapperswil

[54] Weisskopf, Victor
The Joy of Insight
Basic Books, New York 1991.

Internet

Röntgen
http://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Conrad_Röntgen
http://www.dhm.de/lemo/html/biografien/RoentgenWilhelm
http://www.roentgen-museum.de
http://www.wilhelmconradroentgen.de
http://www.deutsches-museum.de/sammlungen/ausgewaehlte-objekte/
meisterwerke-ii/roentgen/roentgen-grossansicht
http://www.uni-kiel.de/anorg/lagaly/group/klausSchiver/roentgen.pdf

Gasentladungen
http://de.wikipedia.org/wiki/Gasentladung
http://de.wikipedia.org/wiki/Geisslerröhre
http://www.infogr.ch
http://www.infogr.ch/roehren/default.htm

Elektronen
http://www.infogr.ch/roehren/ELEKTRON/default.htm
http://www.gagfactory.com/misc/cotti/Elektron.pdf

Röntgenröhren
http://de.wikipedia.org/wiki/Röntgenstrahler
http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_tube
http://members.chello.nl/ h.dijkstra19/page5.html

Röntgenstrahlung
http://de.wikipedia.org/wiki/Röntgenstrahlung
http://www.desy.de/pr-info/Roentgen-light/index.html
http://www.stmugv.bayern.de/umwelt/strahlenschutz/roentgen/medizin.htm
http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skript_ppt_07/Roe_in_der_Medizin.ppt

Radioaktivität
http://de.wikipedia.org/wiki/Antoine_Henri_Becquerel
http://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktivität
http://www.atomenergie.ch/de/radioaktivitaet.htm
https://www.naz.ch/de/downloads/BAG-Broschuere.pdf
http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/index.html?lang=de
http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm
http://www.info-uhren.de/technik/leucht/uhrenleuchtfarben.htm
http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/studium/generale/ws0405/hehl
/Radioaktivitaet_SG.ppt
http://www.studerhard.ch

Ionisierende Strahlung
http://de.wikipedia.org/wiki/Ionisierende_Strahlung
http://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation
http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlenbelastung
http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlendosis
http://de.wikipedia.org/wiki/Strahlenrisiko
http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11belast/belast.htm
https://www.naz.ch/de/downloads/BAG-Broschuere.pdf

http://www.win-swiss.ch/de/radioaktivitaet.htm
http://www.risiko.unibe.ch/content/arbeitssicherheit_und_
gesundheitsschutz/strahlenschutz/index_ger.html

Radonkuren
http://www.radon-info.de/shtml/geschichte.shtml
http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/strahlenschutz/2380.htm
http://www.aerztezeitung.de/suchen/?sid=351409&query=risiko+and+lungenkrebs
http://www.radonmine.com/pdf/onecentury.pdf
http://www.umweltlexikon-online.de/fp/archiv/RUBradioaktivitaet/Radonkuren.php
http://gasteiner-heilstollen.info/dt/radontherapie.htm

Hormesis
http://www.angelfire.com/mo/radioadaptive/inthorm.html
http://www.energie-fakten.de/html/hormesis.html
http://www.gfstrahlenschutz.de/docs/hormesis.pdf
http://www.giriweb.com/luckey.htm
http://www.solidaritaet.com/fusion/1997/2/luckey.htm
http://www.ehponline.org/members/1998/Suppl-1/357-362calabrese/full.html

Neutrinos
http://web.physik.rwth-aachen.de/ hebbeker/lectures/sem0304/hof.pdf
http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326606.pdf
http://www.ps.uci.edu/physics/news/nuexpt.html
http://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli
http://de.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli

Atomkern
http://de.wikipedia.org/wiki/Atom
http://en.wikipedia.org/wiki/Atom
http://web.physik.rwth-aachen.de/ roth/physik4
http://web.physik.rwth-aachen.de/ roth/physik4/kapitel3.pdf
http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/GM-1909.html
http://de.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford
http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford
http://de.wikipedia.org/wiki/Atomkern
http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_nucleus
http://www.roro-seiten.de/physik/index.html
http://www.roro-seiten.de/physik/kerne/index.html
http://de.wikipedia.org/wiki/Bindungsenergie
http://en.wikipedia.org/wiki/Binding_energy
http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/materialseiten/m11_kerne.htm

Neutron
http://de.wikipedia.org/wiki/Neutron
http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron
http://www2.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld3_E/3Part1_E/3P13_E
/DiscoverNeutron_E.htm
http://de.wikipedia.org/wiki/James_Chadwick
http://en.wikipedia.org/wiki/James_Chadwick

Teilchenphysik
http://de.wikipedia.org/wiki/Teilchenphysik
http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_physics
http://de.wikipedia.org/wiki/Quark_%28Physik%29
http://en.wikipedia.org/wiki/Quark

Kernspaltung
http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission
http://www.atomenergie.ch/de/kernspaltung.html
http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/ep/ep0404/0404_oklo.html

Kettenreaktion
http://de.wikipedia.org/wiki/Kettenreaktion
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chain_reaction
http://de.wikipedia.org/wiki/Kritikalität
http://en.wikipedia.org/wiki/Critical_mass
http://www.ap.smu.ca/demos/content/modern/mousetrap_reactor/mousetrap_reactor.html

Manhattan-Projekt
http://de.wikipedia.org/wiki/Manhattan-Projekt
http://en.wikipedia.org/wiki/Manhattan_Project
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/events.htm
http://www.atomicmuseum.com/Tour/manhattanproject.cfm
http://www.atomicarchive.com/History/mp/index.shtml
http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Med/Med.html
http://www.mphpa.org/classic/HISTORY/ERC-1.htm
http://www.hcc.mnscu.edu/programs/dept/chem/abomb/index.html
http://www.ask.ne.jp/ hankaku/english/np5y.html

Oak Ridge
http://en.wikipedia.org/wiki/Oak_Ridge,_Tennessee
http://www.ornl.gov/ornlhome/ornl_first_fifty_years.shtml
http://en.wikipedia.org/wiki/Y-12_National_Security_Complex
http://dsd.lbl.gov/ImgLib/COLLECTIONS/BERKELEY-LAB/ACCELERATORS
/CALUTRONS/images
http://smithdray1.net/angeltowns/or/calutronsplowshares.htm
http://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/ur-enrichment.html
http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/enrichment.html
http://en.wikipedia.org/wiki/K-25
http://en.wikipedia.org/wiki/Oak_Ridge_National_Laboratory
http://www.atomicarchive.com/History/sites/K_25.shtml
http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_35050.html
http://en.wikipedia.org/wiki/X-10_Graphite_Reactor
http://www.ornl.gov/info/news/cco/graphite.htm

Chicago-Pile 1
http://de.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile
http://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/cp-1_critical.htm
http://www.npp.hu/index-e.htm

http://www.npp.hu/tortenelem/genezis-e.htm
http://www.orau.org/ptp/Library/firstreactor.pdf

Plutonium
http://de.wikipedia.org/wiki/Plutonium
http://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium
http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818006.pdf

Hanford
http://de.wikipedia.org/wiki/Hanford_Site
http://en.wikipedia.org/wiki/Hanford_Site
http://www.hanford.gov/?page=81&parent=15
http://www.atomicarchive.com/History/mp/p4s23.shtml
http://nalu.geog.washington.edu/dms/areas/100/100_overview_content.html

Los Alamos
http://www.lanl.gov/history/overview.shtml
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/publications/LANLMDHNonscientificAspects.pdf
http://www.atomictraveler.com/DownloadDocuments.htm

Atomkraftwerke
http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_plant
http://de.wikipedia.org/wiki/Kernreaktor
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor_technology
http://www.buerger-fuer-technik.de
http://www.nuklearforum.ch/118000901185-de-index.html
http://www.aurora-magazin.at/gesellschaft/atom_boeck_druck.htm
http://www.energie.ch/et/kraftwerke/atom/typen.htm
http://www.iaea.org/NuclearPower/Engineering/Publications
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PubDetails.asp?pubId=7795
http://www.kernenergie.de/r2/de/Gut_zu_wissen/?navanchor=1210011
http://www.kkg.ch/Portrait_neu.cfm?job=5764972&fsee=1
http://www.kernenergie.de/r2/de/Gut_zu_wissen/Materialien/Downloads
/?navanchor=1010023&navanchor=1210062
http://www-formal.stanford.edu/jmc/progress/nuclear-faq.html

Atomauto
http://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Nucleon
http://davidszondy.com/future/atomic/ford.htm
http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=3359
http://www.damninteresting.com/?p=656
http://www.castor.de/technik/atomkraft/8_1955/16.html

Atomflugzeug
http://www.aerospaceweb.org/aircraft/bomber/b36
http://www.megazone.org/ANP
http://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_Nuclear_Propulsion
http://www.brookings.edu/projects/archive/nucweapons/anp.aspx
http://www.duotone.com/coldwar/anp/index.html
http://www.strange-mecha.com/aircraft/APA/APA.html
http://www.military.com/Content/MoreContent1/?file=cw_atomicairpower

http://www.islandone.org/Propulsion/AtomPlane.html
http://de.wikipedia.org/wiki/Convair_B-36
http://en.wikipedia.org/wiki/Convair_B-36
http://www.air-and-space.com/b-36%20variants.htm
http://www.learnworld.com/ZNW/LWText.York.Race.Ch04.html
http://home.att.net/ jbaugher2/b36_14.html
http://www.nuclear.com/history/Nuclear_airplanes.html
http://fti.neep.wisc.edu/neep602/SPRING00/TERMPAPERS/stoffel.pdf
http://www.airfields-freeman.com/ID/Airfields_ID_N.htm

Atomlokomotive
http://www.internationalsteam.co.uk/trains/newsteam/modern16.htm
http://www.trainweb.org/tusp/patents.html

Atomrakete
http://www.algebra.com/algebra/about/history/Nuclear-thermal-rocket.wikipedia
http://www.asbestosguru-oberta.com/rocketscience.htm
http://area51specialprojects.com/nerva.html
http://www.larouchepub.com/other/2004/sci_techs/3147nukes_space.html
http://www.ninfinger.org/ sven/models/vault2004/more%20nerva%20madness
http://www.aemann.pwp.blueyonder.co.uk/spacecraft/nerva/reactor.html
http://www.astrodigital.org/space/nuclear.html
http://www.lanl.gov/news/dateline/Dateline0198.pdf
http://en.wikipedia.org/wiki/Project_Orion_(nuclear_propulsion)
http://en.wikipedia.org/wiki/Project_Daedalus
http://en.wikipedia.org/wiki/Project_Longshot
http://www.geocities.com/TelevisionCity/2049/DAEDALUS.HTM
http://www.bisbos.com/rocketscience/spacecraft/daedalus/daedalus.html
http://www.bisbos.com/rocketscience/spacecraft/orion/index.html

Atomschiffe
http://de.wikipedia.org/wiki/USS_Nautilus_(SSN-571)
http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Nautilus_%28SSN-571%29
http://www.ussnautilus.org/history.html
http://www.geocities.com/capecanaveral/1056/nautilus.htm
http://de.wikipedia.org/wiki/USS_Triton_(SSRN-586)
http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Triton_(SSRN-586)
http://www.navysite.de/ssn/ssn586.htm
http://de.wikipedia.org/wiki/USS_Enterprise_(CVN-65)
http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Enterprise_%28CVN-65%29
http://www.navysite.de/cvn/cvn65.html
http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/ships/carriers/histories/cv65-enterprise
/cv65-enterprise.html
http://de.wikipedia.org/wiki/USS_Long_Beach_(CGN-9)
http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Long_Beach_%28CGN-9%29
http://www.navysite.de/cg/cgn9.htm
http://de.wikipedia.org/wiki/USS_Bainbridge_(CGN-25)
http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Bainbridge_(CGN-25)
http://navysite.de/cg/cgn25.htm
http://de.wikipedia.org/wiki/NS_Savannah
http://en.wikipedia.org/wiki/NS_Savannah

http://gcaptain.com/maritime/blog/the-worlds-first-nuclear-merchant-ship-ns-savannah
http://de.wikipedia.org/wiki/Otto_Hahn_(Schiff)
http://www.philatel.net/Otto-Hahn/data.html
http://en.wikipedia.org/wiki/Mutsu_(ship)
http://shippai.jst.go.jp/en/Detail?fn=2&id=CA1000615
http://de.wikipedia.org/wiki/Atomeisbrecher
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_powered_icebreaker
http://www.npp.hu/mukodes/tipusok/jegtoro-e.htm

Fusion
http://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion
http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/pdf/berichte.pdf
http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/links/index.html
http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK&node=0738&document=ID_001790
http://de.wikipedia.org/wiki/Tokamak
http://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak
http://www.toodlepip.com/tokamak
http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/exptypen/tokamak/index.html
http://www.toodlepip.com/tokamak/table-of-tokamaks.pdf
http://www.fusion.org.uk/st/index.html
http://de.wikipedia.org/wiki/Stellarator
http://en.wikipedia.org/wiki/Stellarator
http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/exptypen/stellarator/index.html
http://de.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus
http://en.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus
http://www.jet.efda.org/pages/jet.html
http://de.wikipedia.org/wiki/Internationaler_Thermonuklearer_Experimenteller_Reaktor
http://en.wikipedia.org/wiki/ITER
http://www.iter.org
http://www.fusion-eur.org/fusion_cd/inertial.htm
https://www.llnl.gov/str/Remington.html
http://www.nuc.berkeley.edu/thyd/icf/IFE.html#energy
https://lasers.llnl.gov
http://www.gsi.de/portrait/Broschueren/Wunderland/09.html
http://hifweb.lbl.gov/public/USJapanWorkshop2006/2.01.Logan.pdf
http://epaper.kek.jp/a01/PDF/FRB01.pdf
http://hif.lbl.gov/tutorial/tutorial.html

Index

A, 132
Abelson, P., 55
Abfall
    radioaktiver, 121
abgereichert, 70
absorbierte Dosis, 21
Absorption, 10
Advisory Committee, 53, 56
AEC, 92
Aktivierungsanalyse, 16
allotrope Modifikationen, 132
Alpha-Calutron, 66
Alphastrahlen, 9
Alphateilchen, 9, 35, 45, 132
Alphazerfall, 9, 30
Alvarez, L., 49
Ampere, 132
Ampère, A.M., 132
Anderson, C.D., 33, 43
Anderson, H.L., 77
Anfahrzeit, 72
angereichert, 51, 61, 70
Anode, 140
Anordnung
    unterkritische, 77
ANP, 92
Anreicherung, 61, 75
Anreicherungsfaktor, 69, 70
Antineutrino, 33, 155
Antiteilchen, 32, 154
Anwendungen
    diagnostische, 14, 16
    medizinische, 11
    technische, 14
    therapeutische, 14
Äquivalentdosis, 21, 132
Arbeit, 133
Area 25, 96
Asche, 110
Atom, 143
Atomantriebe, 86
Atomauto, 88
Atombombe, 51, 54, 55
Atombomben, 52
Atome, 34
Atomenergie, 50, 81, 86
Atomexplosion, 50
Atomflugzeuge, 92
Atomhülle, 38
Atomkern, 34, 37, 38, 143
Atomkerne, 45
Atomkraftwerke, 86
Atomlokomotiven, 90
Atommasse, 38
Atommodell
    Rutherfordsches, 37
    Thomsonsches, 34
Atommotoren, 89
Atomrakete, 93
Atomraketen, 95
Atomschiffe, 99
Atomunterseeboot, 99
Atomwaffenprogramm, 56
Atomwaffentests, 24
Aufheizung, 109, 115
Auslösezählrohr, 35
Ausschliessungsprinzip, 30, 163

B-36H, 94
B-52, 95
B-Plant, 85
B-Reaktor, 83
Ballon, 77
Bandgenerator, 172
bar, 134
barrier, 71
Baryonen, 44, 134, 150
beauty, 168
Becquerel, A.H., 7
Beschleuniger, 134
Beschleunigung, 134
Bestrahlungen, 5
    technische, 18
Bestrahlungsweise, 25
Beta-Calutron, 66
Betastrahlen, 9
Betateilchen, 9
Betazerfall, 30
    Theorie, 40
Betrieb
    intermittierender, 110
    kontinuierlicher, 110
Beugung, 5, 135
Beznau, 86
Bindungsenergie, 42

pro Nukleon, 42
biologische Strahlenwirkungen, 20, 25
Blanket, 105, 114, 120
Bohr, N., 30, 49, 54, 77
Bombe, 54, 59
Bor, 77
Bose, S.N., 135
Bosonen, 135
bottom, 168
Brechung, 135
Brennbereich, 123
Brennkammer, 95, 121
Brennstoff, 86, 120, 135, 153
Brennstoffzufuhr, 110, 122
Bretscher, E., 55
Briggs, L.J., 53
Brüter
schnelle, 87
thermische, 88
Brutreaktor, 87
Bush, V., 56

C, 135
Cäsium-135, 84
Cadarache, 114
Calder Hall, 86
Calutron, 65
Chadwick, J., 40
charm, 168
chemische Energie, 145
chemische Trennanlage, 85
chemisches Element, 34, 38
Chicago-Pile 1, 77
Clinton Engineer Works, 58
Clinton-Pile, 81, 82
Cockroft, D., 121
Cockroft-Walton-Generator, 135
Compton, A.H., 78, 81
Conant, J.B., 56
Coulomb, 135
Coulomb, C.A. de, 135
Cowan, C., 32
CP-1, 77
Crookes, W., 1
Culham, 112
Curie, M., 8, 45
Curie, P., 8, 45
CVN-65, 100
CVN-78, 100

D-Reaktor, 83, 85
D-T-Gemisch, 117
D-T-Plasma, 112
Daedalus, 98
Dampferzeuger, 87
Dampfturbinen, 87
DD-Reaktion, 105
Deuterium, 39, 104, 112, 116, 120, 121, 136
Deuteriumkern, 104
Deuteron, 41, 136
Deuteronen, 121
diagnostische Anwendungen, 14, 16
Diffraktion, 135
Diffusion, 68
Diffusionstank, 70
Dipol
elektrischer, 139
magnetischer, 155
Dipolmoment, 139
elektrisches, 139
magnetisches, 155
Dirac, P.A.M., 33
Doramad, 11
Dosis, 20, 25, 137
absorbierte, 21
Dosisleistung, 21
down, 168
Drehimpuls, 137
Drehimpulserhaltungssatz, 30, 137
Drehimpulssatz, 137
Drehmoment, 138
driver, 116
Druckwasserreaktor, 86
DT-Brennstoff, 104
DT-Reaktion, 104
Dunning, J.R., 55

Einheitenvorsätze, 138
Einschluss
magnetischer, 106
Einschluss des Plasma, 105
Einschlusszeit, 123
Einstein, A., 50, 53
Eisbrecher, 101
elektrische Energie, 144
elektrische Ladung, 32
elektrische Leistungen
KKW, 86
elektrischer Dipol, 139
elektrisches Dipolmoment, 139
elektrisches Feld, 140

Elektrode, 140
Elektrolyse, 34
elektromagnetische Induktion, 152
elektromagnetische Separation, 62, 63
elektromagnetische Welle, 141
elektromagnetische Wellen, 9
Elektron, 34
Elektron-Neutrino, 155
Elektronen, 2, 9, 105
Elektronenstrahlen, 116
Elektronenzahl, 33, 154
Elektronvolt, 141
Elektroskop, 142
Element
  chemisches, 34, 38
Elementarladung, 38, 142
Elementarteilchen, 32, 142
Energie, 143
  chemische, 145
  elektrische, 144
  innere, 145
  kinetische, 143
  potentielle, 144
Energieabsorption, 21
Energiedosis, 21, 145
Energieerhaltungssatz, 11, 30, 145
Energiesatz, 145
Energieverluste, 110
Energieverstärkungsfaktor, 114
Enterprise, 100
erg, 146
erste Kernreaktoren, 77
erste selbsterhaltende Kettenreaktion, 79
erste Wand, 120
erstes Kernkraftwerk, 86
eV, 146
Everett, C., 98
EX, 97
Exponentialfunktion, 146

F-Reaktor, 83, 85
Familien, 154
Faraday, M., 34
Feather, N., 55
Feld, 146
  elektrisches, 140
  magnetisches, 156
Feldlinien, 10, 147
Fermi, E., 31, 40, 45, 77, 79, 84
Fermionen, 30, 147
Fernsehgeräte, 24
Fission, 42
flavor, 168
flavour, 168
Flüge, 24
Flugzeugträger, 100
Fluoreszenz, 1, 147, 164
Fluorwasserstoff, 62
Flüssigkeitstropfen, 43
Forschungsreaktoren, 86
Fraktionen, 61
freie Weglänge, 148
Frisch, O., 47, 49, 54
Frühschäden, 25
fundamentale Teilchen, 143
Funkeninduktor, 2
Funktion, 148
Fusion, 42, 104
Fusionsbrennstoff, 115, 116
Fusionsenergie, 112
Fusionsexperimente, 123
Fusionsleistung, 112, 114
Fusionsprodukt, 123
Fusionsreaktionen, 104
Fusionsreaktor, 120, 121
Fusionswaffen, 115

Gamma-Radiographie, 16
Gammastrahlen, 9, 26
Ganzkörperbestrahlung, 25
Garching, 108
Gas, 105
Gasdiffusion, 62, 68
Gasdiffusionsanlage, 61, 72
Gasentladung, 1
gasgekühlte Reaktoren, 87
Gaszentrifugen, 62, 63
Geheimhaltung, 59, 81
Geiger, H.W., 35
Geiger-(Müller)-Zählrohr, 35
Geissler, H., 1
Geissler-Röhre, 1
Gell-Mann, M., 44
Generationen, 154
Generator, 87
gepulste Nuklearantriebe, 98
Geschwindigkeit, 149
GeV, 149
Gewicht, 149
Gläser, 14

Glasuren, 14
Goldhaber, M., 41
Goldstein, E., 1
Gösgen, 86
Graphit, 51, 77, 82
Gravitationseinschluss, 106
Gray, 21, 150
Gray, L.H., 150
Greinacher, H., 135
Grossraumbahnen, 90
Groves, L.R., 57, 59, 72, 74
Guarapari, 22
Gy, 150

h, 150
$\hbar$, 150
H-Reaktor, 83
Hadronen, 44, 150
Hahn, O., 46
Halbleiter, 150
Halbleiterdiode, 151
Halbwertszeit, 9, 11, 151
Handelsschiffe, 101
Hanford, 83
Hanford-Reaktoren, 83
Harkins, W.D., 40
Harteck, P., 121
Harwell, 121
Hautbräunung, 26
Hautverbrennungen, 27
Heisenberg, W.K, 40
Heizmethoden, 109
Helium, 82
Helium-4-Kern, 104
Heliumatome, 9
Helmholtz, H. von, 176
Hittorf, J.W., 1
Hittorf-Röhren, 2
Hochfrequenzheizung, 109, 112
Hochtemperaturreaktoren, 87
Hohlraum-Targets, 117
holdup, 72
homogenes Magnetfeld, 106
Hormesis, 28
HTRE, 93
Hyperonen, 134

Impuls, 151
Impulserhaltungssatz, 152
Impulssatz, 152
Indikatormethode, 14, 16
Induktion, 109
    elektromagnetische, 152
innere Energie, 145
Instabilitäten, 110, 117
intermittierender Betrieb, 110
International Thermonuclear Experimental Reactor, 113
Inventar, 72
Iod-135, 84
Ionen, 20, 105
Ionenstrahlen, 116
ionisierende Strahlung, 20
ionisiert, 105
Isotop, 152
Isotope, 14, 39
    radioaktive, 45
Isotopenanteile, 61
Isotopengemisch, 61
Isotopenproduktion, 86
Isotopenseparation, 56
Isotopentrennung, 54, 55
Isotopentrennverfahren, 61
Isotopenverhältnis, 70
Isotopieverschiebung, 76
ITER, 111, 113, 114, 123
Iwanenko, D.D., 40

J, 152
J47, 93, 94
JET, 111, 112, 114
Joint European Torus, 112
Joule, 152
Joule, J.P., 152, 176

K, 152
K-25, 72, 75
Kadmium, 78
Kahl, 86
Kaliumuranylsulfat, 7
Kalorie, 175
Kaskade, 62, 72
Kaskaden-Generator, 135
Kathode, 140
Kathodenstrahlen, 1, 9
Kaufmann, W., 9
Kausalität, 11
Kelvin, 153
Kennedy, J.W., 55
Kerala, 22
Kernbrennstoff, 153
Kernenergie, 50

Kernkräfte, 41
Kernkraftwerk
erstes, 86
Kernkraftwerke, 24, 62, 88
Kernladungszahl, 38
Kernreaktionen, 45
Kernreaktor, 50, 77, 96
Kernreaktoren
erste, 77
Kernspaltung, 45
Entdeckung, 47
Kernspaltungsbombe, 115
Kernumwandlungen
künstliche, 45
Kernverschmelzung, 104
Kernwaffen, 62
Kettenreaktion, 45, 49, 51, 54, 56
erste selbsterhaltende, 79
selbsterhaltende, 77
keV, 153
kinetische Energie, 143
Kiwi, 96
Kiwi A, 96
Kiwi B, 96
Kleinquellen, 24
Kobalt-60, 28
Kölliker, R.A. von, 5
Kommunikations-Satelliten, 98
Kompression, 115, 117
Kondensator, 87
kontinuierlicher Betrieb, 110
Kontrollstäbe, 78
Kontrollstab, 79
körperinnere Strahlung, 22
kosmische Strahlung, 22
Krebs, 27
Krebsgeschwüre, 5
Krebshäufigkeit, 29
Kreuzer, 101
Kritikalität, 50
kritisch, 51, 84
kritische Masse, 51, 54, 55
Kühlmittel, 86
Kühlturm, 87
künstliche Radioaktivität, 45
künstliche Kernumwandlungen, 45
künstliche Strahlenbelastung, 24

Ladung, 153
elektrische, 32
langsame Neutronen, 54
Laser, 62, 116
Laseranreicherung, 76
Laserfusion, 116
LASL, 96
Latenzzeit, 25
Laue, M. von, 5
Lawrence, E.O., 59, 65
Lebensdauer, 110
Leibstadt, 86
leichtwassergekühlte Graphitreaktoren, 87
Leichtwasserreaktor, 86
Leichtwasserreaktoren, 62
Leistung, 94, 154
CP-1, 81
EX, 97
Kiwi, 96
Phoebus, 96
thermische, 81, 83
X-10, 83
Leistungen
KKW, 86
Lenard, P.E.M., 2
Lenin, 101
Leptonen, 43, 154
Leptonenzahl, 33, 154
Leuchtfarben, 17
Leuchtzifferblätter, 24
Lichtjahr, 155
Lithium, 120
Long Beach, 101
Longshot, 99
Los Alamos, 59
Ludwig, C., 73
Lumineszenz, 147, 164

Magnetfeld, 10, 156
homogenes, 106
poloidales, 109
toroidales, 109
torusförmiges, 107
magnetischer Dipol, 155
magnetischer Einschluss, 106
magnetisches Dipolmoment, 155
magnetisches Feld, 156
magnetisches Moment, 32, 155, 156
Maiman, T., 76
Manhattan Engineer District, 57
Manhattan Project, 57
Mantelschicht, 105

Marsden, E., 35
Marsmission, 97
Masse, 157
    kritische, 51, 54, 55
Massendurchsatz, 64
Massenformel, 49
    semiempirische, 43
Massenspektrometer, 54, 63
Massenträgheitsmoment, 158
Massenzahl, 38
Materialbeanspruchung, 110
MAUD-Komitee, 54, 56
MAUD-Report, 56
Mayer, J.R., 175
McMillan, M., 55
medizinische Anwendungen, 11
Medusa, 99
Meitner, L., 46
membrane, 71
Mendelejew, D.I., 44
Mesonen, 43, 44, 150, 158
MeV, 158
Meyer, J.L., 44
μm, 158
Millikan, R.A., 34
Modell, 111
Moderator, 51, 82, 86
Molekularkräfte, 43
Moment
    magnetisches, 32, 155, 156
Mühleberg, 86
Multiplikation, 159
Multiplikationsfaktor, 51, 77, 78, 80, 159
Mutsu, 102
μ-Meson, 43
Myon, 33, 43
Myon-Neutrino, 155
Myonenzahl, 154

N, 159
natürliche Radioaktivität, 45
National Ignition Facility, 116, 118
natürliche Strahlenbelastung, 22
natürliche Zerfallsreihen, 182
natürlicher Wasserstoff, 120
natürliches Uran, 61
Natururan, 82
Nautilus, 99
NB-36H, 94
NDRC, 56
NDRS, 96
Nebelkammer, 160
Neddermeyer, S.H., 33
Ne'eman, Y., 44
NEPA, 92
Neptun, 55
Neptunium, 50, 55
NERVA, 96
NET, 113
Neutralteilcheninjektion, 109, 112
Neutrino, 31, 154
    Nachweis, 31
Neutrinohypothese, 31
Neutron, 39, 40, 104, 160
    Entdeckung, 40
Neutronen, 31, 45
    langsame, 54
    schnelle, 45, 51, 54
    thermische, 45, 51, 171
Neutronenverluste, 77
Newton, 160
Newton, I., 160
Newtonsche Gesetze, 161
Next European Torus, 113
Next Joint European Torus, 113
nichtrelativistisch, 162
nichtstochastische Strahlenschäden, 26
Nier, A.O.C., 54
NIF, 116, 118
nm, 162
Noddack, I., 46
Nova, 118
NRX, 97
Nuklearantriebe
    gepulste, 98
Nuklearmedizin, 24
nuklearthermische Raketen, 95
Nukleon, 162
Nukleonen, 40, 143
Nuklid, 9, 162

Oak Ridge, 58, 67, 72, 82
Oak Ridge National Laboratory, 58
Oberflächenspannung, 43
Oliphant, M., 54, 56, 121
$^-$, 44
Oppenheimer, J.R., 49, 53, 59, 74
Ordnungszahl, 34, 38
Orion, 98
ORNL, 58

OSRD, 56
Otto Hahn
    Schiff, 101

Pa, 162
PACER, 116
Paracelsus, 20
Partikelbeschleuniger, 162
Pascal, 162
Pascal, B., 162
Pauli, W., 30
Pauli-Effekt, 30
Pauli-Prinzip, 30, 163
Paulisches Ausschliessungsprinzip, 163
Peewee, 96
Peierls, R.E., 54
Pellets, 116
periodisches System, 34, 38
Perl, M.L., 33
Perpetuum mobile, 145, 163
Phoebus, 96
Phosphoreszenz, 148, 164
π-Meson, 43
Pion, 43
Plancksches Wirkungsquantum, 150
Plasma, 105, 165
    Einschluss, 105
Plasmakammer, 113
Plasmastrom, 109, 112, 114
Plasmen
    thermonukleare, 105
Plücker, J., 1
Pluto, 55
Plutonium, 50, 55, 77, 85
Plutonium-Produktionsreaktor, 81
Plutonium-Trennanlage, 83
Poincaré, H., 7
poloidales Magnetfeld, 109
Polonium, 8
Polymerisation, 165
Positron, 32
potentielle Energie, 144
Potenzen, 165
Primärkreislauf, 86
Produkt, 166
Produktionsreaktor, 81
proportional, 166
Proportionalität, 166
Proton, 39, 167

Qualitätsfaktor, 21
Quantenchromodynamik, 167
Quantenelektrodynamik, 167
Quantenfeldtheorie, 167
Quantenmechanik, 167
Quantenobjekte, 11
Quantentheorie, 11, 167
Quantenzahlen, 33
Quarks, 44, 167

Rabi, I.I., 33
rad, 21
Radiation Laboratory, 65
radioaktiv, 11
radioaktive Isotope, 45
radioaktive Strahlung, 20
radioaktive Tracer, 45
radioaktive Zahncreme, 11
radioaktiver Abfall, 121
Radioaktivität, 8
    künstliche, 45
    natürliche, 45
Radioaktivität, 11
Radionuklidbatterien, 18
Radiotoxizität, 17
Radium, 8, 17
Radium-Tabletten, 11
Radium-Vitalisator, 12
Radon, 12, 22
Radonkuren, 13
Radontherapie, 13
Raketen
    nuklearthermische, 95
Raketentriebwerk, 95
Ramsar, 22
Rauchen, 24
Rauchmelder, 17
RBMK-1000, 87
Reaktion
    thermonukleare, 104
Reaktionsrate, 105
Reaktivität, 51, 84, 168
Reaktor, 51
    B, 83
    D, 85
    F, 85
    thermischer, 86
Reaktoren
    gasgekühlte, 87
    leichtwassergekühlte, graphitmoderierte, 87
Reaktoren B, D, F, 83

Reaktorprobleme, 120
Reaktorunfall von Tschernobyl, 24, 87
Refraktion, 135
Reines, F., 32
relativistisch, 168
rem, 21
Rickover, H.G., 99
Röntgen, W.C., 3
Röntgen, 21
Röntgenapparate, 5
Röntgenbilder, 5
Röntgendiagnostik, 24
Röntgenfluoreszenzanalyse, 15
Röntgenstrahlen, 5
    Entdeckung, 3
Röntgenstrahlung, 117
Rover, 96
Rückwärtsstreuung, 37
Ruhmkorff, H., 2
Rutherford, E., 9, 50, 121
Rutherfordsches Atommodell, 37
Rutherfordsches Streuexperiment, 35

S-1, 56
S-50, 75
Sachs, A., 53
Savannah, 101
schnelle Brüter, 87
schnelle Neutronen, 45, 51, 54
Schockwellen, 117
Schub, 95
    EX, 97
    Kiwi, 96
    Phoebus, 96
Schuhdurchleuchtungsgeräte, 5
Schwellenwert, 26
schwerer Wasserstoff, 39, 169
schweres Wasser, 51, 82, 87, 168
Schwerwasserreaktor, 87
scram, 79
Seaborg, G.T., 55
Segrè, E.G., 55
Sekundärkreislauf, 87
selbsterhaltende Kettenreaktion, 77
    erste, 79
selbsterhaltende thermonukleare Reaktion, 105
semiempirische Massenformel, 43
Semiletaldosis, 28
Separation
    elektromagnetische, 62, 63
    vollständige, 64
Sevmorput, 102
Shippingport, 86
Shiva, 117
Sicherheitsprobleme, 121
Sicherheitssysteme, 79
Siedewasserreaktor, 86
Sievert, 21, 169
Sievert, R.M., 169
Silber, 68
Skalierungsgesetze, 111
Soddy, F., 39
solid core, 96
Sonnenbestrahlung, 26
Sonnenbrand, 25, 26
Sonnenstrahlung, 25
Soret, Ch., 73
Spaltneutronen, 50, 51
Spätschäden, 25
Speisewasserpumpe, 87
Sperrschicht, 169
Spiegelmaschine, 106
Spin, 30, 169
startup time, 72
Stellarator, 108
Sterblichkeit, 28
Steuerstab, 80
stochastische Strahlenschäden, 26
Stoney, G.J., 34
Strahlenbelastung, 22
    künstliche, 24
    natürliche, 22
Strahlendosis, 14, 21, 169
Strahlenkrankheit, 27
Strahlenresistenz, 28
Strahlenschäden, 5
    nichtstochastische, 26
    stochastische, 26
Strahlenschutz, 5
Strahlentherapie, 14, 24
Strahlenwirkungen
    biologische, 20, 25
Strahlgeschwindigkeit, 96
Strahlung
    biologische Effekte, 25
    ionisierende, 20
    körperinnere, 22
    kosmische, 22
    radioaktive, 20
    terrestrische, 22

Strahlungsverluste, 105, 110
strange, 168
Strassenfahrzeuge, 89
Strassmann, F., 46
Streuexperiment
    Rutherfordsches, 35
Stromversorgung K-25, 73
Superzüge, 90
Sv, 170
System
    periodisches, 34, 38
Szilard, L., 52, 77

T-Plant, 85
Taiwan, 28
Target, 179
Targetkammer, 116, 119
Tau-Lepton, 33
Tau-Neutrino, 155
Tauchzeit, 99
Tauon, 33
Tauzahl, 154
technische Anwendungen, 14
technische Bestrahlungen, 18
Teflon, 71
Teilchen, 143
    fundamentale, 143
Teilchenbeschleuniger, 43, 170
Teilchendetektor, 32
Teilchenphysik, 43
Teilchenverluste, 106, 110
Teilkörperbestrahlung, 25
Teller, E., 52
terrestrische Strahlung, 22
Testreaktoren, 86
TeV, 171
therapeutische Anwendungen, 14
thermische Brüter, 88
thermische Leistung, 81
thermische Neutronen, 45, 51, 171
thermische Zyklen, 110
thermischer Reaktor, 86
Thermodiffusion, 62, 73
Thermoelement, 171
thermonukleare Plasmen, 105
thermonukleare Reaktion, 104
    selbsterhaltende, 105
Thomson, J.J., 2
Thomsonsches Atommodell, 34
Thorium, 8, 12
TNT, 171
Tokamak, 109, 112
top, 168
toroidales Magnetfeld, 109
torusförmiges Magnetfeld, 107
Tracer
    radioaktive, 45
Tracermethode, 14
Trägheitseinschluss, 106, 115
Trainingsreaktoren, 86
Transformatorspulen, 109
Transurane, 46
Trennanlage
    chemische, 85
Trenndüsen, 62, 75
Trennkaskade, 70
Trennrohr, 74, 75
Trennstufe, 61
Trennverfahren, 61
Trennwand, 68, 71
Tritium, 17, 39, 104, 112, 116, 120, 121, 171
Tritiumkern, 104
Triton, 99
Tröpfchenmodell, 43, 48
truth, 168
Tschernobyl
    Reaktorunfall, 24, 87
Tunneleffekt, 9
Turbinenstrahltriebwerke, 93
Turner, L.A., 55

überkritisch, 51, 79
Ulam, S.M., 98
ultraviolett, 26
unterkritisch, 51
unterkritische Anordnung, 77
Unterseeboote, 99
up, 168
Uran, 8, 12, 45
    natürliches, 51, 61
    waffenfähiges, 70
Uran-234, 51, 61
Uran-235, 51, 53, 54, 61
Uran-238, 50, 51, 61
Uran-239, 50
Urananreicherung, 61
Uranerz, 57
Uranhexafluorid, 62
Uranisotope, 54
Uransalz, 7

Uransalze, 14
Uranstäbe, 82
Urantetrachlorid, 62
Uranverbindungen, 14

V, 172
Van de Graaff, R.J., 172
Van de Graaff-Generator, 172
Variable, 173
Varley, C.F., 1
Vektoren, 173
Vergiftung, 84
Verluste, 110
Verschmelzung leichter Kerne, 104
Verschraubung, 108
Vertikalfeldspulen, 109
Verunreinigungen, 110
Villard, P., 9
Vitalisator
    Radium-, 12
vitalisiert, 12
vollständige Separation, 64
Volt, 174

W, 175
waffenfähiges Uran, 70
Waffenplutonium, 86
Wahl, A.C., 55
Walton, E., 121
Wand
    erste, 120
Wärme, 175
Wasser
    schweres, 51, 82, 87, 168
Wasserstoff, 104
    natürlicher, 120
    schwerer, 39, 169
Wasserstoffbomben, 115
Wasserstoffisotope, 39, 104
Watt, 176
Watt, J., 176
Wechselwirkung, 176
Weglänge
    freie, 148
Weizsäcker, C.F., 43
Welle
    elektromagnetische, 141
Wellen, 177
    elektromagnetische, 9
Wellenlänge, 178
Weltenergiebedarf, 120
Wendelstein 7-X, 108
Wheeler, J.A., 54, 84
Wigner, E., 52
Wilsonkammer, 160
Winkel, 178
Winkelgeschwindigkeit, 178
Wirkung, 179
Wirkungsquantum, 150
Wirkungsquerschnitt, 179
Wundermittel, 11
Wurzeln, 180

X-6, 94
X-10, 81
X-39, 93
X-rays, 5
X-Strahlen, 4
XB-36H, 94
Xenon-135, 84
Xenonvergiftung, 85

Y-12, 67, 75
Yamal, 102
Yukawa, H., 43

Zahncreme
    radioaktive, 11
Zehnerppotenzen, 180
Zeitdauer, 25
Zerfallsenergie, 9
Zerfallsreihe, 182
Zerfallsreihen, 12
    natürliche, 182
Zero Energy Toroidal Assembly, 121
ZETA, 121
Zinksulfid, 17
ZIP, 79
Zoll, 186
Zündtemperatur, 105
Zweig, G., 44
Zyklen
    thermische, 110
Zyklotron, 65, 186
Zykluszeit, 110
Zylinderspule, 106

Bildquellenverzeichnis

1 http://www.oneillselectronicmuseum.com
http://www.oneillselectronicmuseum.com/largephotos/crookes/simpletube2work.jpg
2 http://www.infogr.ch
http://www.infogr.ch/roehren/crookes_strauss/default.htm
3 http://www.bium.univ-paris5.fr
http://www.bium.univ-paris5.fr/sfhad/iahd/iahd08f.htm
http://www.bium.univ-paris5.fr/sfhad/iahd/08/img/f03.jpg
4 http://www.acmi.net.au/AIC/RUHMKORFF_SPARK_COIL.html
http://www.ien.it/museum/txt/rocch_ruhmkorff.img.html
5 http://205.243.100.155/frames/safety.html
6 http://www.neues-roentgen-museum.de
http://www.neues-roentgen-museum.de/pages/abteilung_1.html
7 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Roentgen_wife_hand.jpg
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image_talk:Roentgen_wife_hand.jpg
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Roentgen-x-ray-von-kollikers-hand.jpg
http://www.bl.uk/learning/artimages/bodies/xray/roentgen.html
8 http://www.orau.org
http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/shoefittingfluor/shoe.htm
9 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Henri_Becquerel_as_young.png
10 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Becquerel_plate.jpg
11 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Mariecurie.jpg
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Pierrecurie.jpg
12 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Ernest_Rutherford.jpg
15 http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/quackcures.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/arium.htm
16 http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/quackcures.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/toothpaste.htm
17 http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/quackcures.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/radiumvitalizer.htm
18 http://www.orau.org/ptp/collection/consumer%20products/consumer.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/consumer%20products/vaseline.htm
19 http://www.orau.org/ptp/collection/consumer%20products/consumer.htm
http://www.orau.org/ptp/collection/consumer%20products/fiesta.htm
20 http://www.general-anaesthesia.com/people/paracelsus.html
24 [7]
http://www.jpands.org/vol9no1/chen.pdf
25 http://web.gc.cuny.edu/sciart/copenhagen/nyc/index.htm
http://www.particlephysics.ac.uk/news/picture-of-the-week/picture-archive/
pauli-and-the-neutrino.html
26 http://www.physsci.uci.edu
http://www.ps.uci.edu/physics/news/nuexpt.html
27 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:J.J_Thomson.jpg

29 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Ernest_Rutherford.jpg
http://www2.tu-berlin.de/presse/125jahre/festschrift/geiger.htm
http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Gallery/Marsden-2.GIF
30 http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/GeigerMarsden-1913/
GeigerMarsden-1913.html
34 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Chadwick.jpg
38 http://www.fermi.mo.it
http://www.fermi.mo.it/old/e.fermi/fermi1.jpg
39 http://ib.ptb.de/de/org/ib/history.htm
40 http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1944/hahn-bio.html
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Lise_Meitner.jpg
http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/index.htm
http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/geschichte/11spaltung/
biographien.htm
41 http://www.lehrer.uni-karlsruhe.de/ za161/otto_hah.html
http://www.lehrer.uni-karlsruhe.de/ za161/gifs/hahn_tisch_1.jpg
42 http://www.aip.org/history/historymatters/whydonate.html
43 http://www.e18.physik.tu-muenchen.de
http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript
http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript/Kernspaltung.html
44 http://nobelprize.virtual.museum/nobel_prizes/physics
http://nobelprize.virtual.museum/nobel_prizes/physics/laureates
http://nobelprize.virtual.museum/nobel_prizes/physics/laureates/1968/index.html
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:JROppenheimer-LosAlamos.jpg
45 http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript/Kernspaltung.html
46 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Leslie_Groves.jpg
http://www.lanl.gov/history/index.shtml
http://www.lanl.gov/history/road/images/GrovesL.GIF
53 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Ernest_Orlando_Lawrence.jpg
55 http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Med/Med.html
http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Med/Alphtrk.jpg
56 http://smithdray1.net/angeltowns/or
http://smithdray1.net/angeltowns/or/go.htm
59 http://www.atomicarchive.com
http://www.atomicarchive.com/historymenu.shtml
http://www.atomicarchive.com/History/sites
http://www.atomicarchive.com/History/sites/Images/K_25.jpg
60 http://www.hcc.mnscu.edu
http://www.hcc.mnscu.edu/programs/dept/chem
http://www.hcc.mnscu.edu/programs/dept/chem/abomb
http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb
http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_35050.html
http://www.hcc.mnscu.edu/programs/dept/chem/abomb/Diffusers.jpg
62 http://en.wikipedia.org/wiki/Image:S50plant.jpg
http://www.mphpa.org/classic/OR/Photo-Pages/ORP-048.htm
63 http://www.atomicarchive.com
http://www.atomicarchive.com/Photos
http://www.atomicarchive.com/Photos/CP1
http://www.atomicarchive.com/Photos/CP1/image4.shtml
64 http://en.wikibooks.org/wiki/Image:Chicagopile.gif

65 http://www.nrg-nl.com
http://www.nrg-nl.com/nrg/public/abc
http://www.nrg-nl.com/nrg/public/abc/images/chicpile.gif
66 http://www.atomicarchive.com
http://www.atomicarchive.com/history
http://www.atomicarchive.com/History/mp
http://www.atomicarchive.com/History/mp/p4s22.shtml
67 http://www.washingtonclosure.com/News/wc_news_102005.html
68 http://www.atomicarchive.com
http://www.atomicarchive.com/History
http://www.atomicarchive.com/History/sites
http://www.atomicarchive.com/History/sites/B_reactor.shtml
69 http://www.atomicarchive.com
http://www.atomicarchive.com/History
http://www.atomicarchive.com/History/sites
http://www.atomicarchive.com/History/sites/Images/T_Plant.jpg
70 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Kernkraftwerk_Druckwasserreaktor_n.png
http://www.hellfirez.de/web/referate/inhalte/Physik_Energie.htm
71 *hobby* Das Magazin der Technik, November 1955, EHAPA-Verlag, Stuttgart
72 *hobby* Das Magazin der Technik, Juni 1957, EHAPA-Verlag, Stuttgart
73 *hobby* Das Magazin der Technik, Juni 1955, EHAPA-Verlag, Stuttgart
74 *hobby* Das Magazin der Technik, März 1959, EHAPA-Verlag, Stuttgart
75 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Convair_B-36_Peacemaker.jpg
76 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:NB-36H_front_section.jpg
http://www.nationalmuseum.af.mil/shared/media/photodb/photos/
060720-F-1234S-022.jpg
77 http://www.lanl.gov/news/dateline/Dateline0198.pdf
78 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Hyman_Rickover_1955.jpg
http://www.history.navy.mil/photos/images/k16000/k18497c.htm
79 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:SS-571-Nautilus-trials.gif
http://arcweb.archives.gov/arc/action/BasicMultimediaSearchForm
ARC Identifier: 521003
80 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:TaskForce_One.jpg
81 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Nuclearicebreakeryamal.jpg
83 http://funkoffizier.files.wordpress.com/2007/03/ns-otto-hahn-en-ciudad-del-cabo.jpg
82 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:NSsavannah-1962.gif
http://www.aviationandmarineusa.com/Marine/civil_directory.htm
90 http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/w7x/index.html
91 http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/t/tokamak.htm
93 http://www.jet.efda.org/pages/jet/directions/index.html
http://www.jet.efda.org/pages/multimedia/gallery/graphics.html
http://www.jet.efda.org/pages/multimedia/gallery/graphics/j82-348c.html
94 http://www.jet.efda.org/pages/multimedia/gallery/construction/CP85j-1784.html
95 http://www.jet.efda.org/pages/multimedia/gallery/insidevessel/CP91j-483.html
96 http://www.jet.efda.org/pages/jet-iter.html
97 http://www.iter.org/index.htm
http://www.iter.org/a/index_nav_3.htm
http://www.iter.org/a/index_nav_5.htm
98 http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Fusion_microcapsule.jpg
99 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Nif_hohlraum.jpg

101 http://www.damninteresting.com/?p=695
http://www.damninteresting.net/content/NIF_big.jpg
102 http://en.wikipedia.org/wiki/Image:NIF_target_chamber.jpg
103 *hobby* Das Magazin der Technik, August 1957, EHAPA-Verlag, Stuttgart
104 http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/pdf/berichte.pdf
107 http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/maps.htm
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/images/OakRidgeMapLarge.jpg
108 http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/maps.htm
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/images/HanfordMapLarge.jpg
109 http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/maps.htm
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/images/LosAlamosMapLarge.jpg
110 http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/maps.htm
http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/images/TechAreaMapLarge.jpg
116 http://www.einstein-online.info/en/index.html
http://www.einstein-online.info/en/spotlights/angular_momentum/index.html
127 http://www.mcs.drexel.edu
http://www.mcs.drexel.edu/ crorres
http://www.mcs.drexel.edu/ crorres/Archimedes/Screw/Perpetual1580.jpg