

Dieses Kapitel führt in die grundlegende Naturwissenschaft ein und stellt ihre Anwendung für Krieg und Frieden dar. Teilkapitel 2.1 legt die wichtigsten Grundlagen des Rechnens mit Variablen und der Physik, so weit sie hier – auch in späteren Kapiteln – gebraucht werden; es muss – höchstens unter Verzicht auf die Abschnitte 2.1.10 bis 2.1.12 – durchgearbeitet werden. Teilkapitel 2.2 und 2.3 über Kernwaffen sind wichtig, in Teilkapitel 2.4 über Zielgenauigkeit können die quantitativen Teile zum K-Wert beim ersten Lesen überflogen werden. Das kurze Teilkapitel 2.5 über Kriegstote ist zur Einordnung wichtig. Das letzte Teilkapitel 2.6 zur Abrüstung muss durchgearbeitet werden. Zum Nachlesen eignen sich viele Physik-Lehrbücher; anschauliche Kurzdarstellungen gibt ein kleines Physik-Lexikon.¹ Eine Übersicht wichtiger Beziehungen und Fakten – hilfreich für die Übungsaufgaben und späteres Nachlesen – findet sich in Teilkapitel 2.7.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Zahlen und ihre Schreibweise

Zahlen werden üblicherweise im Dezimalformat geschrieben. Im Deutschen wird das Komma zur Trennung von Einern und Zehnteln benutzt, bei längeren Zahlen werden Dreiergruppen vor bzw. hinter dem Komma mit Punkten abgetrennt:

-1,03;
27.005.314,751.4.

1 dtv-Lexikon Physik (Breuer 1987/1988).

Diese Schreibweise wird hier verwendet. Beachten Sie, dass bei Taschenrechnern meist die englische Notation mit dem Punkt als Dezimalzeichen verwendet wird. Auch dürfen dort die Dreiergruppen-Trennzeichen nicht eingegeben werden.

Sehr große oder sehr kleine Zahlen werden oft als Produkt aus einer (kurzen) Zahl mit einer ganzzahligen Zehnerpotenz dargestellt, wobei die voranstehende Zahl oft zwischen 1 und 10 liegt. Manchmal wählt man als Exponent auch ganzzahlige Vielfache von 3, dann liegt der andere Faktor zwischen 1 und 1.000:

$$\begin{aligned}-12.350.000 &= -1,235 \cdot 10^7 = -12,35 \cdot 10^6; \\ 0,000.000.000.437 &= 4,37 \cdot 10^{-10} = 437 \cdot 10^{-12}.\end{aligned}$$

Bei wissenschaftlichen Taschenrechnern kann man meist zwischen verschiedenen Darstellungen wählen: mit Zehnerpotenz („SCI“ wie scientific), mit Dreierexponent-Zehnerpotenz („ENG“ wie engineering), normal („FLO“ wie floating point). Zahlen mit Zehnerpotenzen werden eingegeben, indem man erst den Zahlenfaktor (ggf. mit Dezimalpunkt) eintippt, dann die „EE“- bzw. „EXP“-Taste drückt und den Exponenten eintippt. In der Regel wird rechts nur der Exponent angezeigt, ohne die „10“.

Während in der Mathematik Zahlen beliebig genau definiert und bekannt sein können, sind Messergebnisse in den Naturwissenschaften in der Regel mit einer Unsicherheit behaftet (Zählen diskreter Objekte geht selbstverständlich auch ganz genau). Die Unsicherheit deutet man an in der Anzahl der angegebenen Stellen: Wenn eine Länge auf etwa 1 cm genau bestimmt wurde, schreibt man z. B. 3,56 m; braucht man davon z. B. einen Bruchteil, z. B. $1/3$, liefert zwar der Taschenrechner die Zahl $3,56 / 3 = 1,186.666.667$ (Punkte hier hinzugefügt), die hinteren Stellen sind aber nur fiktiv; wenn wir nicht mehr wissen, als dass die Länge zwischen 3,555 m und 3,565 m beträgt, kann $1/3$ davon zwischen 1,1850 m und 1,1883 m liegen. Daher wird man den Wert entweder zu 1,187 oder 1,19 gerundet angeben. Bei hohen Zahlen benutzt man die Schreibweise mit Zehnerpotenzen, da sonst die vielen Nullen – wie in 7.450.000.000 – eine nicht vorhandene Genauigkeit nahelegen würden – hier würde man $7,45 \cdot 10^9$ schreiben.

Weil man beim Runden kleine Fehler machen kann, ist es am besten, bei längeren Rechnungen Zwischenergebnisse in hoher Genauigkeit zu belassen und erst den Endwert zu runden. Das wird hier bei den Aufgabenlösungen – wo Zwischenergebnisse in Tabellen eingetragen werden sollen – z. T. anders gehandhabt.

2.1.2 Größen und Einheiten

Physikalische Größen werden zunächst durch Abstraktion aus halb-quantitativen Beschreibungen des Alltagslebens gewonnen (dünn – dick, weich – hart, kurz – lang usw.). Eine physikalische Größe (z. B. die Länge eines Hauses) ist eine Quantität und wird durch einen Messvorgang gewonnen. Zum Messen braucht man: eine Einheit sowie ein Verfahren zum Vergleich des Messobjekts mit der Einheit. Die Einheit sei z. B. ein Meterstab; das Verfahren ist dann, durch Auslegen festzustellen, wie oft er in die zu messende Strecke passt. (Für genauere Angaben wird die Einheit unterteilt.)

Eine *Größe* ist ein Produkt einer Maßzahl und einer Einheit, z. B. schreibt man für die Länge (Variable L), gemessen in Meter (Kurzzeichen m) folgende Gleichung:

$$L = 5,2 \quad m \quad (1)$$

Größe = Maßzahl mal Einheit

(Das Malzeichen wird oft weggelassen, wenn mindestens einer der Faktoren keine Zahl ist. Variable werden oft *kursiv* gesetzt, Maßzahl und Einheit – sowie Konstanten und mathematische Funktionen – nicht.)

Entsprechend erhält man die reine Maßzahl (etwa für Tabellen oder Achsen von Graphen), indem man die Größe durch die Einheit dividiert:

$$L / m = 5,2. \quad (2)$$

In allgemeinen Beschreibungen, etwa in Gleichungen, werden physikalische Größen i. d. R. mit kleinen oder großen lateinischen, manchmal griechischen Buchstaben bezeichnet, die sich oft aus dem (deutschen/englischen/lateinischen) Namen der Größe ableiten: L, l für Länge, D, d für Distanz oder Durchmesser, R, r für Radius; v für Geschwindigkeit (velocity); T, t für Zeit (time/tempus). Wenn man spezielle Größen meint, können zusätzliche Zeichen hinzugefügt werden (darüber, oben/ unten rechts): d_0 (gesprochen „d Null“) für Anfangsdistanz, t' (gesprochen „t Strich“) zur Unterscheidung von t . Doppelte Bedeutungen sind nicht immer vermeidbar (m als Kurzzeichen der Größe Masse sowie m für die Einheit Meter), liegen i. d. R. aber aus dem Zusammenhang heraus eindeutig fest.

Tab. 2-1 Grundgrößen des Système International (SI) und ihre Einheiten

Grundgröße	Länge	Zeit	Masse	Elektrische Stromstärke	Tempe- ratur	Stoff- menge	Licht- stärke
Kurzzeichen	<i>l</i>	<i>t</i>	<i>m</i>	<i>I</i>	<i>T</i>	<i>v</i>	<i>I</i>
Einheit	Meter	Sekunde	Kilo- gramm	Ampere	Kelvin	Mol	Candela
Kurzzeichen	m	s	kg	A	K	mol	cd

(Erläuterung: das Kurzzeichen der Stoffmenge ist das griechische „n “, kein „vau“. Beachten Sie, dass hier das kg einschließlich Vorsilbe „k“ für 1.000 als Grundeinheit gewählt wurde.)

Nachdem über lange Zeit viele – sogar von Ort zu Ort – verschiedene Einheiten wie Elle, Fuder usw. verwendet worden waren, definierte die internationale Gemeinschaft mit dem Système International d’Unit s (SI) sieben Grundgrößen mit ihren Einheiten (Tabelle 2-1).

Für den einfacheren Umgang mit sehr kleinen Bruchteilen bzw. sehr großen Vielfachen der Einheiten definiert das SI Vorsilben für bestimmte Zehnerpotenzen (Tabelle 2-2).

Tab. 2-2 SI-Vorsilben für Einheiten mit Kurzzeichen und Bedeutungen

Vorsilbe	Kurzzeichen	Zehnerpotenz
Atto-	a	10 ⁻¹⁸
Femto-	f	10 ⁻¹⁵
Piko-	p	10 ⁻¹²
Nano-	n	10 ⁻⁹
Mikro-	�	10 ⁻⁶
Milli-	m	10 ⁻³
Zenti-	c	10 ⁻²
Dezi-	d	10 ⁻¹
Deka-	da	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

(Die nicht ins 3-Raster fallenden Zehnerpotenzen sollen möglichst wenig verwendet werden.)

Ein Sonderfall ist die Zeit, bei der große Werte i.d.R. nicht mit Zehnerpotenzen gebildet werden, sondern wo auf neue Einheiten umgestellt wird: 1 Minute = 60 s, 1 Stunde (h) = 60 Minuten, 1 Tag (d) = 24 Stunden, 1 Jahr (a) = 365 Tage. Zum Umrechnen muss man nur die richtigen Faktoren einsetzen.

Aus den Grundgrößen lassen sich durch Produkt- bzw. Quotientenbildung abgeleitete Größen bilden. Ein Beispiel für Produktbildung ist die Fläche, für ein Rechteck der Seitenlängen a und b ist sie:

$$A = a \, b, \quad (3)$$

mit der entsprechenden Einheit $\text{m} * \text{m} = \text{m}^2$.

2.1.3 Gleichungen und ihre Umformungen

Eine Gleichung besagt, dass zwei je für eine Zahl stehende Ausdrücke bei der Auswertung dieselbe Zahl ergeben (würden).² Dabei ist eine Gleichung der Form $5 = 5$ nicht sehr erhellend, $3 - 7 = -4$ schon mehr. Interessant sind Gleichungen mit Variablen (Platzhaltern für Zahlen), die allgemeine Beziehungen wiedergeben, z. B. in der Mathematik

$$(a + b)^2 = a^2 + 2 \, a \, b + b^2 \quad (4)$$

– diese Gleichung gilt, egal welche Zahlen man für die Variablen a und b einsetzt. In der Physik beschreiben Gleichungen die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen, die man in Experimenten beobachtet und/oder mit theoretischen Überlegungen abgeleitet hat, z. B.

$$h = h_0 - g/2 \, t^2, \quad (5)$$

die die Höhe h eines Objekts zur Zeit t beschreibt, das zur Zeit $t = 0$ s in der Höhe h_0 losgelassen wird und mit der Schwerebeschleunigung g nach unten fällt (s. Aufgabe 2-7 d) unten).

Bei einer physikalischen Gleichung müssen die Größen auf beiden Seiten gleich sein, d.h. einschließlich Einheit. Das eröffnet die Möglichkeit zu prüfen, ob eine selbst entwickelte Gleichung stimmen kann – man wertet für beide Seiten die Einheiten aus und prüft, ob sie dieselbe Größe beschreiben (für Längen z.B. m, mm oder Seemeile). Dabei ergeben Summen und Differenzen derselben Einheit wieder diese, Produkte, Quotienten, Potenzen, Wurzeln aber neue.

2 Streng genommen gilt das, wenn die mit der Gleichung gemeinte Aussage wahr ist. Prinzipiell kann sie auch falsch sein, aber das ist i.d.R. nicht gemeint.

Aufgabe 2-1

- Prüfen Sie die Einheiten von Gl. (5). Benutzen Sie: Die Einheit von g ist m/s^2 .

Wenn zwei Ausdrücke einander gleich sind, bleibt das auch so, wenn man sie in derselben Weise verändert – z. B. beide Seiten mit demselben Wert multipliziert oder aus beiden die zweite Wurzel zieht. Solche Manipulationen kann man benutzen, um eine Gleichung umzuformen. Besonders wichtig sind die Formen, bei der nur eine Variable auf einer Seite steht (üblich: links), weil man hier direkt sehen kann, wie sich der Wert dieser Variablen ermittelt.

Sei z. B.

$$y = 3x - z. \quad (6)$$

Wenn man dann die aktuellen Werte von x und z kennt, kann man sofort den von y berechnen.

Aufgabe 2-2

- Berechnen Sie y , wenn $x = 1,5$ und $z = -3$ sind.

Anders ist es, wenn man y sowie z kennt und x wissen möchte. Dazu ist die Form „ $x = \dots$ “ nötig. Wer sich sehr gut auskennt, kennt Tricks wie „herüberbringen“. Diese sind aber nur die schnelle Form des genauen und ausführlichen Verfahrens, das alle Leute anwenden sollten, die sich nicht richtig sicher fühlen:

Schritt 1: Alles, was nicht mit x zu tun hat, auf der linken Seite „neutralisieren“. Hier steht links „ y “, also addieren wir auf beiden Seiten „ $-y$ “:

$$y - y = 3x - z - y, \text{ führt zu} \quad (7)$$

$$0 = 3x - z - y. \quad (8)$$

Schritt 2: Alles, was mit x zu tun hat, auf der rechten Seite zu Null machen – hier also „ $-3x$ “ addieren – muss natürlich wieder auf beiden Seiten geschehen:

$$0 - 3x = 3x - z - y - 3x, \text{ also} \quad (9)$$

$$-3x = -z - y. \quad (10)$$

Schritt 3: auf „1 x “ reduzieren – also beide Seiten mit $-1/3$ multiplizieren:

$$-3x/(-3) = -z/(-3) - y/(-3), \text{ ausrechnen gibt} \quad (11)$$

$$x = (z + y)/3. \quad (12)$$

Diesen Prozess nennt man: „eine Gleichung nach x auflösen“. Das ist etwas mühsam, aber die beste Art, Verwirrung zu vermeiden.

Aufgabe 2-3

- a) Beim Kauf von (losen) Lebensmitteln berechnet sich der Preis P (Einheit Euro) meist aus der Masse m (Einheit kg) mal einem konstanten Faktor f :

$$P = f m.$$

Sie haben für $m = 2,5$ kg Kartoffeln $P = 1,50$ Euro bezahlt. Schreiben Sie die Gleichung dafür auf. Lösen Sie die Gleichung – mit allen Einzelschritten – nach f auf. Wie groß ist f ? Welches ist die Einheit von f ?

- b) Beim nächsten Markthändler gibt es 3 kg Kartoffeln zu 1,90 Euro. Ist das günstiger?
- c) Wenn zwei Ausdrücke einander gleich sind, ist es egal, in welcher Reihenfolge man sie schreibt. Mathematisch gibt das die Regel: Bei einer Gleichung darf man linke und rechte Seite vertauschen. Leiten Sie diese Regel für eine allgemeine Gleichung ($A = B$) mit dem obigen Verfahren ab.

2.1.4 Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung

Bewegt sich ein Objekt innerhalb des Zeitraums Δt („delta t“, mit dem griechischen Δx wird oft die Änderung einer Größe x bezeichnet – hier ist die Differenz zwischen Anfangs- und Endzeit gemeint) um den Abstand Δs , ist die mittlere *Geschwindigkeit*

$$v = \Delta s / \Delta t, \quad (13)$$

also zu messen in der Einheit m/s.³

Multipliziert man die Gleichung (Gl.) (13) auf beiden Seiten mit Δt und tauscht die Seiten aus (Auflösen nach Δs), ergibt sich

$$\Delta s = v \Delta t, \quad (14)$$

so lässt sich also bei bekannter mittlerer Geschwindigkeit v und Dauer Δt die währenddessen zurückgelegte Strecke Δs berechnen. Dividiert man Gl. (13) durch v und multipliziert mit Δt (Auflösen nach Δt), ergibt sich

$$\Delta t = \Delta s / v, \quad (15)$$

3 Ist die Geschwindigkeit v konstant und beginnen s und t je bei 0, kann man auch $v = s / t$ schreiben. Entsprechend werden in kurzer Schreibweise manchmal die Δ -(Delta-) Zeichen weggelassen, obwohl sie als Symbole der Differenzbildung erforderlich wären.

woraus man für gegebene Strecke Δs und mittlere Geschwindigkeit v die Zeitdauer Δt berechnen kann.

Aufgabe 2-4

- ▶ a) Eine Gewehrkugel verlässt das Rohr mit einer Geschwindigkeit von $v = 500 \text{ m/s}$. Rechnen Sie die Geschwindigkeit auf die Einheit km/h um! (Tipp: Schreiben Sie m als (richtigen) Zahlenfaktor mal km , s als Zahlenfaktor mal h .)
Vernachlässigen Sie die Verlangsamung durch den Luftwiderstand und die Bahnkrümmung durch die Schwerkraft; wie lange braucht das Geschoss bis zu einem Ziel in 300 m Abstand?
- ▶ b) Ein alter strategischer Nuklearbomber (d.h. langsamer als der Schall) fliege mit $v = 800 \text{ km/h}$ mittlerer Geschwindigkeit von seiner vorgeschobenen Basis zu seinem Ziel im Innern des gegnerischen Landes; die Entfernung betrage $\Delta s = 4 \text{ Mm}$. Wie lang ist die Flugzeit?
- ▶ c) Eine Interkontinentalrakete braucht für die Zielreichweite $\Delta s = 9 \text{ Mm}$ (fast $1/4$ um die Erde, Gesamtumfang ist 40 Mm) etwa $\Delta t = 35$ Minuten. Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit v ? (Nehmen Sie Flug auf Höhe 0 an , d.h. sehen Sie davon ab, dass die Rakete real einen Bogen durch den Weltraum fliegen muss.)
- ▶ d) Eine strategische U-Boot-Rakete wird von einer Position 500 km vor der Küste des gegnerischen Landes auf ein Ziel 1 Mm im Land abgeschossen. Die mittlere Geschwindigkeit (wieder für eine fiktive Bahn in Bodenhöhe) betrage $1,9 \text{ km/s}$. Wie lang ist die Flugzeit?
- ▶ e) Nehmen Sie an, das angegriffene Land könnte die Kernwaffenträger (Bomber, Rakete) schon dann orten, wenn sie starten. Vergleichen Sie die sich daraus ergebenden Vorwarnzeiten. Was folgt aus der Einführung der strategischen Raketen?
- ▶ f) Ein Satellit fliege in $h = 500 \text{ km}$ Höhe über dem Boden auf einer Kreisbahn. Berechnen Sie: den Radius r der Bahn (der Erdradius ist $R_E = 6,4 \text{ Mm}$); die Länge für einen Umlauf (der Umfang eines Kreises mit Radius r ist $U = 2 \pi r$, $\pi = 3,14$). Ein Umlauf dauert $1 \text{ Stunde } 35 \text{ Minuten}$; berechnen Sie die Geschwindigkeit des Satelliten.
- ▶ g) Berechnen Sie für Ihre typischen Entfernungen und Zeitdauern die mittleren Geschwindigkeiten für Bewegung zu Fuß, beim Schwimmen, mit dem Fahrrad, dem Auto. Vergleichen Sie sie mit den Werten von Spitzensportler(inne)n.

In vielen Fällen von Bewegung ist die Geschwindigkeit nicht konstant, sondern verändert sich mit der Zeit. Die Geschwindigkeit nimmt mit der Zeit zu beim Fall nach unten, sie nimmt ab aufgrund des Luftwiderstands bei etwa waagerechter Bewegung. Die momentane Geschwindigkeit ergibt sich als Grenzwert, wenn in Gl. (13) die Zeitdauer Δt immer kleiner wird. Ähnlich wie man die Geschwindig-

keit einführt als Rate der Ortsänderung mit der Zeit, kann man *Beschleunigung* einführen als die Rate der Geschwindigkeitsänderung mit der Zeit. Demgemäß ist die mittlere Beschleunigung a (acceleration)

$$a = \Delta v / \Delta t, \quad (16)$$

mit der Einheit (m/s)/s = m/s².

Ganz genauso wie oben kann man diese Gleichung umformen zu

$$\Delta v = a \Delta t, \quad (17)$$

die die Geschwindigkeitsänderung bei mittlerer Beschleunigung a im Zeitraum Δt angibt, oder zu

$$\Delta t = \Delta v / a, \quad (18)$$

die die Zeitdauer darstellt, während der die Beschleunigung a wirken muss, um die Geschwindigkeitsänderung Δv zu erreichen.

In vielen Fällen ist die Beschleunigung zeitlich konstant (oder ändert sich nur schwach), so dass die mittlere Beschleunigung gleich der momentanen über die ganze betrachtete Zeitdauer ist. Das gilt etwa beim Fall eines schweren Körpers (wo der Luftwiderstand vernachlässigt werden kann). In Höhe 0 m ist die Fallbeschleunigung $a = 9,8 \text{ m/s}^2$ (sie wird i.d.R. mit g (gravity) bezeichnet).

Aufgabe 2-5

- a) Experiment: Freier Fall. Nehmen Sie Gegenstände aus verschiedenen Materialien mit verschiedener Größe und verschiedenem Gewicht, am besten Kugeln/Bälle (bei Kugelform ist die Orientierung egal). Nehmen Sie je einen Gegenstand in jede Hand und lassen Sie sie gleichzeitig fallen (auf Teppich, Kissen, Sofa). Kommen sie gleichzeitig am Boden an? Variieren Sie die Fallhöhe von 0,5 bis 2 m (oder mehr). Was lernen Sie über Reproduzierbarkeit, Abhängigkeit des Fallens von Material, Größe, Gewicht?
- b) Berechnen Sie für den Fall eines schweren Körpers (Luftwiderstand vernachlässigt, etwa Meereshöhe) die nach den Zeiten t (Zeile A) erreichten Geschwindigkeiten v und tragen Sie die Werte in die Tabelle 2-3 ein. Der Körper beginne zum Zeitpunkt bei $t = 0 \text{ s}$ in Ruhe ($v = 0 \text{ m/s}$) am Ort $s = 0 \text{ m}$ (hier sind s , v und a nach unten gerichtet). Gehen Sie so vor: Berechnen Sie aus Zeile A die jeweiligen Zeitintervalle/-differenzen und tragen Sie sie in Zeile B ein (Achtung: Sie sind nicht alle gleich!). Berechnen Sie dann mit Hilfe von Gl. (17), $a = 9,8 \text{ m/s}^2$, die dazugehörigen Geschwindigkeitsänderungen und tragen Sie sie in Zeile C ein. Schließlich addieren Sie die jeweilige Änderung zum jeweils letzten Geschwindigkeitswert in Zeile D und tragen Sie die Summe in das je nächste Feld von Zeile D ein.

Tab. 2-3 Zahlenwerte für Fall eines schweren Körpers (zu vervollständigen)

A	Zeitpunkt	t/s	0	1	2	3	4	10	20
B	Zeitdifferenz	$\Delta t/s$							
C	Geschwindigkeitsänderung	$\Delta v/(m/s)$							
D	Geschwindigkeit	$v/(m/s)$							
E	Geschwindigkeit	$v/(m/s)$							
F	Ortsänderung	$\Delta s/m$							
G	Ort	s/m	0						
H	Ort	s/m							

- c) Weil die Beschleunigung ständig wirkt, erhöht sich die Geschwindigkeit laufend. Daher kann man die Ortsänderung nicht einfach aus der momentanen Geschwindigkeit errechnen. Für genäherte Berechnung nehmen Sie dennoch an, dass die Geschwindigkeiten in Zeile D die mittleren Geschwindigkeiten während des je folgenden Zeitraums Δt (Zeile B) sind, und berechnen Sie aus Gl. (14) die dann jeweils zurückgelegten Teilstrecken Δs (eintragen in Zeile F). Addieren Sie diese Ortsänderung zum jeweils letzten Ort in Zeile G und berechnen so die jeweils insgesamt zurückgelegte Fallstrecke s . (Zeilen E und H werden später gebraucht.)

2.1.5 Funktion, Wertetabelle, graphische Darstellung

Eine Funktion stellt einen Zusammenhang her zwischen zwei verschiedenen Größen. Die eine heißt unabhängige Größe, sie wird allgemein oft mit x bezeichnet. Die Funktion ordnet jedem Wert einer solchen Größe einen Wert zu, der oft mit y bezeichnet wird; die zweite Größe heißt dementsprechend die abhängige. Schreibweise: $y = f(x)$, gesprochen „ y ist gleich f von x “. Für die unabhängige und die abhängige Größe sowie die Funktion kann man aber auch speziellere Namen einsetzen und schreibt dann z. B. die Geschwindigkeit v als Funktion der Zeit t : $v = f(t)$, gesprochen „ v ist gleich f von t “ oder $v = v(t)$ „ v ist gleich v von t “.

Die Zuordnung der jeweiligen Werte von v zu den verschiedenen Werten von t kann man z. B. in Form einer Tabelle darstellen, wie oben in Tabelle 2-3 in den Zeilen A und E. Eine andere Funktion ist die, die den Zeiten t die Strecke s zuordnet: $s = s(t)$; die zugehörigen Werte stehen in den Zeilen A und G. (Meist werden die Werte einer Funktion in einer Tabelle aufgeführt, die nur zwei Zeilen oder Spalten enthält und dann Wertetabelle der Funktion genannt wird. Natürlich enthält sie immer nur eine willkürliche Auswahl der Werte.)

Die unabhängige sowie die jeweilige abhängige Variable bilden ein so genanntes *Wertepaar*. Neben der Auflistung in einer Wertetabelle kann man die Wertepaare auch grafisch darstellen. Das geschieht in einer Ebene, d.h. in zwei Dimensionen, mit Hilfe eines i.d.R. rechtwinkligen sog. Koordinatensystems. Das *Koordinatensystem* gibt die Richtungen für jede Variable an, definiert die Skala (die Länge auf dem Papier oder Bildschirm, die für die jeweilige Einheit verwendet wird), und legt den jeweiligen Nullpunkt fest. Die unabhängige Variable wird i.d.R. nach rechts steigend aufgetragen. Weil sie in allgemeinen Ausdrücken oft mit „ x “ benannt wird, heißt die zugehörige Achse auch die x -Achse. Die abhängige Variable wird nach oben steigend aufgetragen, in Richtung der sog. y -Achse.

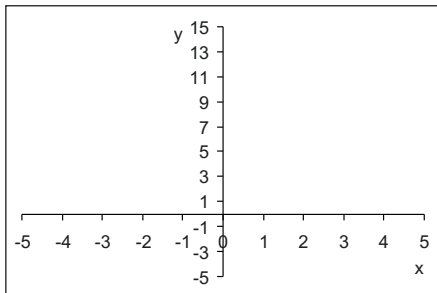


Abb. 2-1 Koordinatensystem in der zweidimensionalen Ebene.

Die x -Achse bezeichnet die unabhängige, die y -Achse die abhängige Variable. Die Zahlen an den Achsen legen die Skala und den Nullpunkt fest. Am Ende der Achsen ist die Bezeichnung der Variablen angegeben; hier sind x und y reine Zahlen ohne Einheit. (Die Maßstäbe beider Achsen sind oft verschieden.)

Wegen der Übersichtlichkeit möchte man an die Achsen nur Zahlen ohne Einheiten schreiben. Wenn die Achse eine physikalische Größe, also ein Produkt aus Maßzahl und Einheit, beschreibt, wird als Achsenbezeichnung die Größe dividiert durch die Einheit gewählt, wie in Abbildung 2-2, die für die Darstellung der Geschwindigkeit als Funktion der Zeit (links) bzw. der Wegstrecke als Funktion der Zeit (rechts) gedacht ist.

Aufgabe 2-6

- a) Vervollständigen Sie die folgende Wertetabelle unter Annahme der Funktion $y = y(x) = x^2 - 2$. Tragen Sie dann die Wertepaare in das Koordinatensystem der Abbildung 2-1 ein.

Tab. 2-4 Wertetabelle für die Beispielfunktion (zu ergänzen)

x	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
y								

- b) Tragen Sie die Wertepaare für den freien Fall aus Tabelle 2-3 in die Koordinatensysteme der Abbildung 2-2 ein, und zwar für die Geschwindigkeit v als Funktion der Zeit t (Zeile D gegen Zeile A) links und für die Strecke s als Funktion der Zeit t (Zeile G gegen Zeile A) rechts. Nehmen Sie an, dass zwischen den Zeitpunkten eine gleichmäßige Veränderung von v und s stattfindet und ziehen Sie eine entsprechende Kurve durch die Punkte.

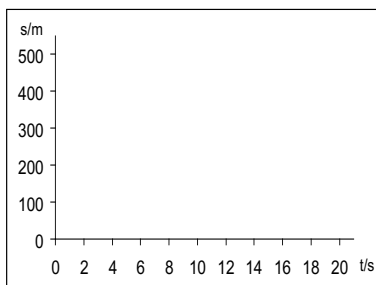
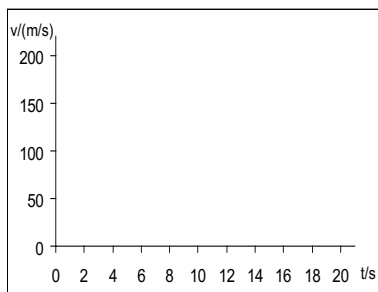


Abb. 2-2 Koordinatensysteme für die Funktionen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit (links), Wegstrecke in Abhängigkeit von der Zeit (rechts). (Damit an den Achsen nur Zahlen stehen, ist die Achsenbezeichnung der Quotient aus Größe und Einheit.)

Wenn man nicht nur die wenigen Punkte einer Wertetabelle in den Funktionsgraphen eintragen könnte, sondern auch alle Zwischenwerte, ergäbe sich eine durchgezogene Kurve, die dann das Verhalten der Funktion an unendlich vielen Punkten darstellen würde: die *Funktionskurve*. Wenn man die Einzelpunkte genügend fein wählt, kann man den Verlauf der theoretischen Kurve gut genug erkennen und sie durch „Anschmiegen“ an die Punkte, ohne Sprünge und Ecken, genügend genau darstellen.

Wie oben schon angemerkt, haben wir in Tabelle 2-3 bei Berechnung des Streckenzuwachses Δs in Zeile F aus der für das jeweilige Intervall berechneten Geschwindigkeit v (Zeile D) einen Fehler gemacht: Zeile D gibt die Geschwindigkeit zum in Zeile A angegebenen Zeitpunkt an, nicht die mittlere Geschwindigkeit während des folgenden Zeitintervalls.⁴ Die Erdbeschleunigung g wirkt ständig, also ändert sich die Geschwindigkeit laufend. Der Fehler wird um so kleiner, je kleiner man das Zeitintervall Δt wählt. Nun kann man mathematisch beweisen, dass für den Grenzfall $\Delta t = 0$ folgende exakte Formeln für die Geschwindigkeit v und die Fallstrecke s gelten, wenn die konstante Beschleunigung a einwirkt:

$$v(t) = a t + v_0, \quad (19)$$

$$s(t) = a/2 t^2 + v_0 t + s_0. \quad (20)$$

Hierbei bedeuten v_0 die Anfangsgeschwindigkeit bei $t = 0$ s und s_0 die Anfangsstrecke. Die dadurch bedingten Anfangswerte „bleiben erhalten“, die durch die Beschleunigung bedingten Werte addieren sich dazu. a , v , s sind mit Vorzeichen behaftet und können positive wie negative Werte annehmen. Diese Formeln gelten für beliebige Werte von t .

Im Fall von Tabelle 2-3 ist $a = g = 9,8 \text{ m/s}^2$, $v_0 = 0 \text{ m/s}$ (der Fall beginnt aus dem Stillstand), $s_0 = 0 \text{ m}$ (die Streckenmessung beginnt beim Startpunkt und geht hier nach unten).

In diesem Fall ist also

$$v(t) = 9,8 \text{ m/s}^2 t, \quad (21)$$

$$s(t) = 4,9 \text{ m/s}^2 t^2. \quad (22)$$

Aufgabe 2-7

- a) Berechnen Sie nach Gl. (21) und (22) die genauen Geschwindigkeits- und Streckenwerte zu den Zeiten in Zeile A von Tabelle 2-3 und tragen Sie die Werte in Zeilen E und H ein. Vergleichen Sie sie mit den Werten in Zeilen F und G. Tragen Sie die Wertepaare für $s(t)$ in den rechten Graphen von Abbildung 2-2 ein und ergänzen Sie sie zur vollständigen Funktionskurve für das Intervall. Vergleichen Sie die genauen mit den genäherten Werten der Fallstrecke s .
- b) Experiment: *Schiefe Ebene*. Weil mit Hausmitteln die Zeiten beim freien Fall nicht gut gestoppt werden können, machen Sie bitte eine schiefe Ebene, wo nur ein kleiner Teil der Schwerkraft in der möglichen Bewegungsrichtung (schräg hinunter) wirkt.

4 Das ist besonders deutlich am Ende des ersten Intervalls, bei $t = 1$ s, wo wir ebenfalls den Ort 0 m herausbekommen haben, weil wir mit der Geschwindigkeit 0 m/s vom Zeitpunkt $t = 0$ s gerechnet haben.

Nehmen Sie ein glattes, ebenes Brett (Breite 20 cm oder mehr, Länge möglichst 1,2 m oder mehr), unterstützen Sie es an einem Ende, so dass dieses etwa 10 cm höher ist (glatter Tisch geht auch). Legen Sie etwas Weiches zum Auffangen an das untere Ende. Messen Sie von da ab alle 20 cm und markieren Sie diese Positionen. Nehmen Sie eine Kugel (z. B. Tischtennisball).^{*} Wenn sie schräg rollt, legen Sie an einer Seite etwas unter. Nun brauchen Sie möglichst eine Stoppuhr (Armband-Digitaluhr mit Stoppfunktion), zur Not geht es mit einer Uhr mit Sekundenzeiger. Legen Sie die Kugel mit der Vorderkante an die jeweilige Marke und lassen los, dabei starten Sie gleichzeitig die Uhr. Sie stoppen, sobald die Kugel unten anschlägt. Für jede Entfernung machen Sie mindestens 5 Versuche und tragen die Zeitdauern in eine Tabelle ein. (Wenn Sie merken, dass etwas nicht geklappt hat – z. B. gleichzeitig loslassen und Uhr drücken/ beobachten –, tragen Sie nichts ein, sondern wiederholen den Versuch.)

Auswertung: Bilden Sie zu jeder Entfernung den Mittelwert (Summe aller Werte, geteilt durch Anzahl der Werte). Malen Sie ein s - t -Koordinatensystem (mit Lineal und Maßstab, ggf. auf Karopapier). Tragen Sie Zeiten nach rechts, die Entfernungen nach oben auf ($s = 0$ cm, $t = 0$ s ist auch ein „Messwert“). Ziehen Sie von Hand eine glatte Kurve durch Ihre Punkte. Sie sollte nach oben gekrümmt sein – die Steigung also nach rechts hin größer werden. Wählen Sie sich gleichmäßige Zeiten aus (insgesamt 5-8 Werte, z. B. alle 0,3 s). Gehen Sie bei diesen Zeiten zu Ihrer Kurve und markieren Sie den jeweiligen Punkt darauf. Ziehen Sie mit dem Lineal bei jedem Punkt eine Tangente an die Kurve. Bestimmen Sie die Steigung der Tangente (Änderung der Entfernung durch Änderung der Zeit, Gl. (13): $v = \Delta s / \Delta t$). Tragen Sie diese Geschwindigkeitswerte in Ihre Tabelle ein. Bestimmen Sie dann die Geschwindigkeitsänderung von Zeitpunkt zu Zeitpunkt und dividieren Sie diese durch die Zeitänderung, Gl. (16): $a = \Delta v / \Delta t$. Ergeben sich etwa gleiche Beschleunigungswerte?

^{*} Wenn Sie verschiedene Kugeln versuchen, werden Sie sehen, dass sie hier nicht alle gleich schnell „fallen“ – das liegt v. a. daran, dass sie zusätzlich rollen.

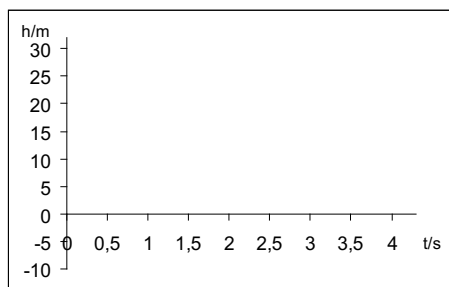


Abb. 2-3 Funktionsgraph für Wurf nach oben (zu ergänzen)

- c) Senkrechter Wurf nach oben ohne Luftwiderstand: Ein Mensch oder ein mittelalterlicher Wurfapparat werfe einen Stein senkrecht nach oben; der Stein verlasse die Hand/den Apparat in der Höhe $h_0 = 2\text{ m}$ mit der Geschwindigkeit $v_0 = 15\text{ m/s}$. Bei Vernachlässigung des Luftwiderstands gilt nach Gl. (20) – hier wird die Höhe h für die Strecke s gesetzt, sie zählt nach oben positiv –:

$$h(t) = -g/2 \cdot t^2 + v_0 \cdot t + h_0. \tag{23}$$

Weil die Erdbeschleunigung nach unten gerichtet ist, muss sie negativ genommen werden, h_0 und v_0 sind hier positiv.

Berechnen Sie h jede halbe Sekunde von 0 bis 3,5 s und tragen Sie die Wertepaare in die Tabelle 2-5 sowie das Koordinatensystem ein. Wie kann man negative Höhen in der Tabelle verstehen bzw. behandeln?

Tab. 2-5 Wertetabelle für Wurf nach oben (zu ergänzen)

t/s								
h/m								

- d) Welche maximale Höhe erreicht der Stein, zu welcher Zeit? (Probieren Sie mit 0,1-s-Auflösung)
- e) Wann schlägt der Stein auf den Boden auf? (Probieren Sie mit 0,1-s-Auflösung)

Ein spezieller Fall liegt vor, wenn die abhängige Größe sich aus der unabhängigen nur durch Multiplikation mit einem konstanten Wert ergibt:

$$y(x) = k \cdot x. \tag{24}$$

Dann sagt man „ y ist *proportional* zu x “ und nennt k die Proportionalitätskonstante. Bei einer Proportionalität spricht man auch von einem „linearen Zusammenhang“ zwischen beiden Größen, weil in diesem Fall der Funktionsgraph eine gerade Linie (durch den Punkt (0,0)) ist.

Aufgabe 2-8

- Erstellen Sie für die Proportionalität $y = -0,8 \cdot x$ eine Wertetabelle und tragen Sie die Wertepaare (mit anderen Symbolen) zusätzlich in Abbildung 2-1 ein. Ergänzen Sie die Punkte zu einem vollen Funktionsgraphen. Wie sieht der Kurvenverlauf aus?

2.1.5 Ballistik

Ballistik ist die Lehre von den geworfenen Körpern, insbesondere Geschossen und Raketen, die nach einer kurzen Beschleunigung eine Bahn nur unter Einfluss von Schwerkraft und Luftkräften beschreiben.⁵ Bei vielen Bewegungen ist die Beschleunigung nicht konstant. Z. B. erzeugt der bisher vernachlässigte Luftwiderstand eine Bremsbeschleunigung (d.h. der aktuellen Geschwindigkeit v entgegengerichtet) a_L , die durch folgende, etwas kompliziertere, Gleichung beschrieben werden kann (a_L ist eine Funktion der Geschwindigkeit v):

$$a_L = -\rho/2 \ v^2 \ c_w \ A/m. \quad (25)$$

Hier sind: $\rho = m/V = 1,2 \text{ kg/m}^3$ die Dichte der Luft (Quotient aus Masse m und Volumen V , ρ ist der griechische Buchstabe rho), c_w der so genannte Widerstandsbeiwert – für eine Kugel bei langsamer Geschwindigkeit gilt $c_w = 0,45$ –, A die Querschnittsfläche des Objekts, m seine Masse.

Zur Vereinfachung kann man in Gl. (25) die für ein spezifisches Objekt konstanten Werte ρ , c_w , A , m zu einer Variablen, nennen wir sie k , zusammenfassen:

$$a_L = -k \ v^2. \quad (26)$$

Also ist

$$k = \rho/2 \ c_w \ A/m. \quad (27)$$

Aufgabe 2-9

- a) Experiment: *Fall mit Luftwiderstand*. Kaufen Sie eine Styroporkugel (z. B. im Hobbyladen), Durchmesser zwischen 3 und 15 cm. Nehmen Sie ihre Stoppuhr. Lassen sie die Kugel (auf Teppich o.ä.) fallen, starten die Uhr beim Loslassen und stoppen sie beim Aufschlag. Messen Sie so die Fallzeiten für 1 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m Höhe (vielleicht Metermaß mit Klebeband an Lampe hängen), in jeder Höhe mindestens 5 mal.

Auswertung: Bilden Sie zu jeder Höhe den Mittelwert der Fallzeit. Bestimmen Sie die mittleren Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Höhen als Quotient aus Höhen- und Zeitdifferenzen. Steigt die Geschwindigkeit bei wachsender Höhe immer weiter? Wenn nicht, ist also die Schwerebeschleunigung g (entgegengesetzt) gleich der Bremsbeschleunigung durch den Luftwiderstand a_L . Bestimmen Sie – durch Auflösen von Gl. (26) – den Widerstandsbeiwert c_w . Dafür brauchen Sie die Luftdichte

5 In Erweiterung werden auch die Anfangsphase (bei Feuerwaffen im Rohr, bei Raketen während des Brennens) und die Endphase (Eindringen in den Körper o.ä.) als Teile der Ballistik behandelt.

$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$, die Querschnittsfläche der Kugel (Kreisfläche) $A = \pi r^2$ – messen Sie den Durchmesser $D = 2r$, indem Sie parallaxenfrei auf ein Lineal gucken – und die Masse m der Kugel. Wenn Sie keine so empfindliche Waage haben, können Sie die Masse aus dem Volumen $V = 4 \pi r^3 / 3$ mit einer Standarddichte für Styropor von 15 kg/m^3 berechnen. (Wie gut kommen Sie an den genauen Wert einer Kugel, $c_w = 0,45$?)

- b) Waagerechter Schuss ohne Schwerkraft, aber mit Luftwiderstand:

Für eine typisches Gewehrsgeschoss gilt: Durchmesser $D = 2r = 7,6 \text{ mm}$ (r : Radius), $m = 10 \text{ g}$. Berechnen Sie die Fläche A für einen kreisförmigen Querschnitt unter Nutzung der Formel $A = \pi r^2$, und zwar in der Einheit m^2 . Berechnen Sie mit $c_w = 0,3$ die zusammengesetzte Konstante k für dieses Geschoss in Luft (Dichte $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, behandeln Sie die Zehnerpotenzen richtig), geben Sie das Ergebnis in zwei Formen an:

- Dezimalzahl mal Produkt/Quotient aus SI-Grundeinheiten (s. Tabelle 2-1),
- Zahl zwischen 1 und 10 mal Zehnerpotenz mal Ausdruck aus SI-Grundeinheiten.

Tab. 2-6 Zahlenwerte für waagerechte Bahn mit Luftreibung (zu vervollständigen)

A	t/s								
B	$\Delta t/\text{s}$								
C	$v/(\text{m/s})$	500							
D	$a_L/(\text{m/s}^2)$								
E	$\Delta v/(\text{m/s})$								
F	$\Delta x/\text{m}$								
G	x/m								

- c) Nehmen Sie waagerechten Abschuss mit Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 500 \text{ m/s}$ an. Vernachlässigen Sie die Schwerkraft (d.h. keine Bahnkrümmung nach unten). Berechnen Sie zu jedem der Zeitpunkte alle $0,3 \text{ s}$ von 0 s bis $1,5 \text{ s}$ folgende Größen und tragen Sie sie in die Tabelle 2-6 ein (gehen Sie spaltenweise vor) – hier gibt es keine geschlossene Formel, man muss alles schrittweise berechnen:*

- in Zeile B die Differenz zwischen den Zeitpunkten in Zeile A;
- in Zeile D nach Gl. (26) mit dem in Aufgabe 2-9b) gerade berechneten k die aktuelle Beschleunigung durch den Luftwiderstand (Zeile D – Vorzeichen und Quadrieren der Geschwindigkeit nicht vergessen);
- in Zeile E nach der Formel $\Delta v = a \Delta t$ (s. Gl. (17)) die Geschwindigkeitsänderung während des Zeitintervalls in Zeile B bis zum nächsten Zeitpunkt,
- durch Addition dieser Änderung zur Geschwindigkeit am Anfang des aktuellen Intervalls die Geschwindigkeit am Anfang des nächsten, tragen Sie dies in Zeile C in die nächste Spalte ein.

* Wenn Sie mit dieser Aufgabe zu große Schwierigkeiten haben, gehen Sie zu den nächsten über.

Malen Sie den Funktionsgraphen $v = v(t)$ in Abbildung 2-4 links.

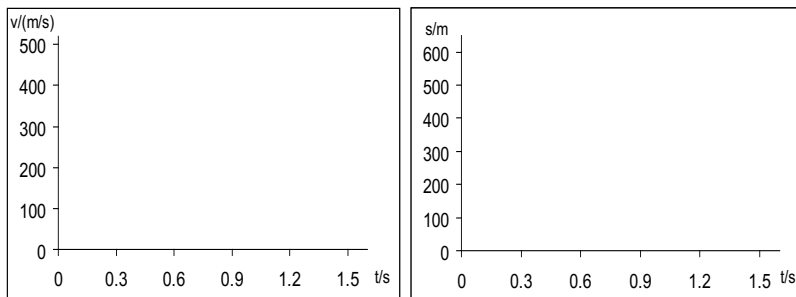


Abb. 2-4 Funktionsgraphen für waagerechten Schuss ohne Schwerkraft
(links Geschwindigkeit, rechts Ort, beide als Funktion der Zeit, zu ergänzen)

- d) Zu jedem der Zeitpunkte berechnen Sie folgende Größen und tragen Sie sie in die Tabelle 2-6 ein:
- nach der Formel $\Delta x = v \Delta t$ (s. Gl. (14)) die Änderung der waagerechten Ortskoordinate, hier mit x bezeichnet (aktuelle Geschwindigkeit v aus Zeile C, Zeitintervall Δt aus Zeile B, Ergebnis Δx in Zeile F eintragen);
 - durch Addition dieser Änderung zum Ort am Anfang des aktuellen Intervalls den Ort am Anfang des nächsten (Zeile G, nächste Spalte).

Malen Sie den Funktionsgraphen $x = x(t)$ in Abbildung 2-4 rechts.

Auch wenn die Beschleunigung a_L als Funktion der Geschwindigkeit v sich durch einen einfachen Ausdruck, nämlich Gl. (26), ergibt, lassen sich die resultierenden Zeitverlaufsfunktionen $a_L(t)$, $v(t)$ leider nicht durch eine entsprechend einfachen mathematischen Ausdruck darstellen, anders als im Fall der konstanten Beschleunigung, Gl. (19). Für eine gute Beschreibung muss man also das Verfahren von Aufgabe 2-9c) verwenden, nur mit deutlich kleineren Zeitschritten, z. B. 1 ms. Von Hand ist das sehr mühsam; so etwas wurde aber früher durchaus – mit bezahlten menschlichen Rechnerinnen und Rechnern, die später mechanische Addiermaschinen zu Hilfe nahmen – gemacht. Heute kann man dazu programmierbare Computer verwenden, die das millionenfach schneller können.⁶

Wollte man die Bewegung des Gewehrgeschosses vollständig, unter Einschluss der Schwerkraft, beschreiben, müsste man sie in zwei Dimensionen, waagerechte

⁶ Wenn Sie programmieren können – sei es auf einem PC, z. B. in BASIC oder mit Excel, oder auf einem programmierbaren Taschenrechner –, lassen Sie Aufgabe 2-9c) und d) mit 1-ms-Schritten rechnen. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen für 0,3 s.

Koordinate x und Höhe h , mittels so genannter Vektoren darstellen. Die Schwerebeschleunigung wirkt immer in negativer h -Richtung, die Beschleunigung durch den Luftwiderstand aber immer entgegengesetzt zur aktuellen Geschwindigkeitsrichtung, die sich durch die Bahnkrümmung laufend leicht ändert. Bei langer Flugzeit oder sehr hohen Ansprüchen an die Genauigkeit der Beschreibung muss man in drei Dimensionen rechnen und noch folgende Effekte in die Berechnung einbeziehen: Luftkräfte quer zur Bahn des Geschosses auf Grund seiner Orientierung und ggf. Rotation, Windversatz, Versatz auf Grund der Erddrehung, Luftdichteabnahme mit der Höhe, Erdkrümmung. In vielen Fällen erlaubt jedoch eine vereinfachte Rechnung schon genügend genaue Aussagen, insbesondere wenn es um die Beurteilung unter Abrüstungsgesichtspunkten geht. Welche Effekte man für die jeweilige Fragestellung vernachlässigen darf, muss jedoch immer sorgfältig geprüft werden.

Nach der Aufgabe 2-9d) würde das Geschoss immer weiter geradeaus fliegen, nur mit laufend verringerter Geschwindigkeit (und dadurch je verringerter Bremsbeschleunigung). Aufgrund der Schwerkraft wird ein reales Geschoss jedoch nach unten fallen und irgendwann am Boden aufschlagen. Wir wollen diese Entfernung hier abschätzen, jedoch ohne volle Vektorrechnung. Da die Schwerebeschleunigung g konstant ist, gilt für die Flughöhe nach Gl. (20)

$$h(t) = -g/2 \cdot t^2 + v_{\text{vert}0} \cdot t + h_0. \quad (28)$$

Durch den waagerechten Abschuss ist die vertikale Startgeschwindigkeit $v_{\text{vert}0} = 0$ m/s. Die Starthöhe sei die eines stehenden Menschen, $h_0 = 1,8$ m. Einsetzen für die Zeit des Aufschlags t_A ergibt:

$$h(t_A) = -g/2 \cdot t_A^2 + h_0 = 0 \text{ m}, \quad (29)$$

Umformen der rechten der Gleichungen (Addieren von $-h_0$ und Dividieren durch $-g/2$ auf beiden Seiten) führt zu:

$$t_A^2 = 2h_0/g, \quad (30)$$

Ziehen der Quadratwurzel auf beiden Seiten ergibt:

$$t_A = \sqrt{(2 h_0/g)}. \quad (31)$$

Aufgabe 2-10

- a) Setzen Sie h_0 und g in Gl. (31) ein und berechnen die Zeit bis zum Aufschlag. Schätzen Sie aus Tabelle 2-6 die bis dann zurückgelegte Entfernung x ab. Wie kann der Schütze die Reichweite vergrößern?
- b) Vergleichen Sie die maximale Bremsbeschleunigung nach Austritt aus dem Lauf (schon in Tabelle 2-6 berechnet) mit der Schwerebeschleunigung g .

- c) Berechnen Sie die mittlere Beschleunigung aufgrund der heißen Pulverdämpfe im Rohr. Hinweis: Benutzen Sie Gl. (19) und (20) mit $v_0 = 0$ m/s und $s_0 = 0$ m (d.h., der Nullpunkt wird für diese Aufgabe von der Mündung zum Rohranfang zurückverlegt). Lösen Sie Gl. (19) nach t auf und setzen Sie dieses in Gl. (20) ein. Lösen Sie diese Gleichung nach a auf, setzen Sie für die Rohrlänge $s = 0,6$ m ein. Vergleichen Sie die mittlere Beschleunigung im Rohr mit der Schwerebeschleunigung. Berechnen Sie die Beschleunigungsdauer t (mit der ersten gewonnenen Gleichung).
- d) Berechnen Sie in ähnlicher Weise die Geschwindigkeit v , mit der ein Objekt aus einer Höhe von $h = 0,5$ m auf den Boden aufprallt. Berechnen Sie dann nach dem Verfahren von Aufgabe 2-10c) die mittlere Beschleunigung a , wenn der Gegenstand beim Aufprall auf einen harten Boden auf die Geschwindigkeit $v = 0$ m/s abgebremst wird; nehmen Sie an, der Objektrand verforme sich beim Aufprall um 2 mm (d.h., der Bremsweg des Objekts sei $s = 2$ mm, nehmen Sie nun an, das Abbremsen beginne bei $t = 0$ s). Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Schwerebeschleunigung.
- e) Erkundigen Sie sich nach den maximal erlaubten Beschleunigungen für Computerkomponenten (z. B. Festplatten) und vergleichen Sie sie mit den verschiedenen soeben berechneten Werten (Tipp: Suchen Sie im Internet nach „hard disk“ mit „shock“ oder „peak acceleration“). Ist es denkbar, in ein Geschoss eine funktionierende elektronische Schaltung einzubauen, die z. B. Bahnkorrekturen steuern könnte? (Tipp: Suchen Sie „artillery shell“ mit „electronics“.)

2.1.6 Kraft und Beschleunigung, Schwerkraft und Trägheit

Um die Bewegung (genauer: Geschwindigkeit und Richtung) eines Körpers zu verändern, muss eine Kraft wirken. Ohne Kraft bleibt die Bewegung erhalten – der Körper bleibt in Ruhe oder bewegt sich mit gleicher Geschwindigkeit in der alten Richtung weiter (Trägheit). (Die im normalen Leben laufend beobachtete Verlangsamung einer Bewegung liegt an der Reibungskraft – in den Lagern der Räder, in der umgebenden Luft). Kraft spürt man in den Muskeln, die sie aufbringen; physikalisch misst man sie z. B. an der Auslenkung einer Feder. Die Änderungsrate der Geschwindigkeit (das ist die Änderung geteilt durch die Zeit) ist gerade die Beschleunigung (s. Gl. (16))⁷, und diese ist proportional zu der Kraft F (force):

$$F = m a, \quad (32)$$

7 Das gilt, wenn die Beschleunigung in der Richtung der Geschwindigkeit wirkt. Die Beschleunigung kann auch senkrecht dazu gerichtet sein, dann bleibt der Wert der Geschwindigkeit gleich, aber die Bewegungsrichtung ändert sich. Das ist z. B. der Fall bei einem Satelliten, der (unter dem Einfluss der Erdanziehungskraft) auf einer kreisförmigen Bahn läuft.

wobei m die Masse des Körpers ist. Dieses ist das berühmte *Newtonsche Gesetz*. Die Kraft wird in der Einheit Newton (N) gemessen:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2. \quad (33)$$

Einer speziellen Kraft kann man kaum entgehen: der Anziehungskraft der Erde oder Schwerkraft. Sie wirkt je nach der Körpermasse, und zwar so, dass die verschiedenen Massen – wenn die Anziehungskraft nicht irgendwie kompensiert wird – mit derselben Beschleunigung in Richtung auf den Erdmittelpunkt beschleunigt werden. Diese Beschleunigung nennt man g (von Gravitation), ihr Wert ist (s. Abschnitt 2.1.4)⁸

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2. \quad (34)$$

Damit ist die Kraft F_G , mit der eine Masse m auf den sie unterstützenden Boden drückt oder am sie tragenden Seil zieht:

$$F_G = m g. \quad (35)$$

Diese Kraft nennt man die Gewichtskraft oder das *Gewicht*. Die Masse m eines Körpers bleibt unverändert, und man muss für gleiche Beschleunigung immer dieselbe Kraft aufbringen. Das Gewicht hängt dagegen vom nächsten Himmelskörper und dem Abstand zu seinem Mittelpunkt ab – auf dem Mond z. B. wiegt 1 kg Masse nur 1,62 N gegenüber 9,81 N auf der Erde. Im täglichen Leben sind die Variationen der Schwerebeschleunigung unbedeutend, daher wird häufig von Gewicht in kg gesprochen – das ist aber physikalisch falsch und sollte zumindest bei naturwissenschaftlichen Überlegungen vermieden werden.

Aufgabe 2-11

- ▶ a) Bestimmen/schätzen Sie Ihre Masse m (in kg). Berechnen Sie Ihr Gewicht F_G (in N).
- ▶ b) Berechnen Sie die Schwerebeschleunigung a_M auf dem Mondboden. Berechnen Sie Ihr Gewicht F_{GM} auf dem Mond.
- ▶ c) Ein Güterzug hat 30 Wagen mit mittlerer Masse 45 Mg. Die Lokomotive beschleunigt den Zug in 4 Minuten auf 80 km/h Geschwindigkeit. Wie groß ist die (mittlere) Beschleunigung? Mit welcher Kraft zieht die Lokomotive an der Kupplung des ersten Wagens (Reibung vernachlässigt)?
- ▶ d) Eine Rakete von $m = 15 \text{ Mg}$ soll nach dem Start mit $a = 50 \text{ m/s}^2$ beschleunigen. Welche Kraft F muss das Triebwerk ausüben (und dessen Aufhängung an die Raketenstruktur übertragen)?

8 Das gilt in der Höhe $h = 0 \text{ m}$ (Meereshöhe), die Schwerebeschleunigung fällt mit dem Abstand vom Erdmittelpunkt.

Die Trägheit der Masse kann man zur Ortsbestimmung und Navigation benutzen. Wenn ein bewegter Körper seine Geschwindigkeit oder Richtung ändert, erzeugt die dazugehörige Beschleunigung an allen seinen Komponenten eine Kraft. Diese kann man mit einem empfindlichen Sensor (z. B. Probemassee an Federwaage) bestimmen und mit bekannter Masse aus Gl. (32) die jeweils wirkende Beschleunigung ausrechnen. Gemäß Gl. (17) kann man daraus laufend die Geschwindigkeitsänderung berechnen und zur Geschwindigkeit des letzten Zeitintervalls addieren. Mit der so gewonnen aktuellen Geschwindigkeit wird nach (14) die Ortsänderung berechnet und zum letzten Ort addiert. Mit dieser *Trägheitslenkung* kann man, wenn man die Startgeschwindigkeit und den Startort kennt, laufend die eigene Position im Raum ermitteln.

Aufgabe 2-12

- a) Der für die Komponente waagrecht in Vorwärtsrichtung zuständige Kraftmesser eines Trägheitslenksystems in einem Flugzeug, das geradlinig beschleunigt, hat zu den in Zeile A (Tabelle 2-7) angegebenen Zeiten nach dem Abheben die in Zeile C angegebenen Kräfte gemessen. Nehmen Sie vereinfacht an, die Beschleunigung bleibe je bis zur nächsten Messung konstant. Die Probemassee betrage $m = 0,0300 \text{ kg}$; zum Zeitpunkt $t = 33 \text{ s}$ sei die Geschwindigkeit $v = 112,3 \text{ m/s}$, der Ort in waagerechter Richtung $s = 3.103 \text{ m}$. Berechnen Sie die in den jeweiligen Zeitintervallen wirkende Beschleunigung (Zeile D), mittels der Intervallauern (Zeile B) den Geschwindigkeitszuwachs (Zeile E), die Geschwindigkeit am Beginn des nächsten Intervalls (Zeile F, nächste Spalte), den waagerechten Ortszuwachs (unter der vereinfachten Annahme, auch die Geschwindigkeit bleibe bis zur nächsten Messung konstant, Zeile G) und den Ort am Beginn des nächsten Intervalls (Zeile H, nächste Spalte). Rechnen Sie mindestens auf drei Stellen hinter dem Komma genau.

Tab. 2-71 Zahlenwerte für waagerechte Beschleunigung eines Flugzeugs

A	t/s	33,000	33,500	34,000	34,500	35,000
B	$\Delta t/\text{s}$					
C	F/N	0,0435	0,0412	0,0407	0,0423	
D	$a/(\text{m/s}^2)$					
E	$\Delta v/(\text{m/s})$					
F	$v/(\text{m/s})$	112,300				
G	$\Delta s/\text{m}$					
H	s/m	3103,000				

Tab. 2-8 Zahlenwerte für waagerechte Beschleunigung eines Flugzeugs mit Messfehler bei der Kraft

A	t/s	33,000	33,500	34,000	34,500	35,000
B	$\Delta t/s$					
C	F/N	0,0445	0,0422	0,0417	0,0433	
D	$a/(m/s^2)$					
E	$\Delta v/(m/s)$					
F	$v/(m/s)$	112,300				
G	$\Delta s /m$					
H	s/m	3103,000				

- b) Wiederholen Sie das mit der Annahme, der Kraftmesser zeige um 0,001 N zu viel an (Tabelle 2-8). Vergleichen Sie die Abweichungen bei der berechneten Geschwindigkeit und beim Ort. Nehmen Sie an, ab 35,000 s sei die Geschwindigkeit konstant. Wie groß ist der Ortsfehler nach 1 h Flugzeit?

Wie in Aufgabe 2-12b) demonstriert, führen die unvermeidbaren Fehler bei der Beschleunigungsmessung zu wachsenden Abweichungen bei Geschwindigkeit und Ort. Diese „Drift“ ist entscheidend für die Zielgenauigkeit von Waffen. Sie kann kompensiert werden, wenn der Ort von Zeit zu Zeit durch andere Messungen bestimmt wird.

In der Realität ist Trägheitslenkung komplizierter. Die Bewegung findet in drei Dimensionen statt, so dass man drei Kraftmesser braucht. Der bewegte Körper kann seine Orientierung ändern; dafür wird oft eine um zwei Achsen drehbare Plattform verwendet, die mittels Kreisel in ihrer Richtung raumfest gehalten wird. An den Kraftmessern wirkt zusätzlich zu der durch Trägheit hervorgerufenen Beschleunigungskraft auch die Gewichtskraft, und man kann die beiden nicht auseinanderhalten. Die Gewichtskraft ist jedoch von der Höhe über der Erde abhängig, so dass man sie aus dem Ort berechnen und dann subtrahieren kann.

2.1.7 Energie, Leistung

Die Energie ist eine universelle Größe; man kann sie als gespeichertes Arbeitsvermögen auffassen. Sie kann in verschiedenen Formen auftreten, z. B. mechanisch, thermisch, elektrisch, chemisch, als Strahlung, kernphysikalisch. Für die Energie gilt ein allgemeiner Erhaltungssatz: *In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Energien konstant* – dies ist der 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Er gilt bisher in

allen Bereichen, auch dort, wo die klassische Physik versagt.⁹ Was wir im normalen Sprachgebrauch Energiegewinn, -quelle, -verlust nennen, ist genau besehen nur die Umwandlung von einer Energieform in eine andere, etwa wenn in Form von Kohle gespeicherte chemische Energie zunächst in Wärmeenergie und diese dann z. T. in elektrische Energie gewandelt wird – der Rest bleibt Wärmeenergie. Wenn eine Bewegung nach Ende des Antriebs ausläuft, wird die mechanische Energie durch Reibung in Wärmeenergie umgewandelt.

Umwandlung irgendeiner anderen Energieform in Wärmeenergie ist immer vollständig möglich. In umgekehrter Richtung gilt das nicht: Wärmeenergie kann nur zu einem gewissen Teil in mechanische, elektrische oder andere „höherwertige“ Energie umgewandelt werden. Dies passt zu der Beobachtung, dass Wärme immer vom wärmeren zum kälteren Körper fließt, in Richtung auf eine gemeinsame mittlere Temperatur, und entspricht dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

Die Einheit der Energie ist das Joule; ein Joule ist gleich einem Newton-Meter oder einer Watt-Sekunde:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{Ws}. \quad (36)$$

Eine andere gebräuchliche Einheit ist die Kilowattstunde (v. a. für elektrische Energie genutzt):

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ s/h } 1000 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}. \quad (37)$$

Für Vorgänge im Mikrobereich wird auch das Elektronvolt verwendet, die Energie, die ein Elektron der elektrischen Elementarladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 1 Volt gewinnt oder verliert:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}. \quad (38)$$

Bei mechanischen Energieformen gibt es zunächst die *kinetische Energie* (gegeben durch den „Schwung“ einer Bewegung). Für eine Masse m , die sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, ist sie gegeben durch

$$E_{\text{kin}} = m v^2/2. \quad (39)$$

9 Unter Berücksichtigung der Relativitätstheorie muss der Energieerhaltungssatz etwas anders formuliert werden und die Ruhemasse m , der nach der berühmten Formel $E = m c^2$ ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s ist die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum) ebenfalls eine Energie zukommt, einschließen. In der Quantentheorie werden Atome oder Atomkerne bei Energieabgabe entsprechend leichter, siehe auch Abschnitt 2.1.12.

Aufgabe 2-13

- Eine Gewehrkugel der Masse $m = 10 \text{ g}$ verlasse den Lauf mit $v = 500 \text{ m/s}$. Wie groß ist die anfängliche kinetische Energie E_{kin} ? Nach mehreren hundert Meter hat sich die Geschwindigkeit auf $v = 350 \text{ m/s}$ verringert – wie groß ist die kinetische Energie dann?

Die zweite mechanische Energie ist die so genannte *potentielle Energie* in einem Schwerfeld. Dies ist die Energie aufgrund der Lage – liegt ein Körper in einer gewissen Höhe, kann sie durch Los- und Fallenlassen „freigesetzt“ (d.h., in kinetische Energie umgewandelt) werden. Umgekehrt musste man die Energie zum Anheben des Objekts zunächst aufbringen. Im Erdschwerfeld in der Nähe des Bodens, wo die Schwerebeschleunigung g beträgt, ist für eine Masse m in der Höhe h die potentielle Energie

$$E_{\text{pot}} = m g h. \quad (40)$$

Man bringt dieselbe potentielle Energie auf, wenn man 2 Beutel Kartoffeln von je 10 kg über die Treppe zum 1. Stock 5 m hoch trägt, wie wenn man 1 Beutel 10 m hoch bringt (die potentielle Energie für den eigenen Körper ist jedoch im zweiten Fall doppelt so hoch).

Aufgabe 2-14

- a) Auf der Mauerhöhe einer Burg in $h = 18 \text{ m}$ liege ein Stein von $m = 20 \text{ kg}$. Wie groß ist seine potentielle Energie E_{pot} ?
- b) Der Stein werde über die Kante gewälzt und falle nach unten. Wie groß ist seine kinetische Energie E_{kin} beim Aufprall auf den Boden? (Argumentieren Sie mit dem 1. Hauptsatz und vernachlässigen Sie die Reibungs- und eventuelle Rotationsenergie). Wie groß ist die Aufschlaggeschwindigkeit v ? (Lösen Sie Gl. (39) nach v auf und setzen Sie E_{kin} ein.)

Die Energieerhaltung bietet eine einfachere Möglichkeit, die maximale Höhe beim Wurf senkrecht nach oben auszurechnen, als den Weg über Beschleunigung, Geschwindigkeit und Höhe zu gehen wie in Aufgabe 2-7d). Während der Aufstiegsphase wird laufend kinetische Energie in potentielle umgewandelt, bis im obersten Punkt die erstere Null wird (Stillstand, $v = 0 \text{ m/s}$, $E_{\text{kin}} = 0 \text{ J}$); die potentielle Energie ist dann maximal und gleich der ursprünglichen kinetischen (wenn man die kleine Reibungs- und eventuelle Rotationsenergie vernachlässigt), $E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}0}$.

Aufgabe 2-15

- a) Eine andere Formulierung von Aufgabe 2-7d): Ein mittelalterlicher Wurfapparat werfe einen Stein senkrecht nach oben; der Stein verlasse den Apparat in der Höhe $h_0 = 2 \text{ m}$ mit der Geschwindigkeit $v_0 = 15 \text{ m/s}$. Der Stein habe die Masse $m = 20 \text{ kg}$ (daher hier nicht mehr die Möglichkeit des Wurfs von Hand). Berechnen Sie die ursprüngliche kinetische Energie E_{kin} . Im höchsten Punkt ist diese vollständig in potentielle Energie E_{pot} gewandelt (Reibungs- und Rotationsenergie werden vernachlässigt); berechnen Sie – durch Auflösung von Gl. (40) – die zugehörige Höhe h_{max} . Vergleichen Sie diese Höhe mit der in Aufgabe 2-7d) abgeschätzten. (Vergessen Sie nicht, dass Sie durch diese Art der Rechnung implizit angenommen haben, der Stein habe in der Starthöhe h_0 keine potentielle Energie. Wiederholen Sie die Energiebilanzrechnung, indem Sie die potentielle Energie in der Starthöhe mit berücksichtigen.)
- b) Nach Durchlaufen des oberen Umkehrpunktes fällt der Stein nach unten. Berechnen Sie aus Energieüberlegungen die Geschwindigkeit v in der Abwurfhöhe h_0 sowie beim Aufschlag auf den Boden ($h = 0 \text{ m}$).

Die Energieerhaltung erlaubt auch, wichtige Größen schrägen Wurfs/Schusses zu berechnen. Unter den vereinfachten Annahmen: Abwurfhöhe $h_0 = 0 \text{ m}$, Luftwiderstand und Rotation finden nicht statt, erreicht man – für feste Abwurfgeschwindigkeit v_0 – die größte Wurfweite bei Abwurf in Richtung 45° gegen die Waagerechte. Dabei sind die „Komponenten“ der Geschwindigkeit in waagerechter Richtung v_{x0} und in senkrechter Richtung v_{y0} gleich groß, je $1/\sqrt{2}$ mal die Gesamtgeschwindigkeit v_0 . Berechnen wir die Gesamtenergie beim Abwurf in allgemeiner Form:

$$E_{\text{ges0}} = E_{\text{kin0}} + E_{\text{pot0}} = m v_0^2/2 + m g (0 \text{ m}) = m v_0^2/2. \quad (41)$$

Während (ohne Luftwiderstand) die waagerechte Geschwindigkeitskomponente immer die gleiche, v_x , bleibt, fällt die senkrechte v_y bis auf Null im höchsten Punkt, Höhe h_{max} . Dort ist die Gesamtgeschwindigkeit $v_{\text{hmax}} = v_{y0} = v_0/\sqrt{2}$; die potentielle Energie ist maximal. Die Gesamtenergie ist nun:

$$E_{\text{ges0}} = E_{\text{kinhmax}} + E_{\text{pothmax}} = (m v_0^2/2) / \sqrt{2}^2 + m g h_{\text{max}} = m v_0^2/(2 \cdot 2) + m g h_{\text{max}}. \quad (42)$$

Gleichsetzen der rechten Seiten der Gl. (41) und (42) führt zu

$$m v_0^2/2 = m v_0^2/4 + m g h_{\text{max}}. \quad (43)$$

Auf beiden Seiten $-mv_0^2/4$ addieren, dann beide Seiten zunächst durch $m/4$ und dann durch $4 g$ dividieren, sowie links und rechts vertauschen führt zu einer Gleichung für die maximale Höhe (schreiben Sie zur Übung die Umformschritte einzeln auf):

$$h_{\text{max}} = v_0^2 / (4 g), \quad (44)$$

ist also von der Masse des Wurfkörpers unabhängig.

Die Zeit bis hierher lässt sich mit Gl. (19) berechnen zu

$$t_{\text{hmax}} = v_{0y} / g = v_0 / (\sqrt{2} g), \quad (45)$$

weil ja die Schwerkraftbeschleunigung konstant ist. Beim Herunterfallen wieder bis zum Boden geschieht in y -Richtung dasselbe rückwärts – Beschleunigung wieder bis zum Betrag der Startgeschwindigkeit (nur diesmal in Richtung nach unten), dies dauert genau so lange wie der Aufstieg. Somit ist die Gesamtbahndauer (bis zur maximalen Entfernung x_{max})

$$t_{\text{xmax}} = 2 t_{\text{hmax}} = \sqrt{2} v_0 / g. \quad (46)$$

Hiermit lässt sich nun der allgemeine Ausdruck für die maximale Entfernung berechnen; die Geschwindigkeitskomponente in waagerechter Richtung v_x bleibt konstant, also gilt mit Gl. (14)

$$x_{\text{max}} = v_x t_{\text{xmax}} = (v_0 / \sqrt{2}) (\sqrt{2} v_0 / g) = v_0^2 / g. \quad (47)$$

Aufgabe 2-16

- Berechnen Sie für den eben behandelten schrägen Wurf ohne Luftwiderstand unter 45° aus Gl. (44) die maximale Bahnhöhe h_{max} sowie aus Gl. (47) die Wurfweite x_{max} für die verschiedenen in Tabelle 2-9 eingetragenen Anfangsgeschwindigkeiten v_0 . (Bei noch höheren Geschwindigkeiten sind die verschiedenen Annahmen, unter denen die Gleichungen gewonnen wurden, nicht mehr gegeben: Abnahme der Schwerkraftbeschleunigung mit der Höhe, Erdkrümmung usw.)

Tab. 2-9 Zahlenwerte für schrägen Wurf bei verschiedener Anfangsgeschwindigkeit (zu vervollständigen)

$v_0 / (\text{m/s})$	5	10	15	20	50	100	200	500
$h_{\text{max}} / \text{m}$								
$x_{\text{max}} / \text{m}$								

Energieübertragungs- und -umwandlungsprozesse können verschieden lange dauern. Als (mittlere) *Leistung* P (englisch power) bezeichnet man den Quotienten aus der umgesetzten Energie ΔE und der dafür benötigten Zeit Δt :

$$P = \Delta E / \Delta t. \quad (48)$$

Ihre Einheit ist das Watt, definiert durch

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}. \quad (49)$$

(Früher wurde auch die Pferdestärke benutzt, $1 \text{ PS} = 750 \text{ W}$.) Dieselbe Energie kann mit kleiner Leistung über lange Zeit umgesetzt werden oder mit hoher Leistung

in entsprechend kurzer Zeit. Andersherum steigt die Energie bei gleichbleibender Leistung proportional mit der Zeit:

$$\Delta E = P \Delta t. \quad (50)$$

Aufgabe 2-17

- ▶ a) Eine Glühlampe verbrauche eine elektrische Leistung von $P = 60 \text{ W}$. Wie groß ist die verbrauchte elektrische Energie ΔE nach 1 s, 1 h, 1 d? Geben Sie sie sowohl in J als auch in kWh an (und berechnen Sie den Strompreis, wenn 1 kWh 0,27 € kostet). Wo ist die verbrauchte Stromenergie geblieben?
- ▶ b) Experiment: *Stromzähler für elektrische Leistung*. Schauen Sie Ihren Stromzähler an – irgendwo ist angegeben, wie viele Umdrehungen die Scheibe pro Kilowattstunde macht. Schalten Sie möglichst alle Verbraucher aus, warten Sie möglichst, bis der Kühlschrank gerade nicht arbeitet. Stoppen Sie die Zeit für einen Umlauf (markierter Sektor), notieren Sie dies. Schalten Sie dann eine Lampe ein und bestimmen Sie dann die Umlaufzeit. Schalten Sie sie wieder aus und schalten eine Herdplatte (möglichst für einen kleinen Topf) auf volle Leistung (ersatzweise: Föhn, Heizlüfter), messen Sie die Umlaufzeit (ggf. über mehrere Umläufe).
Auswertung: Berechnen Sie die Energie E pro Umdrehung – in Wh und J. Berechnen Sie mit den Umlaufzeiten die jeweils verbrauchten Leistungen P . Ziehen Sie die erste Leistung (ohne Lampe, Herd) von den beiden anderen ab. Stimmt die gemessene Leistung mit den Angaben (aufgedruckt, im Handbuch) überein?
- ▶ c) Ein Ultrakurz-Puls-Laser erzeuge einen Lichtpuls der Strahlungsenergie $\Delta E = 2 \text{ J}$, die Pulsdauer betrage 3 ps. Wie groß ist die mittlere Lichtleistung P eines Pulses? Vergleichen Sie dies mit der Leistung eines großen Kraftwerksblocks von z. B. $P_{\text{KW}} 500 \text{ MW}$. Der Laser erzeuge maximal 2.000 Pulse pro Sekunde. Wie groß ist die mittlere Strahlleistung insgesamt? Vergleichen Sie wieder mit dem Kraftwerk.
- ▶ d) Einem Gewehrsgeschoss wird während der Beschleunigung im Rohr eine bestimmte kinetische Energie übertragen. (Die insgesamt freigesetzte chemische bzw. Wärme-Energie ist höher, s. u.) Benutzen Sie die Beschleunigungsdauer t aus Aufgabe 2-10c) und kinetische Energie E_{kin} aus Aufgabe 2-13 und berechnen Sie die mittlere kinetische Leistung P_{kin} während der Beschleunigung.

Tabelle 2-10 stellt die mechanischen Leistungen einiger Systeme zusammen.

Tab. 2-10 Typische Werte der mechanischen bzw. elektrischen Leistung P für verschiedene Systeme der Energieumsetzung.

System	Mensch	Pferd	Pkw-Motor	Lkw-Motor	Panzer-Motor	elektrisches Kraftwerk
P/W	100	750	50.000	250.000	1.000.000	500.000.000

(Abweichungen um mehr als einen Faktor 2 nach oben und unten können auftreten.)

Thermische Energie steckt im Wärmegehalt von Körpern. Heizt man ein Stück Materie auf, führt man ihm Wärmeenergie zu. Der Energiezuwachs ist i.d.R. proportional zur Masse und zur Temperaturerhöhung, er wird beschrieben durch (Wärmeenergie wird oft mit Q bezeichnet)

$$\Delta Q = c m \Delta T. \quad (51)$$

Hier sind m die aufgeheizte Masse und ΔT die Temperaturdifferenz. Temperaturen werden im SI in Kelvin gemessen, die Differenzen sind dieselben wie in Grad Celsius, nur der Nullpunkt ist verschoben, er liegt bei -273°C .¹⁰ c ist die spezifische Wärmekapazität – gemessen in $\text{J}/(\text{kg K})$ – und darf nicht mit der in Abschnitt 2.1.9 eingeführten Wellen- oder Lichtgeschwindigkeit verwechselt werden.

Aufgabe 2-18

- a) Eine gewisse Bekanntheit hat die spezifische Wärmekapazität des Wassers $c_{\text{Wasser}} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Darauf beruhte eine frühere Einheit der Wärmemenge, die Kalorie. Eine Kilokalorie ist nötig, um 1 kg Wasser um 1°C zu erwärmen. Wieviele J sind das?
- b) Experiment: *Wärmekapazität von Wasser*. Nehmen Sie einen (kleinen) Topf, füllen Sie ihn nacheinander mit 0,25, 0,5, 0,75 und 1,0 l Wasser. Setzen Sie ihn auf den Herd und schalten die höchste Heizstufe ein, möglichst bei der Platte, von der Sie in Aufgabe 2-17b) die Leistungsaufnahme gemessen haben. Bestimmen Sie die Zeit bis zum Sieden. Lassen Sie den Topf bei jedem Neufüllen auf die Temperatur in der Küche/des

10 Das ist der sog. absolute Nullpunkt, tiefere Temperaturen sind nicht möglich. Wärme kann man als die Bewegung der Teilchen (Atome, Moleküle) auffassen, aus denen ein Stoff besteht; am absoluten Nullpunkt sind sie in Ruhe (so weit die Quantentheorie das zulässt, s. Abschnitt 2.1.12.3).

Leitungswassers abkühlen. Wenn Sie ein gutes Thermometer haben (0 bis über 100 °C), bestimmen Sie die Temperaturen beim Einfüllen und beim Sieden; sonst können Sie 15 °C bzw. 100 °C annehmen.

Auswertung: Berechnen Sie aus der aufgewandten Leistung und den Siedezeiten die in das Aufheizen gegangenen Energien (wenn Sie die Leistung nicht wissen, arbeiten Sie mit der Variablen P). Bestimmen Sie die Energiedifferenzen zwischen den verschiedenen um 0,25 l verschiedenen Wassermengen – dabei wird also die in das Aufheizen des Topfes gegangene Energie abgezogen. Bilden Sie den Mittelwert. Wenn Sie die Energie in Zahlen haben, berechnen Sie – durch Auflösen von Gl. (51) – die spezifische Wärmekapazität c_{Wasser} (das Volumen 0,25 l hat bei Wasser eine Masse von 0,25 kg, $\rho_{\text{Wasser}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$). Vergleichen Sie mit dem genau bestimmten Wert, $c_{\text{Wasser}} = 4,19 \text{ kJ/(kg K)}$. Wenn Sie die Leistung nicht wissen, bestimmen Sie die Energie mit dem genauen Wert von c_{Wasser} und rechnen daraus den Teil der Herdplattenleistung aus, der in das Wasser gegangen ist. (Wenn Sie mögen, versuchen Sie, auch den anderen Teil zu bestimmen.)

- c) Ein Pkw der Masse 800 kg werde von 80 km/h zum Stillstand gebremst. Wieviel Reibungsenergie ΔQ müssen die Bremsen dabei aufnehmen? Nehmen Sie an, die Masse der Bremsscheiben/Trommeln mit den Bremsbelägen sei $m = 4,5 \text{ kg}$ und die aufgeheizte Masse bestehe nur aus Stahl mit $c_{\text{Stahl}} = 450 \text{ J/(kg K)}$. Wie weit würde sie sich ohne Wärmeabfuhr aufheizen?

Wenn man Energieformen ineinander umwandelt, geschieht das nicht immer vollständig. Den Anteil der umgewandelten an der eingesetzten Energie nennt man *Wirkungsgrad* η (griechisch eta):

$$\eta = E_2 / E_1. \quad (52)$$

Hier bezeichnet E_1 die eingesetzte und E_2 die umgewandelte Energie, die am Ausgang eines Systems zur Verfügung steht. Der Rest, die Differenz $E_1 - E_2$, ist für den momentanen Zweck unnütz (z. B. Reibungsverluste) und muss ggf. abgeführt werden. Wie oben erwähnt, gibt es eine prinzipielle Beschränkung bei der Umwandlung von Wärmeenergie in andere Energieformen (die entsprechend „höherwertig“ genannt werden). Damit Wärmeenergie übertragen wird, muss in einem Teil des Systems eine höhere Temperatur T_1 , in einem anderen eine tiefere T_2 vorliegen. Der Wirkungsgrad kann dann bestenfalls

$$\eta_{\text{max}} = 1 - T_2 / T_1 \quad (53)$$

werden, wo die absoluten Temperaturen zu benutzen sind.

Aufgabe 2-19

- ▶ a) Eine Wärmekraftmaschine arbeite mit Wasserdampf, der nur auf knapp über den Siedepunkt ($T_1 = 100\text{ °C}$) erhitzt wird. Auf der anderen Seite werde er bei $T_2 = 30\text{ °C}$ kondensiert. Wie groß kann der Wirkungsgrad η maximal sein? (Nicht vergessen, auf absolute Temperatur umzurechnen.)
- ▶ b) Ein Kraftwerk überhitze Wasserdampf (unter Druck) auf 500 °C und kondensiere ihn ebenfalls bei 30 °C . Wie groß kann dessen Wirkungsgrad theoretisch werden?

Chemische Energie wird bei Reaktionen zwischen Stoffen umgesetzt. Bei manchen Reaktionen wird sie frei, bei anderen muss sie für das Zustandekommen einer Reaktion hineingesteckt werden. Freisetzung geschieht z. B. bei der Verbrennung, d.h. der Verbindung mit Sauerstoff. Im Fall von Wasserstoff (H_2) entsteht dabei Wasser (H_2O), und pro Wassermolekül werden 2,5 eV frei:



(Dies ist eine chemische Formel, keine mathematische Gleichung.) Die Verbindung von Wasserstoff mit Sauerstoff ist energetisch günstiger als der getrennte Zustand, die Bindungsenergie wird frei und heizt z. B. das entstehende Wasser sowie die umgebende Luft auf. Andersherum kann man Wasser spalten, etwa durch einen elektrischen Gleichstrom. Bei dieser Elektrolyse muss man jedem Wassermolekül $\Delta E = 2,5 \text{ eV}$ elektrische Energie zuführen, um es aus dem günstigen gebundenen Zustand herauszu"heben".

Wie rechnet man die pro Molekül umgesetzte Energie, gemessen in der Mikro-Einheit Elektronenvolt, auf die pro kg umgesetzte Energie, gemessen in der Makro-Einheit Joule, um? Wir müssen wissen, wie viele Moleküle in $m = 1 \text{ kg}$ enthalten sind. (Die Umrechnung eV nach J wurde schon in Gl. (38) angegeben.) In $\mu = 1 \text{ mol}$ eines beliebigen Stoffes sind $6,02 \cdot 10^{23}$ Moleküle enthalten (Loschmidtsche Zahl $L = 6,02 \cdot 10^{23} / \text{mol}$, s. Teilkapitel 3.2). Seine Masse erhält man aus der molaren Masse des jeweiligen Stoffes,¹¹ die sich aus den atomaren Massen der Bestandteile des Moleküls durch Addieren ergibt. Die molare Masse von Wasser ist $(2 \cdot 1 + 1 \cdot 16) \text{ g/mol} = 18 \text{ g/mol}$,¹²

11 In der Chemie wird die molare Masse in der Einheit 1/12 der Masse des Kohlenstoff-12-Atoms gemessen, damit entspricht es etwa der Anzahl von Kernteilchen (Protonen und Neutronen von etwa gleicher Masse) in den Atomkernen des Moleküls (leichte Abweichungen entstehen durch die chemische und vor allem die nukleare Bindungsenergie), s. Teilkapitel 3.2 (Chemie).

12 H: 1 g/mol, O: 16 g/mol. Die leichten Abweichungen von den ganzen Zahlen werden hier vernachlässigt.

$$m / \mu = 18 \text{ g/mol.} \quad (55)$$

Auflösen nach μ gibt: $\mu = m / (18 \text{ g/mol})$; einsetzen von $m = 1 \text{ kg}$ gibt: $\mu = 1 \text{ kg} / (0,018 \text{ kg/mol}) = 56 \text{ mol}$. Somit ist in der Masse 1 kg Wasser die Stoffmenge 56 mol enthalten. Für die Energie, die bei der Verbindung von 1 kg Wasserstoff und Sauerstoff zur selben Menge Wasser frei wird, gilt also:

$$\begin{aligned} E_{1 \text{ kg H}_2\text{O}} &= \mu \cdot \Delta E = \\ 56 \text{ mol} \cdot (6,02 \cdot 10^{23} / \text{mol}) \cdot 2,5 \text{ eV} &= 843 \cdot 10^{23} \text{ eV} = 8,43 \cdot 10^{25} \text{ eV} = \\ 8,43 \cdot 10^{25} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} &= 1,34 \cdot 10^7 \text{ J} = 13,4 \text{ MJ.} \end{aligned} \quad (56)$$

Wenn man den für die Verbrennung nötigen Sauerstoff der Umgebungsluft entnehmen kann, wird der chemische Energiegehalt oft nur auf den Treibstoff bezogen. Zum Beispiel haben leichte Kohlenwasserstoffe wie Dieselöl spezifische Energiegehalte von 40 MJ/kg. Bei Sprengstoffen (wie auch bei Raketentreibstoffen) muss andererseits der Sauerstoff schon im Stoff mitgebracht werden, er lagert sich bei der Explosion den einzelnen Produktmolekülen an (s. Abschnitt 3.7.2). Beim militärischen Sprengstoff Trinitrotoluol (TNT) ist die spezifische Energiefreisetzung 4,2 MJ/kg. Weil für Sprengenergien oft das *kg TNT-Äquivalent* als Einheit benutzt wird, ist dies auch der Umrechnungsfaktor für die Berechnung in der sonst üblichen Einheit J.¹³

Chemische Energie wird auch beim Stoffwechsel der Lebewesen umgesetzt; mit der Nahrung aufgenommene Stoffe werden – mit komplizierten biochemischen Zwischenschritten – mit dem Sauerstoff aus der Atmung „verbrannt“. Die dabei freigesetzte chemische Energie bewegt Muskeln; sie pumpt Ionen durch Nervenmembranen und erlaubt so die Impulsweiterleitung und damit die Aufnahme von Umweltreizen, deren Verarbeitung und die Handlung; schließlich hält sie – bei Warmblütlern – die Körpertemperatur höher als die der Umgebung.

Aufgabe 2-20

- Energiegehalte von Nahrungsmitteln werden z. T. noch in Kilokalorien pro 100 g angegeben (s. Aufgabe 2-18a). Bei Brot ist der spezifische Energiegehalt z. B. 200 kcal/100 g, bei Margarine 700 kcal/100 g, bei Schokolade 530 kcal/100 g. Rechnen Sie auf MJ/kg um und vergleichen Sie mit Dieselöl und TNT.

13 Als Energieeinheit eine Masse zu benutzen, ist physikalisch falsch. Dennoch wird das kg TNT-Äquivalent (oder auch kt, Mt mit den SI-Multiplikatoren Kilo-, Mega- vor der Tonne – $1 \text{ t} = 1 \text{ Mg}$ –, nicht wie beim SI vor der Einheit Gramm) für große Sprengenergien aus historischen Gründen weiter benutzt, oft ohne den Zusatz „Äquivalent“ oder sogar „TNT“. In der Regel wird die Sprengenergie auch noch als Sprengkraft bezeichnet, was hier wenigstens vermieden wird.

Tab. 2-11 Spezifische Energiegehalte verschiedener Substanzen (zu vervollständigen)

Substanz	Brot	Margarine	Schokolade	Dieselöl	TNT
Spezifischer Energiegehalt / (MJ/kg)					

Nur der Vollständigkeit halber sollen weitere Energieformen erwähnt werden: Die *elektrische Energie* rührt von Kräften her, die elektrische Ladungen aufeinander ausüben. Sie wird bei Stromfluss in Leitern, die einen so genannten elektrischen Widerstand haben, in Wärmeenergie umgewandelt (s. auch Abschnitt 2.1.9). Bewegte Ladungen sowie Magnete üben magnetische Kräfte aufeinander aus, die zu *magnetischer Energie* führen. Beide Kraftfelder sind gekoppelt, insbesondere bei elektromagnetischen Wellen, bei denen *Strahlungsenergie* auftritt.

Für Rüstung und Abrüstung ist schließlich die *Kernenergie* von herausragender Bedeutung. Sie rührt von den Kräften her, die Kernteilchen, Nukleonen genannt, aufeinander ausüben – das sind die so genannten Protonen (elektrisch positiv geladen) und die Neutronen (elektrisch neutral). Kommen sie sich nahe genug, können sie die gegenseitige elektrische Abstoßung der Protonen überwinden; die anziehenden, viel stärkeren Kernkräfte überwiegen dann und halten den Kern zusammen.¹⁴ Beim Verbinden von Kernteilchen werden erheblich höhere Energien frei als bei der Verbindung von Atomen – in der Kernphysik sind die Bindungsenergien einige MeV pro Teilchen, gegenüber einigen eV pro Atom in der Chemie. Das ist auch der Grund, warum man bei der Kernenergienutzung so extrem viel Energie aus vergleichsweise wenig Masse freisetzen kann.

Die Bindungsenergie der heute vorhandenen Kerne ist bei ihrer Entstehung in Sternen schon freigesetzt worden – sie kann nicht mehr genutzt werden. Jedoch unterscheidet sich die Bindungsenergie pro Kernteilchen ein wenig – bei leichten und schweren Kernen ist sie geringer, bei solchen mit mittleren Anzahlen von Protonen und Neutronen ist sie höher. Gelingt es, schwere Kerne zu zwei mittelschweren zu spalten oder zwei leichte zu einem etwas schwereren zu verschmelzen, wird die zusätzliche Bindungsenergie frei. Wichtig ist noch, dass die Reaktion viele Kerne betrifft, damit die Energie auch makroskopische Effekte erzeugen kann.

Eine sich selbst aufrecht erhaltende *Kernspaltungsreaktion* gelingt mit Uran-235 (92 Protonen, 143 Neutronen) oder Plutonium-239 (94 Protonen, 145 Neutronen). Trifft

14 Um den positiv geladenen Kern bewegen sich Elektronen, normalerweise genau so viele, wie Protonen im Kern sind – dann ist das Atom elektrisch neutral. Der Kern trägt fast die gesamte Masse eines Atoms (ein Elektron hat nur etwa 1/2000 der Masse eines Protons oder Neutrons). S. Abschnitt 3.2.2.

ein Neutron auf einen Kern, wird durch dessen Einlagerung zusätzliche Bindungsenergie frei. Die führt bei diesen speziellen Kernen oft zur Spaltung, dabei werden 1-3 weitere Neutronen frei, die dann Nachbarkerne spalten können. Ist genügend Stoff zusammen, kann eine *Kettenreaktion* in etwa einer Mikrosekunde einen erheblichen Anteil der vorhandenen Kerne spalten (Spaltbombe, Genauerer s. Abschnitt 2.2.3).¹⁵

Pro Kern wird bei einer solchen Spaltung etwa 200 MeV Energie freigesetzt. Wieviel Energie ist es, wenn 1 kg Uran-235 vollständig gespalten wird? Wir gehen vor wie oben bei der chemischen Energie (Gl. (56)): Die Masse von $\mu = 1$ mol Uran-235 ist $m = 235$ g; die Stoffmenge von $m = 1000$ g ist also $\mu = 1000 \text{ g} / (235 \text{ g/mol}) = 4,26$ mol. Mit $\Delta E = 200$ MeV für jeden Kern gilt:

$$\begin{aligned} E_{1 \text{ kg U235}} &= \mu \cdot \Delta E = \\ 4,26 \text{ mol} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} / \text{mol} \cdot 200 \cdot 10^6 \text{ eV} &= 5,13 \cdot 10^{32} \text{ eV} = \\ 5,13 \cdot 10^{32} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} &= 8,21 \cdot 10^{13} \text{ J} = 82,1 \text{ TJ}. \end{aligned} \quad (57)$$

Das ist einige Millionen mal mehr als bei der chemischen Umsetzung von 1 kg Materie – vergleichen Sie dies mit Gl. (56).

Die *Kernverschmelzung (Fusion)* gelingt am leichtesten mit den Kernen Wasserstoff-2 (1 Proton, 1 Neutron, auch Deuterium D genannt) und Wasserstoff-3 (1 Proton, 2 Neutronen, auch Tritium T genannt). Bei der Verschmelzung zu Helium-4 (2 Protonen, 2 Neutronen) wird ein weiteres Neutron sowie eine Bindungsenergie-differenz von 17,6 MeV frei. Weil hier Isotope¹⁶ des Wasserstoffs benutzt werden, spricht man bei der Fusionsbombe auch von einer Wasserstoffbombe (Genauerer s. Abschnitt 2.2.3).

Aufgabe 2-21

- a) Berechnen Sie den bei der D-T-Fusion pro Nukleon freiwerdenden Bindungsenergieunterschied ΔE in eV und J.
- b) Berechnen Sie die bei der Fusion von 1 kg D-T-Gemisch (liege in richtigen Anteilen vor) freiwerdende Energie und vergleichen Sie sie mit der aus Spaltung von 1 kg Uran-235.
- c) Berechnen Sie die Spalt- und Fusionsenergien für je 1 kg U-235 bzw. D-T in der Einheit t TNT-Äquivalent (beachten Sie, dass 1 t = 1 Mg = 1.000 kg).

15 Im Kernreaktor fängt man so viele Neutronen ab, dass die Reaktion konstant mit der gewünschten Leistung abläuft.

16 Isotope haben dieselbe Zahl Protonen im Kern, also auch (fast) dieselben chemischen Eigenschaften, unterscheiden sich aber in der Zahl der Neutronen.

Um noch einmal zu verdeutlichen, dass die Energie eine allgemein anwendbare Größe ist, sowie um den starken Sprung zu Nuklearwaffen zu zeigen, vergleicht Tabelle 2-12 die Energiegehalte bzw. -freisetzungen verschiedener Waffentypen.

Tab. 2-12 Energieinhalte verschiedener Waffen

Waffe	Anmerkungen	Energie
Stein, geworfen	$m = 0,3 \text{ kg}$ $v = 20 \text{ m/s}$	60 J
Gewehrsgeschoss	$m = 0,01 \text{ kg}$, $v = 0,5 \text{ km/s}$	1,25 kJ
Antipersonenmine	40 g Sprengstoff	170 kJ
Panzermine	5 kg Sprengstoff	21 MJ
Fliegerbombe	500 kg Sprengstoff	2,1 GJ
Hiroshima-Bombe	Spaltung, $E = 12,5 \text{ kt TNT-Äq.}$	53 TJ
Wasserstoffbombe für Mehrfachgefechtsskopf	Fusion, $E = 500 \text{ kt TNT-Äq.}$	2,1 PJ
große Wasserstoffbombe	Fusion, $E = 20 \text{ Mt TNT-Äq.}$	84 PJ

Aufgabe 2-22

- ▶ a) Bei Kernspaltungswaffen wird in der Regel nicht das gesamte vorhandene Spaltmaterial umgesetzt, weil die Explosion schon einsetzt, während die Kettenreaktion noch läuft. Das Uran oder Plutonium fliegt auseinander, so dass nicht mehr alle Kerne von Neutronen getroffen werden – die Kettenreaktion bricht ab. Berechnen Sie für die Hiroshima-Bombe (Tabelle 2-12) die real umgesetzte Uran-235-Masse und vergleichen Sie sie mit der in der Bombe vorhandenen Menge von 60 kg hochangereicherten Urans-235.
- ▶ b) Die Hiroshima-Bombe (mit 4,1 Mg Masse) wurde von einem großen Bomber B-29 transportiert. Wie viele solche Flugzeuge (Nutzlast 9 Mg) wären nötig gewesen, um dieselbe Sprengenergie in Form von TNT in die Stadt zu bringen?
- ▶ c) Nehmen Sie an, das Uran in der Hiroshima-Bombe habe in zwei Halbkugeln vorgelegen, die zur Auslösung der Kettenreaktion zu einer Kugel zusammengeschossen wurden. Berechnen Sie den Durchmesser D dieser Kugel (Urandichte $\rho_U = m_U/V_U = 18,9 \text{ Mg/m}^3$, Kugelvolumen $V = 4 \pi r^3/3$, r : Radius, $\pi = 3,14$, $D = 2r$).
- ▶ d) Kurz bevor eine Nuklearwaffe explodiert, hat die freigesetzte Energie das Bombenmaterial (einschließlich Gehäuse usw.) verdampft. Dieser heiße, zunächst kleine Feuerball steht dadurch unter hohem Druck und dehnt sich dann schnell aus. Die Druckwelle und seine Wärmestrahlung sind zwei der drei Hauptschadenswirkungen von Kernexplosionen (die dritte ist die radioaktive Strahlung). Schätzen Sie mit Gl. (51) ab, auf welcher Temperatur das heiße Gas anfangs ist. Vernachlässigen Sie die Wärmestrahlung steckende Energie; nehmen Sie an, $m_U = 1 \text{ kg}$ Uran-235 sei gespalten worden, die Bombenmasse sei $m = 1 \text{ Mg}$; benutzen Sie eine für vollständig

ionisiertes Plasma aus einzelnen Atomen und Elektronen bei konstantem Volumen typische spezifische Wärmekapazität $c = 6,0 \text{ kJ}/(\text{kg K})$..

- e) Berechnen Sie für die Fusionsbomben von Tabelle 2-12 die mindestens eingesetzte Menge Deuterium+Tritium (Annahme: vollständige Umsetzung). Geben Sie die entsprechende Menge an für die größte je gezündete Fusionsbombe von $E = 58 \text{ Mt TNT-Äquivalent}$.*

* Real sind die D-T-Massen anders, weil nicht alle Kerne verschmelzen. Ein gewisser Teil der Sprengenergie stammt auch aus der für die Fusionszündung nötigen Spaltexplosion sowie evtl. zusätzlichem Spaltmaterial.

2.1.9 Elektrizität

In der Natur gibt es zwei Sorten elektrischer Ladungen (positiv und negativ genannt), die Kräfte über ein sog. elektrisches Feld aufeinander ausüben. Bewegen sich Ladungen, spricht man von einem *elektrischen Strom*. Elektrischer Strom kann fließen im leeren Raum, in Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern – jeweils unter der Voraussetzung, dass dort bewegliche Ladungsträger vorhanden sind. Einen Stoff, in dem bewegliche Ladungsträger vorhanden sind, die unter der Einwirkung elektrischer Kräfte einen Strom ausbilden können, nennt man Leiter. Das Gegenteil nennt man Nichtleiter oder Isolator. Reines Wasser ist ein Isolator; sind aber darin andere Stoffe, etwa Salz, gelöst, ist Wasser ein Leiter: Die Salzbestandteile trennen sich in positiv bzw. negativ geladene Teile, sog. Ionen.

Bei den Festkörpern sind Glas, Holz, fast alle Kunststoffe Isolatoren, während die Metalle Strom leiten. Ein besonders wichtiger Grenzfall sind die sog. Halbleiter, bei denen der Strom von der Temperatur und kleinen Beimengungen anderer Atome abhängt. Hier kann man durch verschiedenartige Beimengungen Grenzflächen erzeugen, die Strom nur in eine Richtung durchlassen oder wo man den durchfließenden Strom steuern kann.¹⁷

Ein Strom kann nur fließen, wenn es einen sog. geschlossenen *Stromkreis* gibt, d.h. eine ununterbrochene leitende Verbindung zwischen den zwei Anschlüssen einer Spannungsquelle. (Im Innern der Spannungsquelle wird der „Kreis“, der geometrisch beliebige Form haben kann, vollständig geschlossen). Beispiele für gewollte Unterbrechungen sind Schalter und Sicherung. Stromkreise werden in schematisierter Form gezeichnet (Abbildung 2-5).

¹⁷ Solche „Transistoren“ werden in Radios zum Verstärken der schwachen empfangenen Funksignale verwendet. Heutige Computer-Zentraleinheiten wie etwa Intel Core i7 enthalten einige Milliarden Transistoren auf wenigen cm^2 Fläche.

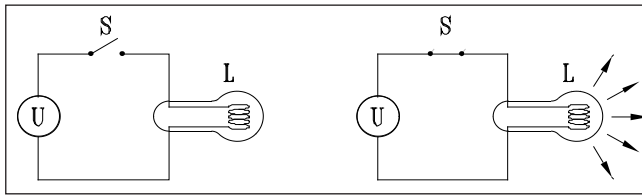


Abb. 2-5 Schemabild eines Stromkreises

Die Spannungsquelle U ist über den Schalter S an die Glühlampe L angeschlossen, der Leiter führt weiter zum zweiten Pol der Spannungsquelle. Bei offenem Schalter (links) kann kein Strom fließen, der Glühdraht bleibt kalt. Bei geschlossenem Schalter (rechts) ist der Stromkreis geschlossen, der Strom heizt den Glühdraht, und die Lampe leuchtet.

Die Stromstärke wird mit I bezeichnet und in Ampere (A) gemessen. Ein Maß für die pro Ladung beim Durchlaufen eines elektrischen Feldes übertragene Energie ist die elektrische Spannung, die mit U bezeichnet wird und in Volt (V) gemessen wird. Eine Batterie stellt eine (etwa) konstante Spannung zur Verfügung, bei einer üblichen Alkali-Mangan-Zelle sind es 1,5 V. Das öffentliche Stromnetz arbeitet mit Wechselstrom, bei dem die Spannung 50 mal pro Sekunde zwischen -325 V und $+325$ V schwankt.

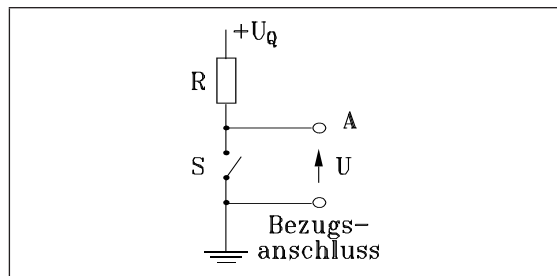
Die Stromstärke I durch einen Verbraucher ist meist proportional zur Spannung U , die an diesem anliegt (Ohmsches Gesetz):

$$I = U / R. \quad (58)$$

die Größe R (resistance) im Nenner nennt man elektrischen Widerstand (gemessen in Ohm = V/A). Andersherum bedingt ein durch R fließender Strom I eine Spannung $U = IR$. Oft wählt man für Spannungsmessungen an einer elektrischen Schaltung einen festen Bezugsanschluss aus. Die Spannung zwischen diesem und einem Punkt an einem Widerstand hängt von der Stromstärke ab (Abbildung 2-6).

Abb. 2-6

Vereinfachtes Schaltbild für die Spannung zwischen einem Bezugspol und einem Punkt A an einem Widerstand R



Die Spannungsquelle ist hier nicht explizit gezeichnet; ihr negativer Pol ist mit dem Bezugsanschluss verbunden, der positive mit dem Anschluss oben. Bei offenem Schalter fließt kein Strom durch den Widerstand, die Spannung über ihm ist Null, die Spannung zwischen dem Ausgangspol A und dem Bezugsanschluss ist U_Q , die der Quelle. Bei geschlossenem Schalter fließt Strom, die volle Spannung liegt über dem Widerstand, die Spannung U zwischen Punkt A und dem Bezugspol fällt auf Null.

Liegt an einem Leiter die Spannung U und fließt ein Strom der Stärke I , wird im Leiter die *elektrische Leistung* P verbraucht (und z. B. in Wärmeleistung umgesetzt). Sie berechnet sich zu:

$$P = UI. \quad (59)$$

Das Ampere und das Volt sind so definiert, dass $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$. Gl. (59) gilt auch für Wechselspannung und –strom, wenn für beide die sog. Effektivwerte genommen werden. Im öffentlichen Netz ist die Effektivspannung 230 V .¹⁸

Aufgabe 2-23

- ▶ a) In einer Taschenlampe seien zwei Alkali-Mangan-Zellen von je $1,5 \text{ V}$ Spannung hintereinandergeschaltet, an der Glühbirne liegt also $U = 3 \text{ V}$. Beim Leuchten betrage der Strom $I = 0,2 \text{ A}$. Wie groß ist die Leistung? Ein Satz Batterien sei nach $t = 6$ Stunden verbraucht. Wie groß ist der Energieinhalt der Batterien?
- ▶ b) Wie groß ist die Stromstärke I_{eff} (Effektivwert) in einer Glühlampe, die am normalen Stromnetz betrieben wird und $P = 60 \text{ W}$ Leistung verbraucht? Wie groß ist die Stromstärke in einer gleich hellen Energiesparlampe mit 12 W ?
- ▶ c) Wie groß darf die Leistung eines Warmwasserbereiters am Netz maximal sein, der über eine 16-A-Sicherung angeschlossen ist?
- ▶ d) Ein großes Kraftwerk stelle eine elektrische Leistung von $P = 1,2 \text{ GW}$ zur Verfügung. Sie werde fiktiv über zwei Anschlüsse in das Hochspannungsnetz geleitet,* bei einer Effektivspannung von $U_{\text{eff}} = 230 \text{ kV}$. Wie hoch ist die Effektivstromstärke I_{eff} in den Anschlussleitungen?

* Real werden drei Anschlüsse verwendet, das Stromnetz arbeitet mit dem so genannten Drehstrom.

2.1.10 Elektromagnetische Wellen, Spektrum

Neben dem elektrischen Feld gibt es auch ein magnetisches, das die Magnetkräfte vermittelt. Wenn sich ein elektrisches Feld zeitlich ändert, wird ein Magnetfeld

18 $U_{\text{eff}} = U_{\text{max}} / \sqrt{2}$, $I_{\text{eff}} = I_{\text{max}} / \sqrt{2}$. Da $\sqrt{2} = 1,414$, ist im Netz bei $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ die Spitzenspannung $U_{\text{max}} = 325 \text{ V}$.

erzeugt und umgekehrt. Die so gekoppelte Erregung breitet sich aus, und zwar mit Lichtgeschwindigkeit, man nennt dies elektromagnetische Wellen. (Das Licht ist nur ein Spezialfall davon, s. u.) Elektromagnetische Wellen werden durch ungleichförmig bewegte elektrische Ladungen erzeugt, also z. B. durch Wechselströme in den sog. Antennen. Wenn eine Größe sich periodisch ändert, also nicht in der Stärke willkürlich schwankt, sondern sich ihr zeitliches Verhalten laufend wiederholt, nennt man die Zeit bis zur ersten Wiederholung die *Periode* T ; die Rate dieser Wiederholungen, also die in einem Zeitraum Δt gezählte Anzahl N der Perioden geteilt durch diese Zeit, heißt *Frequenz* ν (griechisch ν , nicht mit dem kursiv gesetzten v für Geschwindigkeit verwechseln)

$$\nu = N / \Delta t. \quad (60)$$

Wählen wir als Zählzeit nur eine Periode, wird $\Delta t = T$ und die Anzahl ist $N = 1$. Damit gilt:

$$\nu = 1 / T, \quad (61)$$

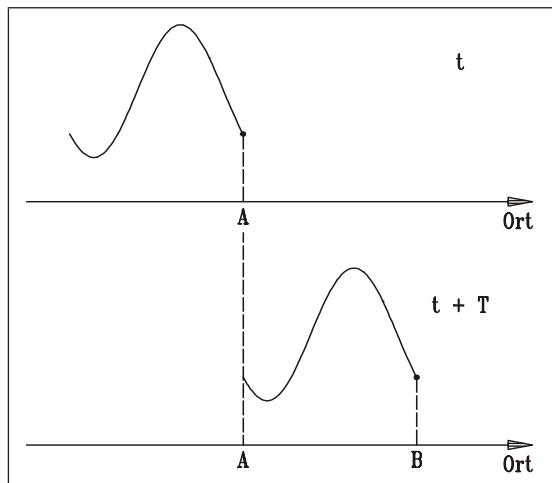
die Frequenz ist also der Kehrwert der Periode. Für die Frequenzeinheit $1/s$ hat man einen eigenen Namen vergeben: Hertz (Hz).

Bei der Ausbreitung einer Welle bewegt sich die periodische Änderung mit einer festen Geschwindigkeit durch den Raum. An einem festen Beobachtungspunkt laufen die jeweiligen Zustände vorbei. Nach einer Periode kommt derselbe Wert der beobachteten Größe wieder vorbei. Der entsprechende Wert der vorigen Periode ist in derselben Zeit um einen bestimmten Weg weitergelaufen (Abbildung 2-7).

Abb. 2-7

Ausbreitung einer periodischen Welle, die nach rechts fortschreitet

An einem Ort A beobachtet man zur Zeit t einen bestimmten Wert der beobachteten Größe. Nach Ablauf einer Periode T ist dieser Wert am Ort B angekommen, eine Wellenlänge λ weiter.



Diesen Weg nennt man die *Wellenlänge* λ (griechisch lambda). Die *Wellengeschwindigkeit* c ist daher

$$c = \Delta s / \Delta t = \lambda / T,$$

(62)

mit Gl. (61) gilt also

$$c = \lambda \cdot \nu$$

(63)

Diese Beziehungen gelten für alle Wellen, egal, ob Wasser-, Schall-, seismische oder elektromagnetische Wellen. Natürlich müssen je die richtigen Wellengeschwindigkeiten verwendet werden. Tabelle 2-13 gibt einige Beispiele an.

Tab. 2-13 Typische Wellengeschwindigkeiten

Wellenart	Wellengeschwindigkeit / (m/s)
Wasserwelle	1 – 3
Schall in Luft	340
seismische Welle in der Erde	(0,1 – 10)·10 ³
elektromagnetische Welle in Vakuum/Luft	3,00·10 ⁸

Tab. 2-14 Bereiche im Spektrum der elektromagnetischen Wellen, Frequenz bzw. Wellenlänge (zu vervollständigen). Die Bereiche für Röntgen- und Gammastrahlung gehen über viele Zehnerpotenzen.

Bereich	typische Frequenz	zugehörige Wellenlänge
Langwelle (Radio)	100 kHz	
Mittelwelle (Radio)	800 kHz	
Kurzwelle (Radio)		30 m
Ultrakurzwelle (Radio)	100 MHz	
Ultrahochfrequenz (Fernsehen, Band IV)	600 MHz	
Mobiltelefon GSM-900	900 MHz	
Radar (L-Band)	1,5 GHz	
Mobiltelefon GSM-1800	1,8 GHz	
Radar (S-Band)	3 GHz	
Radar (X-Band)	10 GHz	
Infrarot		10 mm
Sichtbares Licht (Rot)		800 nm
Sichtbares Licht (Violett)		400 nm
Röntgenstrahlung		10 ⁻¹¹ m
Gammastrahlung		10 ⁻¹² m

Betrachtet man eine zeitlich veränderliche Größe nach der Frequenz aufgelöst, spricht man auch von einem Spektrum. Bei Wellen kann ein Spektrum auch über der Wellenlänge aufgetragen werden. Weil elektromagnetische Wellen besonders wichtig sind, hat man für die verschiedenen Spektrumsbereiche, die besondere Anwendungen haben, eigene Namen vergeben (Tabelle 2-14).

Aufgabe 2-24

- ▶ a) Am 11. Mai 1998 um 10:13:44 h Weltzeit (d.h. Ortszeit bei geographischer Länge 0° , Meridian von Greenwich bei London) zündete Indien bei Pokharan (Nordwestindien) eine unterirdische Nuklearexplosion. Wann kamen die ersten Signale an in folgenden seismischen Stationen des internationalen Überwachungssystems der Teststopporganisation (s. Abschnitte 2.6.4 und 5.5.6.2): Pari (bei Islamabad, Pakistan, PS29), Freyung (Bayrischer Wald, Deutschland, PS19), Pinedale (Wyoming, USA, PS48)? Nehmen Sie stark vereinfacht Ausbreitung mit $c_s = 10 \text{ km/s}$ entlang der Erdoberfläche an und bestimmen Sie die Großkreisentfernungen mittels eines Fadens auf dem Globus (Erdumfang s. Radius und Umfangsformel in Aufgabe 2-4f), bestimmen Sie zunächst den Maßstab $M = d_{\text{Karte}} / d_{\text{Erde}}$, d ist der jeweilige Abstand).
- ▶ b) Wie lange braucht ein Funksignal zwischen einer Bodenstation auf der Erde und einem Satelliten in der sog. geostationären Bahn (genau über dem Äquator in der Höhe 36 Mm, nehmen Sie zur Vereinfachung an, die Station stehe am Äquator senkrecht unter dem Satelliten). Kann die dadurch bedingte Verzögerung beim Telefonieren stören?
- ▶ c) Berechnen Sie die Verzögerung, wenn ein Telefongespräch über ein Transatlantikkabel läuft (schätzen Sie mit Atlas/Globus z. B. den Abstand Frankfurt – Chicago; nehmen Sie an, in dem elektrischen Kabel sei die Wellengeschwindigkeit $c_k = 200.000 \text{ km/s}$).
- ▶ d) Berechnen Sie die in Tabelle 2-14 jeweils fehlenden Größen Frequenz ν oder Wellenlänge λ für elektromagnetische Wellen, die sich in Luft oder im Weltraum ausbreiten; Einheiten nicht vergessen.

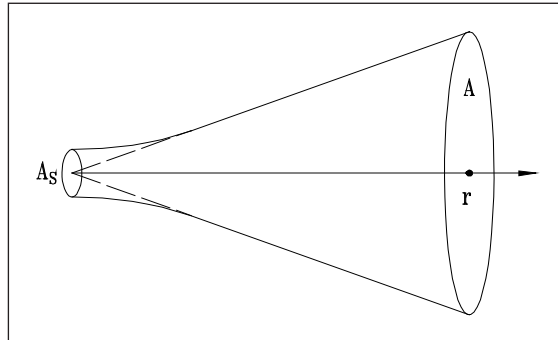
2.1.11 Radio, Radar

Wenn man elektromagnetische Wellen über einen Antennendraht erzeugt, werden sie in alle Richtungen abgestrahlt. *Gebündelte Ausbreitung* ist möglich, wenn man einen Reflektor (oder eine Linse) verwendet und die Wellenlänge λ deutlich kleiner ist als der Reflektor-Durchmesser D . Man betrachtet dann den Reflektor als die Antenne. (Ähnliches gilt umgekehrt beim Empfang, s. Aufgabe 2-25a). Ab einem gewissen Abstand bildet sich ein Strahl mit einem bestimmten Öffnungswinkel

aus, der Radius des bestrahlten Kreises nimmt proportional zur Entfernung zu, und die bestrahlte Fläche steigt mit dem Quadrat der Entfernung (Abbildung 2-8).

Abb. 2-8

Eine Antenne (viel größer als die Wellenlänge) mit Kreisfläche A_s sendet einen Strahl aus, der sich mit der Entfernung r aufweitet. Die bestrahlte Fläche A nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zu, die Bestrahlungsstärke H nimmt entsprechend ab.



Ohne Absorption oder andere Verluste tritt immer dieselbe Leistung durch die mit der Entfernung wachsende Fläche. Man beschreibt das mit der Bestrahlungsstärke E (darf nicht mit der Energie verwechselt werden):

$$E = \Phi / A, \quad (64)$$

also dem Quotienten aus Strahlleistung Φ (griechisches großes Phi, wird oft für Strahlungsleistung anstelle des allgemeinen P verwandt) und bestrahlter Fläche A . Wenn die Sendeantenne der Kreisfläche A_s eine Leistung Φ_s aussendet, gilt für die Bestrahlungsstärke E auf der Achse im Abstand r

$$E = \Phi_s A_s / (\lambda^2 r^2), \quad (65)$$

sie nimmt also in der Tat proportional zu $1/r^2$ ab.¹⁹

19 Die Formel gilt, wenn die Leistung gleichmäßig über die Fläche der Sendeantenne verteilt ist. Wenn sich die ausgestrahlte Leistung zeitlich ändert, gilt die Gleichung für den Zeitpunkt, an dem die ausgesandte Leistung im Abstand r ankommt, also gemäß der Lichtgeschwindigkeit verzögert.

Aufgabe 2-25

- ▶ a) Ein militärischer geostationärer Kommunikationssatellit (also in 36 Mm Höhe über dem Äquator) strahle in Richtung Mitteleuropa, die Sendeleistung sei 5 kW, die Wellenlänge 10 cm, die Sendeantenne habe $D_s = 2r_s = 5$ m Durchmesser. Wie groß ist die Bestrahlungsstärke auf der Erde in der Mitte der bestrahlten Region? (Nehmen Sie für die schräge Entfernung $r = 39$ Mm an, Kreisfläche $A_s = \pi r_s^2$.)
- ▶ b) Wieviel Leistung fängt eine auf einem Fahrzeug montierte Antenne mit $D_s = 80$ cm Durchmesser auf, die auf den Satelliten von a) gerichtet ist?
- ▶ c) Ein militärisches Radarsystem strahle mit einer Antenne von $D_s = 3$ m Durchmesser vom Boden in den Luftraum, die Wellenlänge sei $\lambda = 23$ cm, die Leistung in den Pulsen sei $\Phi_s = 5$ MW. Wieviel Leistung wird von einem Flugzeug im schrägen Abstand $r = 150$ km aufgefangen, wenn die Antenne in seine Richtung zeigt und das Flugzeug eine Projektionsfläche in Strahlrichtung von $A = 10$ m² hat?
- ▶ d) Nach welcher Zeit kommt der Reflex von c) beim Radar an? Folgen daraus Konsequenzen für die Pulsdauer oder die Pulswiederholfrequenz?
- ▶ e) Wie groß ist beim Radar von c) die mittlere Strahlleistung insgesamt, wenn 500 Pulse von je 1 μ s Dauer pro Sekunde ausgesandt werden? Wie viel elektrische Leistung muss der Generator aufbringen, wenn der elektrische Wirkungsgrad des Radars $\eta_e = 40\%$ ist? Wieviel mechanische Leistung muss der Dieselmotor aufbringen, wenn der Generator $\eta_{\text{mech-el}} = 90\%$ mechanisch-elektrischen Wirkungsgrad hat? Wieviel Dieselöl verbraucht der Motor pro Betriebsstunde bei $\eta_{\text{che-mech}} = 25\%$ chemisch-mechanischem Wirkungsgrad?

Mit einem *Radar* (radio detection and ranging) möchte man Gegenstände in gewissem Abstand orten. Die Richtung ergibt sich aus der Stellung der Antenne,²⁰ die Entfernung aus der Zeit, die zwischen Aussendung eines Pulses und Empfang des Reflexes vergeht. Im Folgenden soll die Leistung des Reflexes berechnet werden.

Ein Objekt, das von dem Sendestrahle getroffen wird, ist i.d.R. kleiner als die bestrahlte Fläche. Auf der Strahlachse ist die Bestrahlungsstärke durch (67) gegeben, wir nennen sie hier zur Klarheit E_E ; das Objekt habe die Fläche σ (griechisch sigma, wird üblicherweise für den so genannten Radarquerschnitt verwendet). Es empfängt dann folgende Strahlleistung:

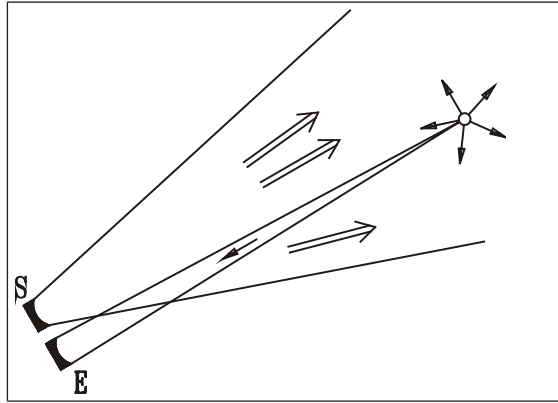
$$\Phi_E = E_E \sigma = \Phi_s A_s \sigma / (\lambda^2 r^2). \quad (66).$$

20 Das geht zunächst nur so genau, wie der Öffnungswinkel des Strahls erlaubt. Bei Mehrfeldantennen kann der Gesamtstrahl durch die Phasen der Einzelstrahlen (kleine zeitliche Verschiebungen) elektronisch in der Richtung gesteuert werden.

Abb. 2-9

Radarsystem mit
getrennten Antennen
für Senden (S) und
Empfangen (E)

Bei einem normalen
Radarsystem sind Sende-
(S) und Empfangsan-
tenne (E) am selben Ort
(manchmal wird nur eine
gemeinsame Antenne für
beide Zwecke verwendet).



Nun nehmen wir an, die empfangene Strahlleistung werde gleichmäßig in alle Raumrichtungen reflektiert.²¹ Vom Zielobjekt bis zurück zum Radar gilt dieselbe Entfernung r ; zum Zeitpunkt, an dem der Reflex dort ankommt, verteilt sich die Leistung Φ_E auf eine Kugel mit diesem Radius, deren Fläche ist $4 \pi r^2$ ist. Somit ist die Bestrahlungsstärke am Radar (s. Abbildung 2-9)

$$E_R = \Phi_E / (4 \pi r^2) = \Phi_S A_S \sigma / (4 \pi \lambda^2 r^4), \quad (67)$$

die aufgefängene Leistung ergibt sich durch Multiplikation mit der Kreisfläche der Empfangsantenne A_E :

$$\Phi_R = E_R A_E = \Phi_S A_S A_E \sigma / (4 \pi \lambda^2 r^4). \quad (68)$$

(Wenn Sende- und Empfangsantenne gleich oder gleich groß sind, mit Fläche A , kann man gleich A^2 für $A_S A_E$ setzen.²²) Dies ist eine elementare Form der sog. *Radargleichung*. Man erkennt, dass die aufgefängene Leistung proportional mit der ausgesandten Leistung, aber quadratisch mit der Antennenfläche, also in der vierten Potenz mit dem Antennendurchmesser steigt. Der letztere ist jedoch für

-
- 21 Normalerweise ändert sich die Stärke des Reflexes mit der Richtung. Das kann mit einer entsprechenden richtungsabhängigen Variation von σ beschrieben werden. Wir betrachten hier nur ein monostatisches Radar, wo Sende- und Empfangsantenne an derselben Stelle stehen.
 - 22 Wenn die Antennen nicht kreisförmig sind, wird die Rechnung komplizierter. Bei Luftüberwachungsradars ist die Antenne z. B. oft viel breiter als hoch, was einen in waagerechter Richtung engen, in senkrechter Richtung breiten Strahl erzeugt, mit dem man nur die Himmelsrichtung zum Flugzeug bestimmen kann, nicht aber den Steigungswinkel dahin. (Wegen der begrenzten möglichen Höhe (0 bis etwa 10 km) und der Erdkrümmung ist letzterer aber auch nicht so wichtig.)

Systeme auf Lkw auf wenige Meter, an Bord von Kampfflugzeugen auf unter 1 m begrenzt. Die Leistung steigt umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Wellenlänge, was für immer kleinere Wellenlängen oder höhere Frequenzen spricht (hier gibt es jedoch Grenzen einerseits durch den jeweiligen technologischen Stand, andererseits durch Absorptionseffekte in der Atmosphäre, dazu kommt die Wellenlängenabhängigkeit des Rückstreuquerschnitts). Die wichtigste Aussage von Gl. (68) ist, dass die aufgefangene Leistung mit der vierten Potenz des Abstands fällt.

Der Radarrückstreuquerschnitt σ ist von der Wellenlänge der Strahlung sowie der Größe, dem Material und der Form des Zielobjekts abhängig sowie davon, wie dieses zum Strahl orientiert ist. Hohe Werte ergeben sich z. B., wenn der Strahl an Rundungen oder in Innenecken in sich selbst reflektiert wird (Abbildung 2-11). Will man bewusst extrem hohe Reflexe in Rückwärtsrichtung erreichen, kann man eine angeschnittene Würfecke aus Metall anbringen, genau wie beim sog. Katzenauge für sichtbares Licht. Solche Radarreflektoren verwendet man z. B. auf Militärflugplätzen zur Markierung der Landebahn oder auf kleinen Sportbooten, die damit auf den Radarschirmen der Berufsschifffahrt auffälliger werden.



Abb. 2-10 Radar des US-Flugabwehrsystems Patriot (links); Weltraumüberwachungsradar Cobra Dane der USA auf der Aleuteninsel Shemya Island (rechts)

Die Antenne hat 29 m Durchmesser. (US-Regierungsfotos, freie Nutzung)

Das Militär möchte hingegen seine Flugzeuge möglichst schlecht entdecken lassen; daher liefen in den letzten 40 Jahren v. a. in den USA intensive Forschungs- und Entwicklungsprogramme zur Verringerung des Radarquerschnitts. Sog. „Tarnkappen-“ (englisch stealth, heimlich) Flugzeuge vermeiden Rundungen und innere Ecken auf der Unterseite und sind mit besonderen, absorbierenden Materialien beschichtet (Abbildung 2-12). So kann es gelingen, den Radarquerschnitt eines

Kampfflugzeugs von z. B. 1 m^2 auf z. B. 10^{-3} m^2 zu verkleinern. (Die genauen Werte sind geheim und hängen von der benutzten Radarwellenlänge ab.)

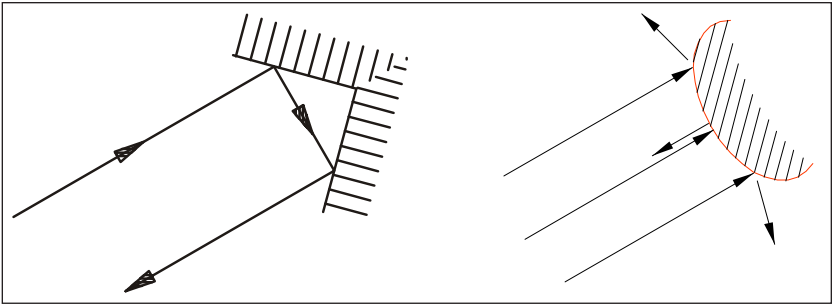


Abb. 2-11 Radarreflektoren

Fällt ein Strahl auf eine konvexe Rundung oder in eine Ecke, kann für einen Teilstrahl die herkömmliche Reflexionsbedingung erfüllt sein, und ein größerer Teil kann zurückreflektiert werden. Bei einer 90° -Ecke wird jeder Strahl in sich selbst reflektiert. In drei Dimensionen verwendet man Würfecken als Radarreflektoren.

Aufgabe 2-26

► a) Das Suchradar eines Luftabwehrsystems arbeite wie das Patriot-System der USA (s. Abbildung 2-10) mit $\Phi_s = 100\text{ kW}$ Pulsleistung bei $\nu = 6\text{ GHz}$ Frequenz, die Sende- und Empfangsantenne habe $D = 2,4\text{ m}$ Durchmesser. Berechnen Sie mit Gl. (68) für ein traditionelles Kampfflugzeug ($\sigma = 1\text{ m}^2$ Radarrückstreuquerschnitt) sowie eines mit stark verringertem Reflex ($\sigma = 0,001\text{ m}^2$) die aus verschiedenen Abständen aufzufangenen Radarleistungen (berechnen Sie dazu A und λ aus den passenden Gleichungen).

Tab. 2-15 Empfangene Radarleistung eines Luftabwehrsystems für Kampfflugzeuge (zu vervollständigen)

r/km	0,1	0,3	1	3	10	30	100	300
$\Phi_{\text{Rrad}}/\text{W}$								
$\Phi_{\text{Rverr}}/\text{W}$								

(in verschiedenen Entfernungen, mit traditionellem sowie verringertem Radarrückstreuquerschnitt)

- b) Ein großes, stationäres Weltraumüberwachungsradar ähnlich dem Cobra Dane der USA (s. Abbildung 2-10) habe $\Phi_s = 15$ MW Pulsleistung bei $\nu = 1,2$ GHz Frequenz, die Sende- und Empfangsantenne von $D = 29$ m Durchmesser sei fest auf der Gebäudeaußenwand montiert (Strahlablenkung elektronisch). Berechnen Sie für einen Satelliten (angenommener Rückstreuequerschnitt $\sigma = 10$ m²) sowie für einen einzelnen Nukleargefechtkopf einer Interkontinental- oder U-Boot-Rakete ($\sigma = 0,01$ m²) die Empfangsleistungen Φ_R für verschiedene Abstände.

Tab. 2-16 Empfangsleistung eines großen Weltraumüberwachungsradars für Satellit und Nukleargefechtkopf in verschiedenen Entfernungen (zu vervollständigen)

r/km	100	300	1.000	3.000	10.000	30.000
Φ_{RSat}/W						
Φ_{RNukl}/W						



Abb. 2-12 Kampfflugzeuge mit verringertem Radarrückstreuequerschnitt, F-117 A Stealth Fighter der USA (links), B-2-Bomber der USA (rechts)

Rundungen und Innenecken werden vermieden bzw. sind nach oben verlegt, die Oberfläche ist mit Radar-absorbierendem Material beschichtet. (US-Regierungsfotos, freie Nutzung)

Wie klein darf die empfangene Leistung sein, damit sie noch nachgewiesen werden kann? Man kann natürlich Verstärker an die Empfangsantenne anschließen, wenn man die Verstärkung aber sehr hoch wählt, wird man am Ausgang des Verstärkers auch ohne empfangene Radarleistung schon ein Signal messen – das liegt am sog. thermischen Rauschen, den Fluktuationen der den Strom tragenden Elektronen in der Antenne bzw. im Verstärkereingang. Diese Fluktuationen werden durch die Wärmebewegung aller Materie verursacht und lassen sich nicht vermeiden, nur

durch Kühlung verringern (was aber für eine große militärische Antenne nicht praktikabel ist). Ihre *Rauschleistung* P_N (noise) kann man aus

$$P_N = k_B T \Delta\nu F_N \quad (69)$$

abschätzen; hier ist $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K die sog. Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur von Antenne bzw. Verstärker. $\Delta\nu$ (griechisch delta-nü), die sog. Bandbreite des Signalverarbeitungssystems, beschreibt, bis zu welcher Frequenz die Änderungen am Eingang erfasst werden – da Reflexe von kleinen Zielen genau so lang andauern wie die ausgesandten Pulse, müssen Leistungsänderungen, die in so kurzer Zeit erfolgen, noch erfasst werden, die Bandbreite sollte also etwa gleich dem Kehrwert der Pulsdauer τ (griechisch tau) sein. Der Rauschfaktor F_N schließlich beschreibt die Abweichung des realen Verstärkers vom idealen, sein Wert ist typisch 3.

Beim Vergleich der empfangenen Strahlungsleistungen mit der Rauschleistung sind schließlich noch zwei weitere Faktoren zu berücksichtigen. Der erste, F_L (loss) beschreibt Verluste verschiedener Art im System, das nie ideale Eigenschaften hat. Er ist im Nenner von Gl. (68) für die reale Empfangsleistung zu ergänzen und beträgt 5 bis 10. Der zweite Faktor $(S/N)_{\text{det}}$ (signal-to-noise ratio for detection) beschreibt, um wieviel eine gemessene Leistungsspitze über der mittleren Rauschleistung nach Gl. (69) liegen muss, damit man sie als durch echt empfangene Radarleistung erzeugt ansieht – das thermische Rauschen ist nicht gleichmäßig stark, sondern hat auch immer wieder Spitzen, allerdings um so seltener, je höher sie sind (Abbildung 2-13).²³ Sein Wert beträgt meist zwischen 10 und 60.

Für die Entscheidung, wann ein Radarreflex vorliegt, kennt man nur das Summensignal (dünne Kurve). Wenn man die Nachweisschwelle hoch legt (Schwelle 1), wird man einige echte Reflexe vernachlässigen (b – Fehlbeurteilung). Legt man sie niedriger (Schwelle 2), wird man mehr echte Reflexe erfassen (b), aber auch ab und zu eine thermisch erzeugte Signalspitze als Radarreflex deuten (c, falscher Alarm).

Die *Reichweite* eines Radarsystems ist der Abstand r_{det} , aus dem die real empfangene Leistung gerade gleich der minimal für Entdeckung nötigen ist:

$$\Phi_R = P_N (S/N)_{\text{det}} \quad (70)$$

Setzt man links Φ_R aus Gl. (68) mal Faktor $1/F_L$ und rechts P_N aus Gl. (69) ein, erhält man:

$$\Phi_S A_S A_E \sigma / (4 \pi \lambda^2 r_{\text{det}}^4 F_L) = k_B T \Delta\nu F_N (S/N)_{\text{det}}, \quad (71)$$

wo nun für den Abstand r die Reichweite r_{det} eingesetzt wurde. Durch Multiplizieren mit r_{det}^4 , Dividieren durch den Ausdruck auf der rechten Seite und schließlich

23 Wenn das Radar über mehrere Pulse summiert, wird der Faktor $(S/N)_{\text{det}}$ kleiner.

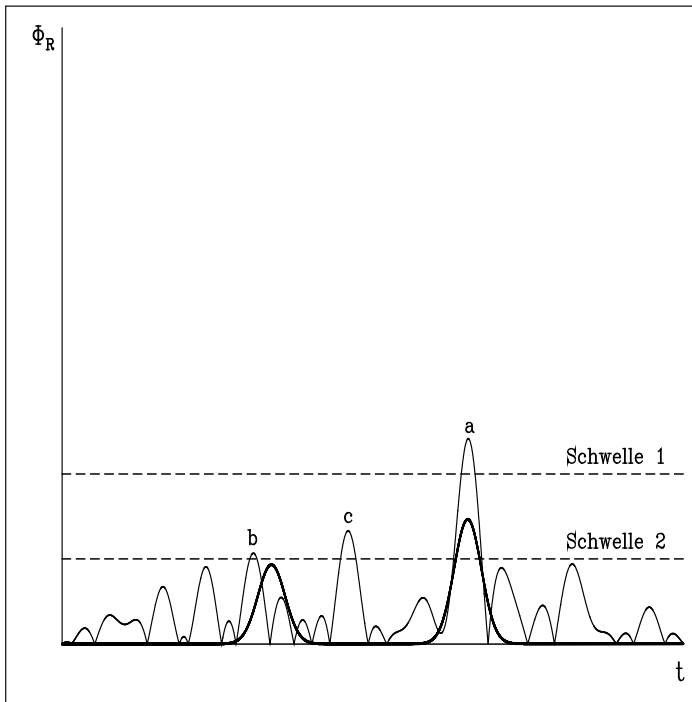


Abb. 2-13 Schema der Entdeckung eines schwachen Radarsignals (dicke Kurve), das sich thermischem Rauschen überlagert

Ziehen der 4. Wurzel (= Potenzieren mit $\frac{1}{4}$) erhält man die endgültige Gleichung für die Reichweite, die man oft als eigentliche Radargleichung bezeichnet:

$$r_{\text{det}} = [\Phi_S A_S A_E \sigma / (4 \pi \lambda^2 F_L k_B T \Delta \nu F_N (S/N)_{\text{det}})]^{1/4}. \quad (72)$$

Man beachte, dass die Zahl in der eckigen Klammer um einen Faktor $10^4 = 10.000$ wachsen muss, will man die Reichweite um einen Faktor 10 erhöhen.²⁴

24 Wenn das Radar einen Winkelbereich absuchen muss, kann man durch Optimierung der Pulszahl pro Richtung erreichen, dass die Suchreichweite etwa proportional zu $\Phi_s^{1/3}$ wird.

Aufgabe 2-27

Benutzen Sie in dieser Aufgabe folgende typischen Werte: Verlustfaktor $F_L = 7$, Temperatur $T = 290 \text{ K}$, Rauschfaktor $F_N = 3$, Nachweisfaktor $(S/N)_{\text{det}} = 20$.

- ▶ a) Das Suchradar des Luftabwehrsystems von Aufgabe 2-26a) strahle in Richtung eines ankommenden Flugzeugs. Die Empfängerbandbreite sei $\Delta\nu = 3 \text{ MHz}$. In welcher Entfernung kann ein traditionelles Kampfflugzeug ($\sigma = 1 \text{ m}^2$ Radarrückstreuquerschnitt) sowie eines mit stark verringertem Reflex ($\sigma = 0,001 \text{ m}^2$) entdeckt werden? Vergleichen Sie das Verhältnis der Radarquerschnitte und das der Entdeckungsreichweiten.
- ▶ b) Berechnen Sie die reale Rauschleistung P_N und suchen Sie für das traditionelle Kampfflugzeug die etwa übereinstimmende Eintragung in Tabelle 2-15 – passt die Entfernung etwa?
- ▶ c) Wie lange braucht das Flugzeug jeweils noch bis zur Radarstellung, wenn es mit doppelter Schallgeschwindigkeit (s. Tabelle 2-13) gerade darauf zu fliegt?
- ▶ d) Der Strahl des Weltraumüberwachungsradars von Aufgabe 2-26b) werde von einem Satelliten (angenommener Rückstreuquerschnitt $\sigma = 10 \text{ m}^2$) sowie einem einzelnen Nukleargefechtkopf einer Interkontinental- oder U-Boot-Rakete ($\sigma = 0,01 \text{ m}^2$) durchquert. In welchem maximalen Abstand können die Ziele bei einer Empfängerbandbreite von $\Delta\nu = 100 \text{ kHz}$ entdeckt werden?
- ▶ e) Berechnen Sie für d) die reale Rauschleistung, suchen Sie für den Nukleargefechtkopf die etwa übereinstimmende Eintragung in Tabelle 2-16 und vergleichen Sie.

2.1.12 Moderne Physik

In den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts zeigten eine Reihe von Messungen Widersprüche zur „klassischen“ Physik (u. a. Newtonsche Mechanik wie in Abschnitt 2.1.7 beschrieben). Diese führten zu grundlegenden Umwälzungen in den Theorien, die durch immer neue Experimente gestützt wurden. Die neuen Theorien führten zu unerwarteten, der Alltagserfahrung widersprechenden Aussagen und hatten Auswirkungen weit über die Physik hinaus, z. B. was die Erkenntnismöglichkeiten angeht. Sie betreffen verschiedene, über die Alltagserfahrung hinausgehende Bereiche:

1. Für sehr hohe Geschwindigkeiten gilt die *spezielle Relativitätstheorie*.
2. Für sehr große Entfernungen oder hohe Massendichten gilt die *allgemeine Relativitätstheorie*.
3. Für sehr kleine Objekte gilt die *Quantentheorie*.

Diese Theorien können hier nicht behandelt werden. Jedoch sollen einige wichtige Aussagen der modernen Physik dargestellt werden.

2.1.12.1 Spezielle Relativitätstheorie

Zunächst gilt das Relativitätsprinzip: In jedem System, das sich gleichförmig bewegt, werden dieselben Naturgesetze beobachtet. Dann gilt das Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit: In allen nicht beschleunigten Systemen wird die gleiche Lichtgeschwindigkeit c beobachtet, unabhängig davon, wie sich Lichtquelle oder Beobachter bewegen.

Daraus folgen dann Effekte, die mit der Alltagserfahrung, wo es um Geschwindigkeiten geht, die klein gegen die des Lichts sind, im Widerspruch zu stehen scheinen, aber in Experimenten vielfach bestätigt werden: Bei schneller Bewegung, von außen betrachtet, läuft die Zeit langsamer, alle Objekte werden in Bewegungsrichtung verkürzt, und sie werden schwerer. Kein Objekt, keine Wirkung kann sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Zwischen Energie E und Masse m besteht Proportionalität, die berühmte Gleichung

$$E = m c^2. \quad (73)$$

Später zeigte sich dann, dass sich gemäß dieser Gleichung Energie in Materie umwandeln kann und umgekehrt.

2.1.12.2 Allgemeine Relativitätstheorie

Hier gilt das Prinzip, dass dieselben Gesetze beobachtet werden sollen, auch wenn ein System beschleunigt bewegt wird. In einem abgeschlossenen Raum kann man nicht feststellen, ob man beschleunigt wird, oder ob man in Ruhe ist und der Schwerkraft einer Masse ausgesetzt ist. Daraus folgt, dass Raum und Zeit in Anwesenheit von Massen oder bei Beschleunigung „gekrümmt“ werden – in der Tat laufen Lichtstrahlen in beiden Fällen längs gebogener Wege. Der dreidimensionale Raum ist in einer vierten Dimension gebogen. Ob er geschlossen ist wie die zweidimensionale Oberfläche einer Kugel in drei Dimensionen, oder flach wie eine Ebene, oder offen wie die Fläche eines (unendlich verlängerten) Sattels, ist eine noch offene kosmologische Frage.

2.1.12.3 Quantentheorie

Elektromagnetische Strahlung, auch wenn sie Wellencharakter hat – der sich z. B. in Überlagerungs- und Auslöschungseffekten zeigt –, besteht aus einzelnen Teilchen, den Photonen. Jedes trägt eine bestimmte Menge Energie E , die zur Frequenz ν der zugehörigen Welle proportional ist

$$E = h \nu. \quad (74)$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/Hz}$ ist die sog. Planck'sche Konstante (oder das Planck'sche Wirkungsquantum). Bei fester Frequenz kommt Strahlungsenergie also nur in Paketen fester Energie, den Photonen, vor. Atome und andere Mikrosysteme haben nur bestimmte erlaubte Energiezustände – wenn sie von einem zu einem anderen übergehen, geben sie ein Photon ab oder nehmen eines auf, das die Energiedifferenz trägt. Der niedrigste Zustand hat nicht die Energie 0, sondern einen gewissen, vom jeweiligen System abhängigen Wert. Gemäß der Quantentheorie können die Elektronen in einem Atom nur bestimmte „Bahnen“ haben (eigentlich sind es nur Aufenthaltswahrscheinlichkeiten, „Elektronenwolken“), die zu „Unterschalen“ und „Schalen“ gehören. In jeder (Unter-)Schale kann nur eine bestimmte Anzahl Elektronen sitzen; wenn eine voll ist, geht das nächste Elektron in die nächsthöhere Schale. Die Elektronen in der äußersten Schale entscheiden über die chemischen Eigenschaften der Atome und damit auch über ihre Verbindungen (s. Abschnitt 3.2.2).²⁵

Aber auch Materieteilchen haben Wellencharakter. Allgemein gilt, dass die Stärke der zugehörigen Welle die Wahrscheinlichkeit angibt, Teilchen der dazugehörigen Art an der entsprechenden Stelle anzutreffen. Das ist alles, was man über die Teilchen wissen kann – wann genau ein Teilchen wo sein wird, ist prinzipiell nicht vorhersehbar.

Aufgabe 2-28

- a) Eine mögliche Reaktion bei der Kernspaltung ist:
 1 Neutron + 1 Uran-235-Kern gehen über in
 1 Krypton-89-Kern + 1 Barium-144-Kern + x Neutronen + Spaltenergie.
 Diese Kerne haben 92, 36 bzw. 56 Protonen und 143, 53 bzw. 88 Neutronen. Stimmt die Protonenbilanz? Berechnen Sie die Anzahl x der auslaufenden Neutronen. Die Massen der Kerne sind $m_{\text{U-235}} = 390,299.6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $m_{\text{Kr-89}} = 147,651.1 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ bzw. $m_{\text{Ba-144}} = 238,989.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Die Masse eines Neutrons ist $m_n = 1,674.9 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Stellen Sie rechts und links die Gesamtmasse zusammen und bestimmen Sie mit Gl. (73) aus der Differenz die frei werdende Kernbindungsenergie. Passt das zum vor Gl. (57) angegebenen Mittelwert der Spaltenergie?
- b) Zu jedem Teilchen der normalen Materie gibt es ein Antiteilchen der sog. Antimaterie. Wenn ein Teilchen auf sein Antiteilchen trifft, z. B. ein normales, negativ geladenes Elektron auf das positiv geladene Positron, vernichten sich die beiden gegenseitig, und die Energie der beiden Massen wird in Form zweier Lichtquanten (genauer: zweier Quanten Gammastrahlung) ausgesandt. Daher kann Antimaterie in einer Welt voller

25 Im Atomkern ist es mit Protonen und Neutronen ähnlich, nur dass dort die gegenseitige Beeinflussung stärker ist.

normaler Materie nicht lang existieren, sondern zerstrahlt sehr schnell mit den getroffenen Partnern. Allerdings kann man in großen Beschleunigern Elementarteilchen so schnell aufeinander stoßen lassen, dass dabei auch Antiteilchen entstehen; es gelingt mit viel Aufwand sogar, sie einzufangen und eine Weile in hohem Vakuum zu halten, ohne dass sie auf normale Materie (im Restgas, in der Wandung) stoßen. Berechnen Sie, wieviel Energie frei werden würde, wenn es gelingen könnte, 0,5 kg Antimaterie zu erzeugen und zu bestimmter Zeit auf 0,5 kg Materie treffen zu lassen. Vergleichen Sie das mit der Energiefreisetzung bei vollständiger Spaltung von 1 kg Uran-235 und der vollständigen Fusion von 0,5 kg Deuterium mit 0,5 kg Tritium (Aufgabe 2-21 c). Warum wäre es unpraktisch, dieses Verfahren für eine nukleare Bombe zu nutzen?

- ▶ c) Röntgenstrahlung entsteht, wenn in einem Atom ein inneres, hochenergetisches Elektron (unter Aufwendung von mindestens dessen Bindungsenergie) herausgeschlagen wird und ein mit wenig Energie gebundenes äußeres Elektron in die Lücke „fällt“ (einen Quantensprung macht). Dabei wird die hohe Bindungsenergie der inneren Elektronenschale frei. Bei einem Sprung von der zweit-innersten auf die innerste Schale des Eisen-56-Atoms beträgt diese Energie $E = 6,40 \text{ keV}$. Berechnen Sie daraus (nach Umrechnung auf J) mit Gl. (74) die Frequenz des Röntgenlichts und seine Wellenlänge.
- ▶ d) Wenn das einzige Elektron eines Wasserstoffatoms von der 3. auf die 2. Schale springt, beobachtet man rotes Licht der Wellenlänge $\lambda = 656,3 \text{ nm}$. Berechnen Sie die Frequenz ν dieses Lichtes. Wie groß ist die Bindungsenergie Differenz E zwischen den beiden Elektronenzuständen?

2.2 Kernwaffen: Voraussetzungen, Funktionsweise und Wirkungen²⁶

2.2.1 Aufbau des Atomkerns, Spaltung, Kettenreaktion

Alle Stoffe bestehen aus *Atomen*. In deren Innern befindet sich ein elektrisch positiver *Kern* (Durchmesser einige Femtometer), er besteht aus zwei Arten sog. Nukleonen: *Protonen* (positiv geladen) und *Neutronen* (neutral). Um den Kern herum verteilen sich *Elektronen* (negativ geladen) in verschiedenen Schalen. Im Normalfall sind es genau so viele Elektronen wie Protonen, das Atom ist elektrisch neutral. Die Wolke der äußeren Elektronen ist einige 0,1 Nanometer groß. Es sind die äußeren Elektronen, die die Bindung mit anderen Atomen ermöglichen und die Art der Bindung festlegen. Die Vielfalt der Stoffe und ihrer Umwandlungen

26 Brode 1968; Glasstone/Dolan 1977; Serber 1992.

folgt daher aus der Anzahl und Anordnung der äußeren Elektronen (Chemie, s. Teilkapitel 3.2). Daher ist die Art eines Atoms letztlich durch die Anzahl positiver Ladungen (Protonen) im Atomkern festgelegt (wenn einmal Elektronen in der Hülle fehlen oder zu viele da sind, wird das meist schnell durch Aufnahme aus der Umgebung oder Abgabe an sie ausgeglichen). Weil Atomkerne zwischen 1 und etwa 110 Protonen haben können (mit höheren Anzahlen sind sie nicht mehr stabil), gibt es nur so viele *Elemente*, d.h. einfache, nicht zusammengesetzte Stoffe, die nur aus Atomen derselben Art bestehen. Das einfachste Atom, Wasserstoff, hat 1 Proton im Kern, man sagt, die *Ordnungszahl* ist 1. 2 Protonen gibt das Element Helium. Bei Sauerstoff ist die Ordnungszahl 8, bei Eisen 26. Für Kernwaffen wichtig sind die schweren Elemente Uran (Ordnungszahl 92) und Plutonium (94).²⁷ Dabei ist die Anzahl der Neutronen im Kern zunächst egal. Kerne mit derselben Protonenzahl, aber verschiedener Anzahl von Neutronen, nennt man *Isotope*. Weil Protonen und Neutronen etwa dieselbe Masse haben, nennt man die Summe der beiden Anzahlen die *Massenzahl* des Isotops und schreibt sie oft hinter den Elementnamen (z. B. Sauerstoff-16).

Atomkerne werden durch eine besondere Kraft zusammengehalten, die sog. starke Wechselwirkung, die zwischen allen Nukleonen wirkt. Andererseits stoßen sich die Protonen, da gleich (positiv) geladen, elektrisch ab. Mit steigender Protonenzahl sind zum Ausgleich immer mehr Neutronen nötig, damit der Kern stabil bleibt – das beginnt bei leichten Kernen mit 1 Neutron für jedes Proton, bei schweren sind es schon 1,5 Neutronen pro Proton. Wenn in einem Kern das Verhältnis von Neutronen zu Protonen zu weit vom Optimum abweicht, ist er *radioaktiv*, er strahlt Teilchen ab. Z. B. kann ein Neutron in ein Proton und ein Elektron (sowie ein sog. Neutrino) zerfallen, und das Elektron wird abgestrahlt (Betastrahlung).²⁸ Schwere Kerne können auch ein Paket aus zwei Protonen und zwei Neutronen – das ist ein Heliumkern – abstrahlen (Alphastrahlung).²⁹ Der verbleibende Kern hat eine um

27 Weil die Masse eines Elektrons mit $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg etwa 2.000 mal so klein ist wie die eines Nukleons (Proton $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg, Neutron $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg), ist die Atommasse im Wesentlichen durch die des Kerns gegeben. Normaler Wasserstoff mit 1 Proton und keinem Neutron im Kern hat die Masse $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg, das Isotop Uran-238 (mit 92 Protonen und 146 Neutronen im Kern) hat die Masse $3,953 \cdot 10^{-25}$ kg.

28 Es kann sich auch ein Proton in ein Neutron, ein Anti-Elektron („Positron“) und ein Neutrino umwandeln. Auch das abgestrahlte Positron nennt man Betastrahlung.

29 Gammastrahlung ist dagegen nicht mit Kernumwandlung verbunden – sie besteht aus Photonen, die ausgesandt werden, wenn ein Kern aus einem höheren in einen niedrigeren Energiezustand übergeht. Die Namen (Alpha-, Beta-, Gammastrahlung) sind bei der Entdeckung geprägt worden, als man den kernphysikalischen Hintergrund noch nicht kannte.

1 erhöhte oder verminderte oder um 2 verminderte Ordnungszahl (Elementumwandlung) und kann auch wieder radioaktiv sein. In der Natur existieren drei sog. natürliche, d.h. spontan ablaufende, Zerfallsreihen, die bei radioaktivem Uran oder Thorium beginnen und über zahlreiche radioaktive Elemente schließlich bei je einem stabilen Bleiisotop enden. Diese Zerfallsreihen sind für die *natürliche Radioaktivität* verantwortlich. Wichtig ist noch, wie schnell ein instabiler Atomkern zerfällt. Das kann man für den einzelnen Kern prinzipiell nicht vorhersagen, nur eine statistische Aussage ist möglich. Man gibt die Halbwertszeit $t_{1/2}$ an, nach der die Anzahl der Ausgangskerne (und damit ihre Radioaktivität) auf die Hälfte gesunken ist. Diese Zeit kann zwischen Millisekunden und Milliarden von Jahren variieren.

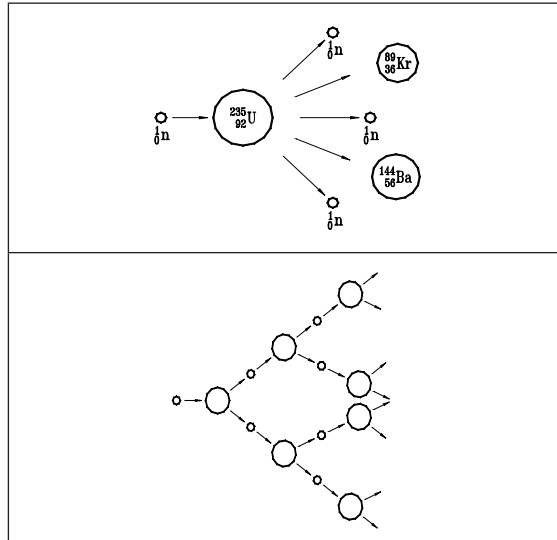
Wie in Abschnitt 2.1.8 ausgeführt, kann man durch Spaltung schwerer Kerne in zwei mittlere die Differenz der Bindungsenergie freisetzen. Während man fast jeden schweren Kern mit Energiezufuhr (z. B. Beschuss mit schnellen Kernteilchen) spalten kann, gibt es nur ganz wenige schwere Isotope, bei denen das ohne Energiezufuhr geht. Das wichtigste solche Isotop ist das Uran-235 (mit 92 Protonen für Uran und 143 Neutronen). Wird es von einem Neutron getroffen, kann sich dieses dem Kern anlagern. Dabei wird Bindungsenergie frei, die den Kern so stark in sich schwingen lässt, dass er in zwei Teile zerreißt (Abbildung 2-14). Die Bruchstücke sind mittlere Kerne, z. B. Krypton-89 mit 36 Protonen und 53 Neutronen (geschrieben als $^{89}_{36}\text{Kr}$) und Barium-144 mit 56 Protonen und 88 Neutronen ($^{144}_{56}\text{Ba}$);³⁰ sie enthalten weniger Neutronen pro Proton als der einzelne schwere Ausgangskern. Daher werden zusätzlich 2 bis 3 Neutronen frei. Wenn diese nun weitere Uran-235-Kerne treffen (und spalten) können, tritt eine *Kettenreaktion* ein (Abbildung 2-15). Der Multiplikationsfaktor k beschreibt, wie die Kettenreaktion voranschreitet. Der Faktor ist das Verhältnis der Anzahl von Neutronen, die weitere Kerne spalten, zur Anzahl den Neutronen vor einer Spaltung. Nun sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- $k > 1$ (größer 1): Die Zahl der Neutronen wächst lawinenartig an (überkritische Anordnung). Dabei kann in kürzester Zeit ungeheuer viel Energie frei werden (s. Abschnitt 2.1.8). Dieser Fall tritt bei einer Kernspaltungswaffe auf (Kilogrammengen Uran-235 setzen in unter $1 \mu\text{s}$ 10^{14} J frei).

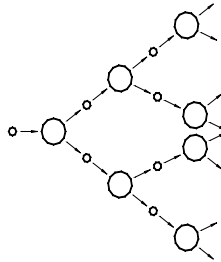
30 Das ist wieder ein statistischer Prozess, und Kerne von Massenzahl 70 bis 160 kommen als Spaltprodukte vor. Meist ist die Spaltung unsymmetrisch – Aufteilung in gleich schwere Spaltprodukte ist relativ selten.

Abb. 2-14

Spaltung von Uran-235
durch ein Neutron

**Abb. 2-15**

Schematische Darstellung
einer Kettenreaktion bei
U-235 (nicht immer lösen
alle 2-3 frei werdenden
Neutronen eine weitere
Spaltung aus)



- $k = 1$ (gleich 1): Im Mittel bewirkt eines der zwei bis drei gebildeten Neutronen eine weitere Kernspaltung, die Leistung (freigesetzte Energie durch Zeit) ist konstant, die Anordnung ist gerade kritisch. So wird die Kettenreaktion im Kernreaktor gesteuert.³¹ Die restlichen Neutronen werden durch Regelstäbe, die aus Neutronen-absorbierenden Stoffen (Bor, Cadmium) bestehen und zwischen die Brennstäbe eingefahren werden, vernichtet.³² Entstehen zu viele Neutronen durch schlechte Regelung mit $k > 1$, kann ein Reaktor „prompt“ überkritisch und nicht mehr regelbar werden. Je nach Typ kann es passieren, dass der Reaktor überhitzt und zerstört wird (wie 1986 der Graphit-moderierte Reaktor in Tschernobyl).³³
- $k < 1$ (kleiner 1): Damit erlischt die Kettenreaktion, unterkritische Bedingungen. Zum Abschalten eines Kernreaktors werden daher die Neutronen absorbie-

31 Beim Anfahren muss k etwas größer als 1 gehalten werden, bis die angestrebte Neutronenrate und Leistung erreicht sind.

32 Ein Teil der Neutronen geht auch nach außen verloren, dieser Effekt ist bei den großen Abmessungen eines Reaktors jedoch viel weniger wichtig als bei einer Bombe.

33 Im Reaktor werden die Neutronen, die aus der Spaltung mit hoher Geschwindigkeit kommen, zunächst abgebremst, „moderiert“. Das geschieht durch Stöße mit leichten Kernen – beim Leichtwasserreaktor v. a. mit dem Wasserstoff des Wassers, bei Graphit mit Kohlenstoff.

renden Regel- oder Bremsstäbe stärker eingefahren. Bei einer Bombe wird die Anordnung unterkritisch, wenn das Spaltmaterial durch den Hitze-erzeugten Druck so weit auseinandergetrieben ist, dass die Neutronen kaum noch Uran-235-Kerne treffen.

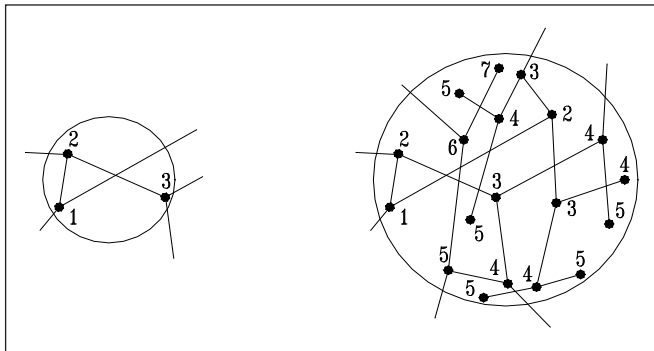


Abb. 2-16 Mögliche Wege der Neutronen beginnend bei einem ersten gespaltenen Kern. Bei einer kleinen (unterkritischen) Masse Spaltstoff fließen mehr Neutronen nach außen ab als neue durch weitere Spaltungen hinzukommen (links). Bei einer größeren (überkritischen) Masse treffen so viele Neutronen noch im Material auf Kerne, dass die Neutronenanzahl laufend wächst (rechts, nur bis zur 5. bis 7. Generation gezeichnet).

Ein wichtiger Begriff ist die *kritische Masse*. Das ist die kleinste Masse eines spaltbaren Materials, in der eine Kettenreaktion aufrechterhalten werden kann. Es gehen ja Neutronen durch Abstrahlung nach außen verloren, und dieser Effekt ist um so stärker, je kleiner die Anordnung ist (Abbildung 2-16). Die kritische Masse beträgt für reine Metalle bei Uran-235 53 kg und bei Plutonium-239 nur 11,5 kg.³⁴ Durch Umhüllung mit Neutronen reflektierendem Material kann die kritische Masse deutlich verringert werden, bei Uran-235 z. B. auf 15 kg, bei Plutonium auf 4 kg.³⁵ Im Kernreaktor eines Kraftwerks (bei nur etwa 4% Uran-235-Gehalt im Urandioxid-Brennstoff) beträgt die kritische Masse einige hundert Tonnen. Fest-

34 Glaser 2006. Das gilt für die günstigste Anordnung, eine Kugel. Andere Formen haben ein kleineres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, so dass relativ mehr Neutronen nach außen verloren gehen und die kritische Masse größer ist.

35 Mit 10 cm Beryllium als Reflektor, Glaser 2006. Durch Kompression des Spaltmaterials – wenn die Neutronen längs desselben Weges mehr Kerne vorfinden – lässt sich die kritische Masse weiter verringern.

zuhalten ist, dass für explosive Kettenreaktionen viele kg an spaltbarem Material benötigt werden.

Aufgabe 2-29

- ▶ a) Experiment: Demonstration einer Kettenreaktion. Besorgen Sie sich möglichst viele Dominosteine. Stellen Sie sie nicht in eine Kette, sondern pyramidenförmig auf – also so, dass jeder Stein beim Umfallen zwei weitere zum Umfallen bringt. Wie viele Steine haben Sie? Wie viele Generationen/Ebenen können Sie aufstellen (Atomkerne bedrängen sich nicht so wie die Steine)*? Stoßen Sie den ersten Stein an. Wie viele Generationen bräuchte man, um so viele Steine zu erfassen, wie Atome in $\mu = 1$ mol Uran-235 sind (das sind $6,02 \cdot 10^{23}$)?
- ▶ b) In Uran-235 (normaler Dichte) kommt ein Spaltneutron im Mittel $\Delta s = 13$ cm weit, bevor es einen weiteren Kern trifft und spaltet. Berechnen Sie aus der mittleren kinetischen Energie der Neutronen von $E_{kin} = 2$ MeV ihre Geschwindigkeit v (benutzen Sie die Neutronenmasse von $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg) und daraus die mittlere Zeit Δt zwischen zwei Spaltungen – das ist auch bei $k = 2$ ungefähr die Zeit für eine Verdopplung der Anzahl gespaltener Kerne. Wie lange dauert es, bis die in a) berechnete Anzahl von Generationen erreicht ist?
- ▶ c) Berechnen Sie den Durchmesser D_{krit} einer gerade kritischen Kugel aus Uran-235 und Plutonium-239 (mit und ohne Reflektor). Benutzen Sie die Metaldichte von $\rho = m/V = 19$ Mg/m³; das Volumen einer Kugel mit Radius $r = D/2$ ist $V_K = 4 \pi r^3 / 3$.

* Der Kerndurchmesser von einigen fm ist 10^{-5} mal der Kernabstand von einigen 0,1 nm im Festkörper. Mit 13 cm Laufweg eines Neutrons wird also anders als bei Dominosteinen kein benachbarter Kern beeinflusst.

2.2.2 Die Vorgänge im Kernreaktor

Da die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen sehr schnell sind, werden sie im Reaktor zunächst mit einem *Moderator* (z. B. Wasser) abgebremst.³⁶ Mit langsamen Neutronen ist die Spaltwahrscheinlichkeit von Uran-235 400 mal so groß wie mit schnellen, und sie werden kaum von Uran-238 eingefangen. Uran-

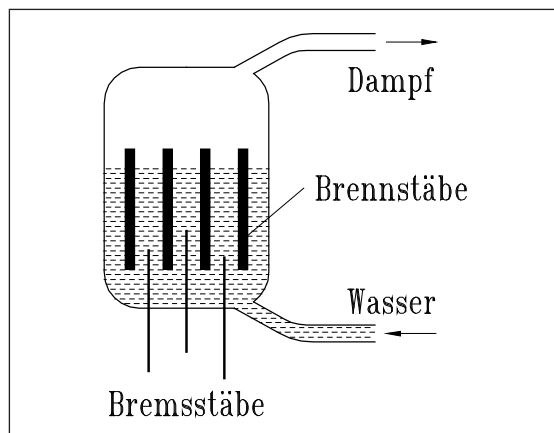
36 Das geschieht durch viele Stöße mit Kernen leichter Atome, die je einen kleinen Teil der Neutronenenergie übernehmen. Am Ende ist die Neutronenenergie von im Mittel 2 MeV auf im Mittel 0,03 eV gefallen, wie es zur umgebenden Temperatur von 400-600 K passt (sog. thermische Neutronen). Als Moderator kommen leichter oder schwerer Wasserstoff (mit Sauerstoff in Wasser gebunden) oder Kohlenstoff in Frage. Moderatorkerne dürfen nicht Neutronen einfangen, wie etwa Bor – solche Elemente werden jedoch zum Abbremsen und Regeln der Reaktion verwendet.

238 ist der Hauptbestandteil von natürlichem Uran (99,3 %), das spaltbare Isotop Uran-235 macht nur 0,7 % aus. Damit ein Reaktor kritisch werden kann, muss bei (normalem, „leichtem“) Wasser als Moderator das Uran-235 auf einen Anteil von etwa 4 % angereichert werden. Das Urandioxid im Reaktor enthält daher zu etwa 96 % Uran-238. In gewissem Maß interagieren die Neutronen auch mit diesem Uranisotop. Aus Uran-238 und einem Neutron entsteht über Uran-239 und ein weiteres Element schließlich das wichtige Plutoniumisotop der Masse 239 (Plutonium Pu: Ordnungszahl 94, also $^{239}_{94}\text{Pu}$ oder Pu-239). Mit dem ebenfalls radioaktiven *Plutonium-239* liegt ein weiterer, jetzt künstlich erzeugter, Spaltstoff vor, der mit langsamen und schnellen Neutronen unter Energiefreisetzung spaltbar ist.³⁷ Man gewinnt ihn aus abgebranntem Kernbrennstoff durch die sog. Wiederaufarbeitung, eine chemische Abtrennung (zu Anreicherung und Wiederaufarbeitung s. Abschnitt 3.9.1).

Abb. 2-17

Schematische Darstellung eines Siedewasserreaktors

Die durch die Spaltungsenergie aufgeheizten Brennstäbe bringen Wasser zum Sieden, der unter hohem Druck stehende Dampf treibt Turbinen an. Die Kettenreaktion wird über Neutronen absorbierende Bremsstäbe gerade kritisch gehalten ($k = 1$).



Die bei der Spaltung freigesetzte Energie geht zum größten Teil an die Spaltkerne mittlerer Masse, sie wird an das umgebende Material als Wärme abgegeben (durch Stöße mit dessen Atomen). Die Wärme kann durch ein Kühlmittel abgeführt werden und z. B. zur Stromerzeugung genutzt werden (zur Energiebilanz s. Abschnitt 2.1.8). Die wichtigsten *Reaktortypen* sind: Leichtwasserreaktoren (mit Wasser als

³⁷ Durch weitere Anlagerung von Neutronen entstehen auch höhere Plutonium-Isotope sowie in kleinen Mengen weitere Transuran-Elemente wie Neptunium, Americium und Curium (s. Periodensystem Abbildung 3-5), die auch alle spaltbar sind.

Moderator und Kühlmittel, Varianten Druck- und Siedewasserreaktor, Abbildung 2-17), Schwerwasserreaktor (mit schwerem Wasser als Moderator), graphitmoderierter Reaktor (mit Wasser als Kühlmittel). Ein besonderer Typ ist der Brutreaktor (Schneller Brüter, spaltet ohne Moderation mit schnellen Neutronen), der gezielt darauf ausgelegt ist, zusätzlich zur Energiegewinnung auch Uran-238 in Plutonium-239 umzuwandeln.³⁸

2.2.3 Die Vorgänge in Kernwaffen

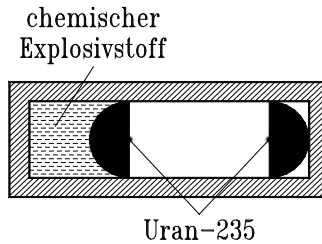
Bei *Kernwaffen* (auch als Nuklearwaffen oder Atomwaffen bezeichnet) kommt die Explosionsenergie aus der *Spaltung schwerer Kerne* oder der *Verschmelzung leichter Kerne*. Kernspaltungsaffen brauchen einen Spaltstoff, also Uran-235 oder Plutonium-239. Diese müssen mit hoher Reinheit vorliegen: Uran-235 über 90% (d.h. schlecht spaltbares Uran-238 <10%), damit die kritische Masse nicht zu groß wird. Wenn neben Plutonium-239 zu viel Plutonium-240 enthalten ist, kann die Bombe zu früh zünden, weil das letztere eine hohe spontane Spaltungsrate hat. Der Spaltstoff wird in unterkritischer Form gehalten und für die Explosion zusammengebracht, so dass dann die kritische Masse überschritten wird. Die ersten Neutronen werden meist von einer speziellen Neutronenquelle zum „Zünden“ geliefert.³⁹ Bei der Uranbombe „Little Boy“, abgeworfen über Hiroshima, wurde ein unterkritischer Uran-235-Körper auf einen zweiten geschossen (*Kanonenrohrverfahren*, Schema Abbildung 2-18, Foto Abbildung 2-19). Zum Einschießen wurde ein chemischer Explosivstoff, ein Treibmittel, verwendet (s. Abschnitt 3.7.2). Die Bombe enthielt etwa 60 kg Uran mit einem mittleren Uran-235-Anteil von 80%. Das Kanonenrohrprinzip wird heute nicht mehr verwendet. Es ist aber so einfach und zuverlässig, dass diese Bombe vor dem Abwurf nicht getestet wurde. Diese Technik ist so einfach, dass sie weder für Staaten noch sub-staatliche Gruppen mit gewisser technischer Kompetenz eine Hürde darstellt – die einzige Hürde ist die Verfügbarkeit des Materials, hoch angereichertes Uran. Daher gibt es internationale Bemühungen, den Umgang damit zu verringern (s. Abschnitt 2.6.3).

38 <http://www.stmugv.bayern.de/de/reaktor/grundlagen/reaktor.htm>. Schnelle Brüter haben besondere Risiken (Unfälle, Atomwaffen-Weiterverbreitung); viele Länder haben Brüterpläne aufgegeben.

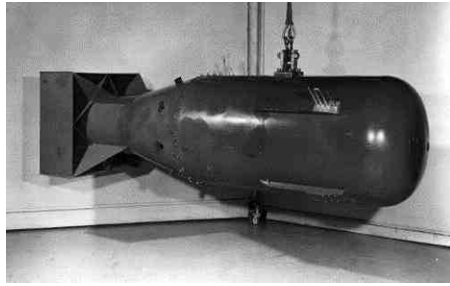
39 Bei den ersten Bomben wurden die Elemente Polonium und Beryllium zum gewünschten Zeitpunkt gemischt; Alphastrahlung aus Polonium erzeugt in einer Reaktion mit einem Berylliumkern ein Neutron. Auch eine „Zündung“ durch spontane Spaltung des Kernmaterials ist möglich.

Abb. 2-18

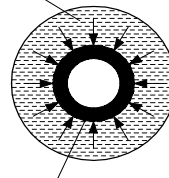
Schema der Kernspaltungsbombe nach dem Kanonenrohrprinzip; real wurde wohl eher ein Zylinder in eine passend ausgebohrte Kugel geschossen.

**Abb. 2-19**

Kopie der Hiroshima-Bombe
Länge 3 m, Durchmesser 0,7 m
(US-Regierungsfoto, freie Nutzung)



chemischer
Explosivstoff



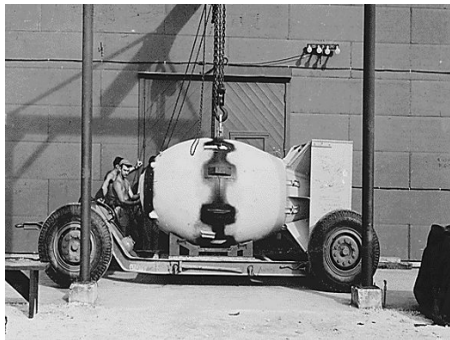
Plutonium-239

Abb. 2-20

Schema der Kernspaltungsbombe nach dem Implosionsprinzip

Abb. 2-21

Die zweite Implosionsbombe vor dem Einsatz in Nagasaki
Länge 2,3 m, Durchmesser 1,5 m
(US-Regierungsfoto, freie Nutzung)



Das Kanonenrohrprinzip funktioniert nicht mit Plutonium, weil das durch seine spontane Spaltung zu viele Neutronen erzeugt. Beim Zusammenschießen der zwei unterkritischen Teile würde die Kettenreaktion zu früh beginnen und die erzeugte Wärmeenergie würde die Anordnung nuklear explodieren lassen, bevor die Teile vereinigt sind, so dass ein großer Anteil der Plutoniumkerne nicht mehr von Neutronen getroffen würde, mit entsprechend geringerer Sprengenergie und Wirkung. Als Ausweg wird der Spaltstoff in Form einer Hohlkugel gehalten, die wegen des Hohlraums unterkritisch ist. Um die Kugel herum ist hochexplosiver Sprengstoff (s. Abschnitt 3.7) angebracht (Schema Abbildung 2-20, Foto Abbildung 2-21). Durch exakt gleichzeitige Zündung des Sprengstoffes von außen wird dessen Druck nach innen gerichtet, der Spaltstoff zur kritischen Masse komprimiert, und die überkritische Kettenreaktion kommt sehr schnell in Gang (*Implosionsverfahren*). Da sich feste und flüssige Stoffe nur extrem schwer komprimieren lassen, muss der Druck auf der ganzen Kugel genau gleich sein, sonst würde der Spaltstoff an einer Stelle geringeren Drucks ausweichen, was zu einer länglich-unregelmäßigen Form führen würde, die zu viele Neutronen nach außen verlieren würde und daher unterkritisch wäre. Die Technik kugelsymmetrischer Implosionen ist sehr komplex und schwierig und bildet daher für die Atombombenentwicklung durch weitere Staaten (erst recht für nicht-staatliche Gruppen) eine große Hürde.

Die auf Nagasaki am 9. August 1945 abgeworfene Bombe „Fat Man“ war vom Implosionstyp, mit Plutonium-239. Wegen der komplizierten Technik wurde dieser Typ am 16. Juli 1945 in einer Wüste in Neu-Mexiko getestet – in der ersten Kernexplosion überhaupt. Weil die Anordnung kleiner und leichter ist, verwenden die Kernwaffenstaaten heute durchgängig das Implosionsverfahren, auch bei Uran-235 als Spaltstoff.

Nach den Abwürfen auf Hiroshima und Nagasaki wurden die Kernspaltungswaffen von USA (mit Großbritannien) und Sowjetunion weiter entwickelt: Neutronenreflektoren wurden eingebaut, die Implosion effektiviert. Ein Hauptziel war, die Masse der Bomben zu verkleinern, damit bei gleicher Nutzlast mehr Sprengenergie ins Ziel gebracht werden konnte.

Ein weiteres Ziel war die Erhöhung der Sprengenergie. Was aus Spaltung freigesetzt werden kann, ist jedoch begrenzt: Wenn man zu viel Spaltstoff verwendet, wird das äußere Material durch den Druck des schon gespaltenen auseinander getrieben. Die Neutronen treffen keine Spaltkerne mehr und die Kettenreaktion kommt zum Erliegen.⁴⁰ Die grundlegende Idee der Waffenphysiker (zunächst in

40 Die stärkste getestete Spaltbombe setzte 500 kt TNT-Äquivalent frei, Cochran et al. 1984.

USA und Sowjetunion) war, die Bindungsenergie zu nutzen, die beim Verschmelzen (der Fusion) kleiner Kerne frei wird, wie auch in den Sternen (s. Abschnitt 2.1.8).

Für eine *Fusionsreaktion*, die eine nennenswerte Menge Stoff erfasst, braucht man keine Kettenreaktion. Vielmehr ist das Ziel, das Fusionsmaterial so weit aufzuheizen, dass schon durch Temperatur-bedingte Stöße genügend oft zwei Verschmelzungspartner so schnell aufeinander treffen, dass sie ihre elektrische Abstoßung überwinden und sich so nahe kommen, dass die anziehenden Kernkräfte einsetzen. Die dann freigesetzte Energie heizt dann auch die Umgebung so weit auf, dass eine sich selbst erhaltende Fusionswelle durch das Material läuft. Die erste Aufheizung ist das Hauptproblem; für eine Fusionsbombe gelingt sie bisher nur mit einer Spaltbombe als erster Stufe.⁴¹ Im Unterschied zur Spaltbombe kann man bei der Fusionsbombe die freigesetzte Energie beliebig erhöhen, wenn man mehr Material verwendet: Die Fusionswelle läuft schneller als die Ausdehnung des schon aufgeheizten Materials.

Die geringste Zündtemperatur ist notwendig, wenn man Kerne von Deuterium (D, Wasserstoff-2) und Tritium (T, Wasserstoff-3) verschmelzen möchte.⁴² Dann reagieren die Kerne nach der Formel



Dies ist die Schreibweise wie bei einer chemischen Formel, s. Gl. (54), nur auf Kerne angewandt. Jeweils links vom Elementsymbol stehen unten die Anzahl der Protonen (die das Element festlegen) und oben die Massenzahl, die Gesamtzahl der Protonen und Neutronen. Das Reaktionsprodukt Helium-4 hat also 2 Protonen und insgesamt 4 Kernteilchen, also 2 Neutronen. Links sind 1+2=3 Neutronen eingesetzt worden, das dritte wird als Einzelnes frei. Die Reaktionsenergie geht in die kinetische Energie der beiden Produkte, die geben sie aber schnell bei Stößen an andere Kerne ab, so dass sich insgesamt die Temperatur des Materials erhöht und immer wieder D- und T-Kerne mit so hohem Schwung aufeinander treffen, dass sie fusionieren.

Abbildung 2-22 zeigt das Grundprinzip einer *Wasserstoffbombe*. Neben oder um einen Spaltsprengsatz wird eine große Menge von Tritium oder Deuterium angeordnet, die durch die Energie der Spaltexplosion auf Zündtemperatur gebracht wird. Über die Jahrzehnte der Bombenforschung und -entwicklung sind an diesem

41 Für einen Fusionsreaktor zur Wärme- und Stromerzeugung werden verschiedene Heiz- und Kompressionsverfahren untersucht. Eine (zu starke) Explosion kann man hier verhindern, indem man die Menge des Fusionsmaterials begrenzt.

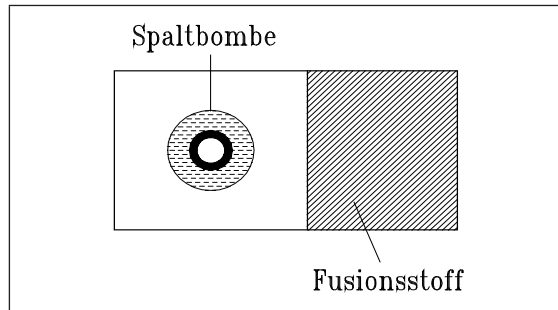
42 Normaler Wasserstoff besteht zu 99,985 % aus leichtem Wasserstoff (${}^1_1\text{H}$) und zu 0,015 % aus Deuterium (${}^2_1\text{H}$). Früher gebildetes Tritium (${}^3_1\text{H}$) ist wegen seiner Halbwertszeit von nur 12,3 Jahren lange zerfallen.

Verfahren eine Reihe Verfeinerungen vorgenommen worden. Anstelle von Deuterium und Tritium, die als Wasserstoffgase nur bei extrem tiefen Temperaturen in genügender Dichte gehalten werden können, verwendet man die chemische Verbindung Lithiumdeuterid (LiD), die fest ist. Das erforderliche Tritium wird durch eine Kernreaktion aus dem Lithium-Kern ${}^6_3\text{Li}$ gebildet, dafür werden die aus der Fusion stammenden Neutronen verwendet:



Abb. 2-22

Schema einer Kernfusions-(Wasserstoff-)bombe



Eine andere Maßnahme war, das Fusionsmaterial noch mit einem Mantel aus Uran-238 zu umgeben, das aus der Anreicherung von Uran-235, s. Abschnitt 3.9.1, in großen Mengen zur Verfügung steht. Es kann durch die hochenergetischen Fusionsneutronen gut gespalten werden⁴³ und liefert dann einen weiteren Beitrag zur Sprengenergie der Bombe – und auch zur Menge an erzeugter Radioaktivität. In heutigen Bomben werden Spalt- und Fusionsprozesse kombiniert; in jahrzehntelanger Arbeit wurde die Energieausbeute erhöht, so dass die zu transportierende Masse verkleinert werden konnte (s. Teilkapitel 2.3). Bei einer Reihe von Typen kann die Sprengenergie in einem weiten Bereich eingestellt werden. Besondere Formen wurden entwickelt, für sog. taktische Kernwaffen etwa solche, die relativ wenig Sprengenergie freisetzen oder besonders viele Neutronen (s. Abschnitt 2.2.3).

Die stärkste je gezündete Wasserstoffbombe setzte 58 Mt TNT-Äquivalent frei. Die größten Bomben in den Arsenalen hatten bis 10 Mt TNT-Äquivalent. Die Zerstörung von Großstädten geht aber effektiver mit mehreren verteilten kleineren

⁴³ Die Spaltneutronen haben Energien zwischen etwa 0,5 und 4 MeV, nur die über 1 MeV können Uran-238 spalten (deren Anteil ist 3/4). Von denen verlieren jedoch 3/4 bei Stößen Energie, so dass sie unter 1 MeV kommen und Uran-238 nicht mehr spalten können.

Bomben.⁴⁴ Wenn man genau genug trifft, reichen diese auch für den Angriff gegen sog. gehärtete Ziele. Daher haben die meisten Nukleargefechtsköpfe heute einige 100 kt TNT-Äquivalent (s. Teilkapitel 2.3, 2.4).

Tab. 2-17 Für Kernwaffen wichtige Isotope mit ihren Eigenschaften und für Reaktoren und Bomben erforderlichen Anreicherungsgraden

Isotop	Mit langsamen Neutronen spaltbar	Mit Spaltneutronen spaltbar	Mit Fusionsneutronen spaltbar	Natürlicher Anteil im Element	Anteil für Schwerwasser-Reaktor	Anteil für Leichtwasser-Reaktor	Anteil für Bombe
U-235	Ja	Ja	Ja	0,007	0,007	0,04	≥0,9
U-238	Nein	Kaum	Ja	0,993	0,993	0,96	<0,1-0,2
Pu-239	Ja	Ja	(Ja)	-	-	0-0,01 ^a	0,9 ^b

U: chemisches Elementsymbol für Uran, Pu: Symbol für Plutonium

a bezogen auf die Gesamtmasse von Uran und Plutonium in sog. Mischoxid-Brennstoff

b bezogen auf das Gesamtplutonium

2.2.4 Wege zu Nuklearwaffen

Die physikalischen (und chemischen) Eigenschaften der Nuklearmaterialien in Tabelle 2-17 legen fest, was ein Land (oder eine sub-staatliche Gruppe) machen muss, um Kernwaffen zu bauen, wobei verschiedene Wege möglich sind (Abbildung 2-23). Daraus folgen je spezifische Schwierigkeiten sowie Möglichkeiten zur Kontrolle. Da reine Fusionsbomben (bisher) nicht funktionieren, ist immer zunächst eine *Spaltbombe* nötig. Wenn diese mit Uran-235 arbeiten soll, muss dessen Anteil im Uran von den natürlichen 0,7 % auf 90 % und darüber angereichert werden. Weil die Uranisotope sich chemisch nicht unterscheiden, können sie nicht mit chemischen Methoden getrennt werden – das geht nur über physikalische Verfahren, die spezielle Anlagen erfordern und viel Energie verbrauchen (s. Teilkapitel 3.9). Die Auslösung der Spaltreaktion ist dann jedoch relativ einfach – man kann das Kanonenrohrprinzip verwenden. Die Hauptschwierigkeit liegt bei der Beschaffung des Materials, des hoch angereicherten Urans. Daher werden dieses sowie

44 Bei Megatonnen-Bomben wird der zur Zerstörung erforderliche Überdruck in einem größeren Bereich überschritten.

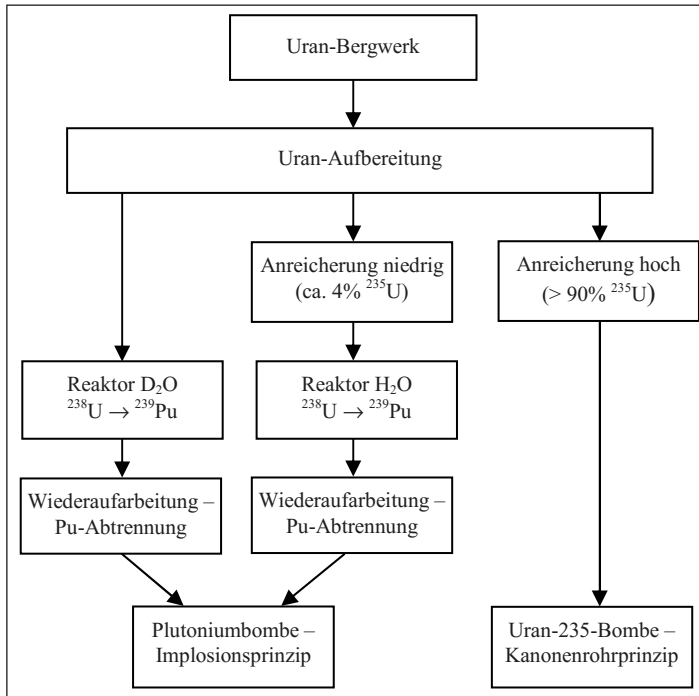


Abb. 2-23 Wege zu Spaltbomben mit Uran-235 oder Plutonium-239

Die Anreicherung geschieht mit gasförmigem Uranhexafluorid; in Reaktoren wird der Spaltstoff i.d.R. als Oxid (Keramik) eingestzt, in Bomben dagegen als reines Metall.

die Anreicherungsanlagen besonderen Begrenzungen und *Kontrollen* durch die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) unterworfen.

Vorgelagert sind die Gewinnung von Uran aus Erz in einem Bergwerk sowie die Aufbereitung (Konversion), die Umwandlung in die Uranverbindung Uranhexafluorid, die schon bei leicht erhöhter Temperatur gasförmig ist – die Anreicherung braucht die verschiedenen Atomsorten von Uran einzeln. Nach der Anreicherung muss das Fluor wieder abgetrennt werden; für eine kleine kritische Masse in der Bombe braucht man reines Uranmetall.

Da das zweite mögliche Spaltmaterial, Plutonium-239, in der Natur nicht vorkommt,⁴⁵ muss man es neu in einem Reaktor erzeugen. Darin bildet zunächst Uran-235 den Spaltstoff.⁴⁶ Ohne Urananreicherung kann man auskommen, also das Uran in der natürlichen Zusammensetzung mit 0,7 % Uran-235 verwenden, wenn man als Moderator schweres Wasser (D_2O , mit Deuterium D statt normalen Wasserstoffs H in H_2O) verwendet. In den meisten Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren wird jedoch normales („leichtes“) Wasser als Moderator und Kühlmittel verwendet. Hierfür muss das Uran-235 von 0,7 % auf etwa 4 % angereichert werden.⁴⁷ In den meisten Reaktoren wird das Uran in Form von Urandioxid (UO_2 , Verbindung mit Sauerstoff, s. Abschnitt 3.9.1) verwendet, das eine stabile Keramik bildet. Durch den Neutronenbeschuss entsteht aus dem zu 96 % vorhandenen Uran-238 langsam Plutonium-239.⁴⁸ Entfernt man die Brennelemente aus dem Reaktor, kann man das Plutonium chemisch vom Uran (und den Spaltprodukten) abtrennen. Diese sog. Wiederaufarbeitung erfolgt chemisch (s. Abschnitt 3.9.1) und ist daher deutlich weniger aufwändig als die Urananreicherung, und Reaktoren sind in vielen Ländern für die Forschung sowie zur Stromproduktion vorhanden. Die Hauptschwierigkeit bei der Plutonium-(Implosions-)Bombe liegt vor allem darin, dass man das Metall schnell sehr gleichmäßig kugelförmig komprimieren muss. Wie die USA würden auch andere Länder das Verfahren erst testen, bevor sie Plutoniumbomben einführen würden, was durch weltweite Überwachung entdeckt werden kann (s. Abschnitt 2.6.4). Zur Kontrolle überwacht die IAEA einerseits den Verbleib der Brennelemente in Forschungs- und Energieproduktionsreaktoren, andererseits die

45 Mit seiner Halbwertszeit von 24.100 Jahren ist das Plutonium-239, das bei Erzeugung der jetzt die Erde bildenden Elemente in Sternen entstand, lange durch seine natürliche Radioaktivität zerfallen (das gilt auch für die anderen Plutoniumisotope). Andererseits sind die Halbwertszeiten von Uran-235 (0,7 Mrd. Jahre) und Uran-238 (4,5 Mrd. Jahre) so lang, dass sie noch in nennenswerten Mengen erhalten sind (das Alter der Erde ist 4,55 Mrd. Jahre). Da der radioaktive Zerfall ein reiner Kerneffekt ist, wird die Halbwertszeit nicht davon beeinflusst, ob die Atome als Element oder in Verbindungen vorliegen.

46 Wenn man Plutonium-239 schon hat und es unter Energiegewinnung vernichten möchte, kann man es zusätzlich in Leichtwasserreaktoren einsetzen. Dann wird es i.d.R. zu etwa 1% in das Uran gemischt (Mischoxidbrennstoff).

47 Der Grund ist, dass normaler Wasserstoff (1_1H) mehr Neutronen absorbiert als schwerer (Deuterium, 2_1H).

48 Lässt man das Plutonium-239 länger im Reaktor, entstehen daraus dann auch die höheren Plutonium-Isotope mit Massenzahlen 240 usw. Auch diese sind in der Bombe nutzbar, führen aber zu verschiedenen Problemen (stärkere Aufheizung, mehr spontane Spaltungen mit höherer Wahrscheinlichkeit für zu frühe Zündung mit geringerer Energieausbeute).

Wiederaufarbeitungsanlagen, drittens die Vorräte an abgetrenntem Plutonium.⁴⁹ Das Problem wird erheblich verschärft, weil früher auch für zivile Kernenergienutzung Plutonium durch Wiederaufarbeitung abgetrennt werden sollte. Erst in den 1970er Jahren verzichteten die USA und andere Länder auf zivile Wiederaufarbeitung, in Frankreich und England wird sie bis heute betrieben.⁵⁰ Schon abgetrennt liegen heute weltweit 270 Mg ziviles Plutonium vor, noch in abgebrannten Brennelementen sind es weitere 2.400 Mg.⁵¹ Weil für eine Bombe nur einige kg nötig sind, besteht hier prinzipiell eine große Gefahr, die Plutoniumlager müssen stark gesichert werden. Für den weiteren Schritt zu Fusionsbomben sind dann zusätzliche Materialien (z. B. überschwerer Wasserstoff Tritium) sowie aufwändige Rechnungen und Tests erforderlich.

Zwischen der zivilen und der militärischen Kernenergienutzung bestehen also enge Beziehungen. Je mehr Elemente der Kette von Uranbergwerk über Anreicherung, Reaktoren und Wiederaufarbeitung ein Land hat, desto mehr Möglichkeiten für heimlichen Bombenbau gibt es und desto intensivere Kontrolle ist nötig. Man kann die Sicherheit vor heimlichen Aktivitäten erhöhen, indem man auf besonders problematische Aktivitäten verzichtet oder sie auf internationale Anlagen beschränkt (s. Abschnitt 2.6.3).

2.2.5 Wirkungen von Kernexplosionen⁵²

Die in der Nuklearexplosion freigesetzte Energie verteilt sich durch verschiedene Prozesse auf im Wesentlichen drei Formen, die auch die drei Hauptzerstörungsarten hervorrufen: Hitzestrahlung, Druckwelle und radioaktive Strahlung (Tabelle 2-18).

49 Diese Überwachung geschieht gemäß des Nichtverbreitungsvertrags in den Staaten, die auf Kernwaffen verzichtet haben. In Kernwaffenstaaten werden auf freiwilliger Grundlage einige zivile Anlagen kontrolliert.

50 Deutschland beendete 1989 die Pläne für eine eigene Anlage, lässt aber in Frankreich und England wiederaufarbeiten.

51 IPFM 2015, Albright et al. 2015.

52 Glasstone/Dolan 1977; Brode 1968. Software zur Berechnung von Explosionseffekten: <http://nuclearweaponarchive.org/Library/Nukesims.html>.

Tab. 2-18 Ungefähre Aufteilung der aus einer Kernexplosion in der Atmosphäre freigesetzten Energie auf Hitzestrahlung, Druckwelle und radioaktive Strahlung⁵³

Energieform	Anteil
Hitzestrahlung	35 %
Druckwelle	50 %
radioaktive Sofortstrahlung	5 %
verzögerte radioaktive Strahlung (Spaltprodukte/Fallout)	10 %

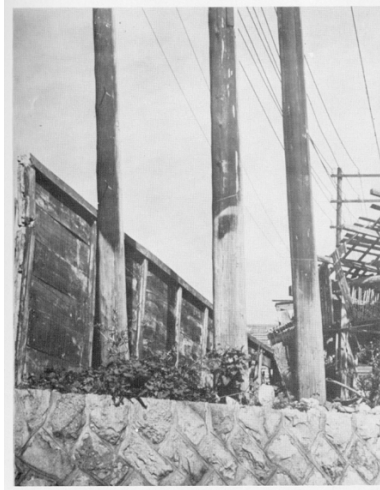
Nach Ende der Spaltkettenreaktion bzw. der Fusionsreaktion ist das Material der Bombe sehr stark aufgeheizt, auf Temperaturen von 10^7 bis 10^8 Grad. Dementsprechend wird viel Wärmestrahlung bei sehr kurzen Wellenlängen abgegeben (das meiste im Röntgenbereich, s. Tabelle 2-14), die Energie ist nach etwa $10\ \mu\text{s}$ abgestrahlt. Diese Strahlung wird in der umgebenden Luft stark absorbiert und wieder abgegeben, ionisiert deren Moleküle und heizt sie so stark auf, dass die Gase selbst abstrahlen. Diese Strahlung ist im Wesentlichen Wärmestrahlung (im infraroten Spektralbereich), auch der sichtbare Anteil ist sehr stark. Nach einigen 100 Mikrosekunden hat dieser Feuerball eine Temperatur von einigen hunderttausend Grad und ist auf viele Dutzend Meter angewachsen. Die *Wärmestrahlung* kann nun die Luft außerhalb des Feuerballs durchdringen und erzeugt den ersten Zerstörungseffekt: Getroffene Lebewesen und Objekte werden außen beginnend verbrannt, brennbare Stoffe werden angezündet – bei Wasserstoffbomben in bis zu über 10 km Entfernung (Abbildung 2-24/2-25).

53 Glasstone/Dolan 1977, 7.

Abb. 2-24

Äußere Verbrennung bei
Holzmasten in Nagasaki
1,9 km vom Hypozentrum
(Bodenpunkt unter dem
Explosionszentrum),
Energie/Fläche 200-250
 kJ/m^2

Der untere Teil war durch
eine Wand abgeschattet,
die durch die folgende
Druckwelle völlig zerstört
wurde. (Quelle: Fig. 7.44b
in Glasstone/Dolan 1977,
US-Regierungsdokument,
freie Nutzung)

**Abb. 2-25**

Hautverbrennungen
an den dunklen Stellen
des zur Explosionszeit
getragenen Kimonos
(Foto: Gonichi Kimura,
mit freundlicher
Genehmigung des
Hiroshima Peace
Memorial Museum)



Aufgabe 2-30

- a) Papier wird entzündet, wenn die Energie der auftreffenden Wärmestrahlung geteilt durch die Fläche bei etwa $E/A = 250 \text{ kJ/m}^2$ liegt, Stoff und Holzwände bei etwa $E/A = 800 \text{ kJ/m}^2$.* Berechnen Sie die Energie durch Fläche für eine Nuklearexplosion mit $E = 20 \text{ kt}$ TNT-Äquivalent Sprengenergie in $r = 2 \text{ km}$ Entfernung sowie eine mit 1 Mt TNT-Äquivalent in 10 km . Nehmen Sie an, die Wärmestrahlungsenergie verteile sich gleichmäßig auf eine Kugeloberfläche (dafür gilt: $A_K = 4 \pi r^2$, wo r der Kugelradius ist) und die Atmosphäre sei extrem klar (keine Verluste durch Streuung oder Absorption in der Luft). Welche Materialien werden sich jeweils entzünden?
- b) Verbrennungen zweiten und dritten Grades treten auf, wenn die Energie durch Fläche 200 bzw. 300 kJ/m^2 überschreitet. Berechnen Sie für eine Sprengenergie von 100 kt TNT-Äquivalent, bis zu welcher Entfernung bei klarer Luft auf exponierter Haut solche Verbrennungen zu erwarten sind.**

* Die Energie/Fläche für die Entzündung hängt von vielen Faktoren ab (Material, Farbe, Feuchtigkeit, auch Sprengenergie – über die Feuerballeigenschaften). Holz kann schon bei 400 kJ/m^2 kurzzeitig an der Oberfläche abbrennen, solange die Strahlung andauert. S. Glasstone/Dolan 1977, 286-296.

** Kleidung kann Wärmestrahlung abschirmen oder durchlassen. Verbrennungen können auch durch aufgeheizte/brennende Kleidung hervorgerufen werden. S. Glasstone/Dolan 1977, 560-570.

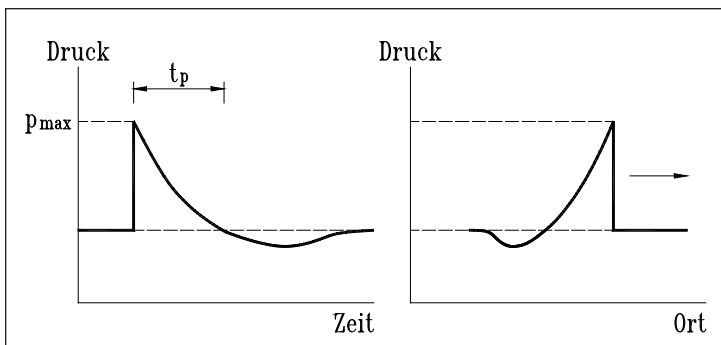


Abb. 2-26 Qualitativer Verlauf des Drucks in einer Stoßwelle

Verlauf mit der Zeit an einem Ort (links); Momentanbild zu einer Zeit in Abhängigkeit vom Ort, während der weiteren Ausbreitung (Pfeil) schwächt sich die Welle ab (rechts). Der Maximaldruck p_{\max} sowie die Dauer des positiven Überdrucks t_p hängen von der Sprengenergie und dem Abstand ab.

Aufgrund der hohen Temperatur stehen die Gase unter hohem Druck – nach etwa 10 ms etwa 30 MPa, d.h. das 300-fache des atmosphärischen Luftdrucks.⁵⁴ Vom Rand des Feuerballs geht eine Explosionsdruckwelle (Stoßwelle) aus, die sich anfangs mit Geschwindigkeiten weit über der Schallgeschwindigkeit ausbreitet.⁵⁵



Abb. 2-27 Unverstärktes Steinhaus vor und nach einem Nukleartest (maximaler Überdruck 35 kPa)

Quelle: Fig. 5.66, 5.67 in Glasstone/Dolan 1977, US-Regierungsdokument, freie Nutzung

54 Druck ist Kraft/Fläche, die Einheit ist $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Der Luftdruck auf Meereshöhe ist 101 kPa (oft als 1010 Hektopascal angegeben, weil 1 Hektopascal etwa gleich der früher benutzten Einheit Millibar ist).

55 Die Geschwindigkeit fällt mit fallendem Maximaldruck.

Die Stoßwelle (Abbildung 2-26) zeigt kurzzeitig einen hohen Überdruck, dort strömt die Luft nach außen. Dann fällt der Druck für deutlich längere Zeit unter den statischen Luftdruck, während dieses Unterdrucks strömt die Luft zurück. Während die Stoßwelle durch die Luft läuft, gibt sie Energie ab und heizt die Luft auf. Daher fällt der Maximaldruck mit dem Abstand r proportional zu $1/r^3$, solange der Überdruck groß gegen den normalen Luftdruck ist (Abbildung 2-28); erst in größerer Entfernung geht die Stoßwelle in eine normale Schallwelle über, die mit der Schallgeschwindigkeit läuft und deren Druckamplitude proportional zu $1/r$ abfällt.⁵⁶

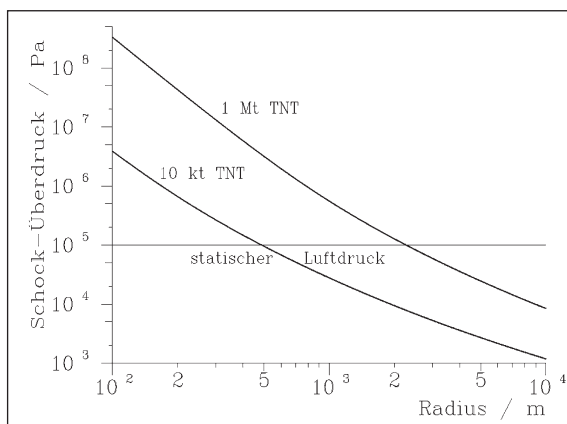


Abb. 2-28 Maximaldruck p_{max} der Stoßwelle in Abhängigkeit vom Abstand für eine Kernexplosion von 10 kt TNT-Äquivalent und 1 Mt TNT-Äquivalent (gezündet in der freien Atmosphäre)⁵⁷

Bei Explosion am Boden erhöht sich der Druck durch die reflektierte Welle wie bei doppelter Sprengenergie. Zum Vergleich ist der statische Druck angegeben, zu dem sich der Überdruck addiert. Schäden an Gebäuden können schon bei Überdruck weit unterhalb des statischen Drucks auftreten. Zur Darstellung über viele Größenordnungen sind beide Achsen logarithmisch verzerrt dargestellt.

56 Schall bedeutet leichte Änderungen des Drucks, die als Welle durch die Luft laufen und sie nicht aufheizen. Die Intensität = Leistung/Fläche (entspricht der Bestrahlungsstärke bei elektromagnetischen Wellen, s. Abschnitt 2.1.11) ist proportional zum Quadrat des Schalldrucks, daher gilt auch für Schallwellen, dass die Intensität bei kugelförmiger Ausbreitung proportional zu $1/r^2$ abfällt (r ist der Abstand von der Quelle). Ohne Absorption im durchlaufenen Medium bleibt die durchlaufende Leistung konstant, wird nur gemäß der Winkelaufweitung auf eine proportional zu r^2 wachsende Fläche verteilt. Demgemäß fällt der Druck proportional zu $1/r$.

57 Berechnet mit Formel (6-3) in Kinney/Graham 1985.

Die *Druckwelle* und die starken Luftströmungen bewirken die zweite Art der Zerstörung: Die auf getroffene Flächen ausgeübten Kräfte können Menschen und Objekte umherschleudern, Gebäude umwerfen usw. (Abbildung 2-27).

Tabelle 2-19 zeigt die Schwellwerte für Verletzungen beim Menschen. Die Druckwelle kann über Lungenriss primäre Todesursache sein. Splitter von Glasscheiben, die noch in großer Entfernung bersten, können als Geschosse Sekundärverletzungen hervorrufen.

Tab. 2-19 Überdruckwerte, ab denen bestimmte Folgen beim Menschen eintreten

Überdruck, Dauer		Wirkung
35-100 kPa		Trommelfellriss
90 kPa bei 400 ms	300 kPa bei 3 ms	Lungenriss
300 kPa bei 400 ms	900 kPa bei 3 ms	Tod

400 ms ist eine typische Überdruckdauer bei einer Wasserstoffbombe (einige 100 kt TNT-Äquivalent in vielen 100 m), 3 ms ist die typische Dauer bei einer konventionellen Sprengung von 1 kg TNT. Der statische Luftdruck in Meereshöhe ist 101 kPa.⁵⁸

Tabelle 2-20 enthält Überdruckwerte mit den zu erwartenden Schäden in städtischen Gebieten.

Tab. 2-20 Überdruckwerte, ab denen bestimmte Auswirkungen in städtischen Gebieten auftreten (der statische Luftdruck in Meereshöhe ist 101 kPa).⁵⁹

Überdruck/kPa	Wirkung
7	Fenster zertrümmert, Verletzungen durch Splitter möglich
20	Wohnhäuser (unverstärkt) schwer beschädigt oder zerstört, zahlreiche Schwerverletzte, vereinzelte Tote
35	Zerstörung von Wohnhäusern und leichten Industriegebäuden, viele Tote
70	Zerstörung der meisten Industriegebäude, Tod fast aller Einwohner
140	Zerstörung von Stahlbetonbauten

⁵⁸ Altmann 2001.
⁵⁹ Glasstone/Dolan 1977: Ch. V; U.S. Congress 1979: 18 f.

Aufgabe 2-31

- ▶ a) Für eine Nuklearexplosion von 1 Mt TNT-Äquivalent bestimmen Sie mit Tabelle 2-20 aus Abbildung 2-28 die Entfernung, bis zu der fast keine Überlebenden erwartet werden sowie die, wo viele Tote erwartet werden (gehen Sie hier von 50% aus) (nehmen Sie Zündung am Boden an, aber vernachlässigen Sie die Reflexion der Druckwelle am Boden). Berechnen Sie die bei einer innerstädtischen Bevölkerungsdichte von nachts $N_{\text{anw}}/A = 5.000/\text{km}^2$, tagsüber im Mittel zehn Mal so viel, die in diesen inneren Kreisen nur durch die Überdruckwelle je zu erwartenden Todesfälle.
- ▶ b) Auf welcher Fläche werden Wohnhäuser weitgehend zerstört?

Die dritte Art von Zerstörung wird durch die *radioaktive Strahlung* hervorgerufen. Zunächst sind das die bei der Spaltung oder Fusion erzeugten Neutronen, dann die Röntgen- und Gammastrahlung aus dem Feuerball. Tödliche Strahledosen reichen bis einige km weit. Weiterhin rufen die Neutronen Reaktionen in den umliegenden Kernen hervor, insbesondere, wenn die Explosion in Bodennähe stattfindet. Zusammen mit den fast ausnahmslos radioaktiven Spaltprodukten werden diese Atome bzw. Staubteilchen mit dem Aufwind der Explosion in die Luft gehoben und dann mit dem Wind weiter verbreitet.

Je nach Teilchengröße und Bedingungen (Regen) fallen die radioaktiven Stoffe in verschiedener Entfernung wieder auf den Boden (sog. Fallout, Abbildung 2-29, Abbildung 2-30), können eingeatmet oder später mit Trinkwasser oder Nahrungsmitteln verzehrt werden. Bei Wasserstoffbomben steigen die radioaktiven Stoffe bis in die obere Atmosphäre (die Stratosphäre, oberhalb etwa 10 km) auf, verteilen sich über die jeweilige (nördliche oder südliche) Erdhälfte und fallen global über viele Jahre aus. Hohe Dosen ergeben die sog. akute Strahlenkrankheit (Tabelle 2-21), die Energiedosis für 50% erwartete Todesfälle beim Menschen ist 4,5 Gray.^{60,61}

-
- 60 Die physikalische Dosis ist absorbierte Energie/betroffene Masse, Einheit Gray = J/kg. Weil verschiedene Strahlenarten unterschiedlich stark schädigen, wird meist die Äquivalentdosis benutzt, für die noch ein Bewertungsfaktor (Beta- und Gammastrahlung 1, Alphastrahlung 20, Neutronen 5-20 abhängig von der Energie) heranmultipliziert wird. Deren Einheit ist Sievert (oft findet man noch die alte Einheit rem, 1 Sv = 100 rem).
- 61 Krieger 2004: 392 ff. Dies ist die letale Dosis LD50/30 für locker ionisierende Strahlung (Bewertungsfaktor = 1) für Tod innerhalb 30 Tagen. Zu LD s. auch Abschnitt 3.8.3.

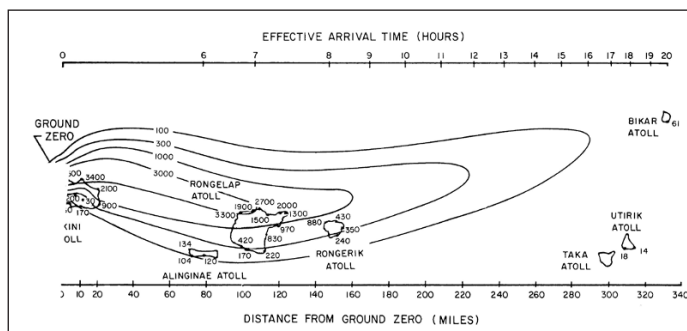


Abb. 2-29 Einzelne Messwerte und geschätzte Konturen der über 96 Stunden akkumulierten Strahlendosis in rad (100 rad = 1 Gray, physikalisch, unbewertet) nach der Explosion einer Wasserstoffbombe von 15 Mt TNT-Äquivalent (BRAVO-Test, 1. März 1954) auf dem Bikini-Atoll in den Marshall-Inseln im Pazifik

Oben ist die Ankunftszeit angegeben. Die kontaminierte Zone war 530 km lang und bis zu 100 km breit (1 mile = 1,60 km). Die Zone, in der Menschen mit 7 Gray (700 rad) in 96 Stunden eine tödliche Dosis bekommen hätten, war 270 km lang und bis zu 55 km breit. (Quelle: Fig. 9.105 in Glasstone/Dolan 1977, US-Regierungsdokument, freie Nutzung)

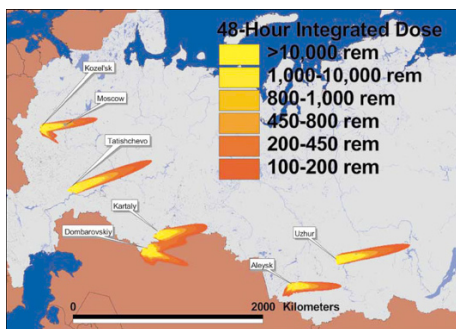


Abb. 2-30 Berechnete Fallout-Verteilung eines US-Angriffs mit 720 Gefechtsköpfen (Summe Sprengenergie 250 Mt TNT-Äquivalent) auf die 360 russischen Interkontinentalraketenstos, typischer Juniwind, über 2 Tage akkumulierte Äquivalentdosen in rem (100 rem = 1 Sievert, tödliche Dosis 500-800 rem = 5-8 Sv) für ungeschützte Bevölkerung

Dieser Angriff auf militärische Ziele würde 16 Millionen Tote erzeugen; wenn der Wind nicht in Richtung Moskau blasen würde, wären es immer noch 3 Millionen.

Quelle: Fig. 4-4 in McKinzie/Cochran/Norris/Arkin 2001, Natural Resources Defense Council, Nachdruck mit freundlicher Genehmigung

Tab. 2-21 Strahlendosen und dadurch erzeugte akute Strahlenwirkungen⁶²

Energiedosis/ Gray	Wirkung
0,25-1	vorübergehende Veränderung des Blutbildes
1-2	Übelkeit, Müdigkeit
2-3	Übelkeit, Erbrechen am 1. Tag. Erholung in 3 Monaten
3-6	Übelkeit, Erbrechen, Durchfall nach wenigen Stunden. Nach 1 Woche Haarausfall, später Fieber, innere Blutungen, Entzündungen, Sepsis, Geschwüre. Ab vierter Woche vermehrt Todesfälle. Bei 4,5 Gy Ganzkörperdosis 50% Tote innerhalb 30 Tagen
6-8	Übelkeit, Erbrechen, Durchfall nach wenigen Stunden. Nach knapp 1 Woche Durchfall, innere Blutungen, Entzündungen, Fieber, Abmagerung, Blutdruckabfall, Verwirrung. Tod meist nach 10 Tagen, ab 15 Tage 100%. Bei 7 Gy Ganzkörperdosis 100 % Tote in 30 Tagen
50-100	akute toxische Wirkungen durch Eiweißzerfall, Störungen des Nervensystems, innere Blutungen. Schock, Kreislaufversagen, Tod
> 100	akute Nervenentzündungen, Nekrosen und Ödeme im Gehirn, Kreislaufkollaps. Tod nach Minuten bis Stunden
um 1000	sofortige Zerstörung des Nervensystems, Tod in Sekunden

Dosen unter 0,5 Sv sind zunächst symptomfrei, erzeugen jedoch Fehler in Zellen, die über längere Zeit zu Krebs führen können; auch Erbschäden und Missbildungen werden erzeugt (s. Abschnitt 4.1.4).⁶³

Aufgabe 2-32

- Die Strahlendosis an einem gegebenen Ort hängt von vielen Faktoren ab, die nur sehr schwer zu erfassen und zu berechnen sind (Explosionshöhe, Wind, Niederschlag, Abnahme der Radioisotope mit kurzer Halbwertszeit, ...). Hier soll nur eine ganz grobe Näherung berechnet werden. Nehmen Sie einen Punkt 30 km vom Ort einer Wasserstoffbomben-Bodenexplosion an. Bei Windgeschwindigkeit 20 km/h beginnt die Strahlung nach 1,5 h. Die Dosisrate sei dann 1 h lang 5 Sv/h, in den weiteren Stunden jeweils 4, 3, 2 und 1 Sv/h. Dann bleibe sie konstant bei 0,5 Sv/h. Wie groß ist die kumulierte Dosis nach 12 h, 24 h? Nach welcher Zeit sind 50 % bzw. (fast) 100 % Strahlentote zu erwarten? Wie schnell müssten die Menschen am Ort evakuiert

⁶² Krieger 2004, 392 ff.

⁶³ Die Strahlenwirkungen der Atombomben in Japan sind weiterhin Gegenstand von Forschung.

werden oder einen Schutzraum aufsuchen, damit fast niemand durch akute Strahlen-
krankheit stirbt?

Die drei Zerstörungsmechanismen wirken zusammen, dazu kommen *sekundäre Wirkungen*. Großflächige Brände wachsen zu einem sog. Feuersturm zusammen. Wasser- und Stromversorgung brechen zusammen, die immense Zahl von Verletzten überfordert jedes Rettungssystem. Mit 12,5 kt TNT-Äquivalent Sprengenergie, gezündet 580 m über Hiroshima, starben sofort etwa 100.000 Menschen, die vorwiegend aus Holzhäusern bestehende Stadt wurde völlig zerstört (Abbildung 2-31).⁶⁴ Für eine 1-Mt-TNT-Wasserstoffbombe, gezündet in 1,8 km Höhe über Detroit, wurden 470.000 Tote und 630.000 Verletzte berechnet (Abbildung 2-32).⁶⁵

Tab. 2-22 Todesraten in Hiroshima am ersten Tag und in den ersten vier Monaten in verschiedenen Zonen⁶⁶

Abstand vom Hypozentrum / km	Todesrate am 6. August 1945 / %	Todesrate bis November 1945 / %
0-0,5	90,4	98,4
0,6-1,0	59,4	90,0
1,1-1,5	19,6	45,5
1,6-2,0	11,1	22,6
Summe	39,8	56,5

64

Committee 1981, S.22, 31, 55, 113. Bis Ende 1945 starben in Hiroshima etwa 140.000 und in Nagasaki etwa 70.000 Menschen. Die durch Druckwelle und Feuer zerstörten Flächen waren etwa 13 km² bzw. 6,7 km².

65

U.S. Congress 1979. Die entsprechenden Zahlen für Leningrad sind 890.000 Tote und 1,26 Millionen Verletzte.

66

Committee 1981, 112.



Abb. 2-31 Hiroshima nach dem Abwurf

Fotos von Shigeo Hayashi, mit freundlicher Genehmigung des Hiroshima Peace Memorial Museum

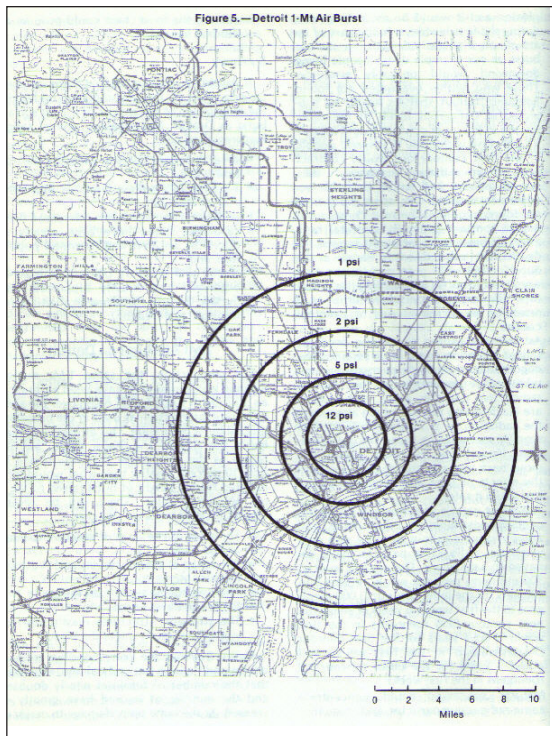


Abb. 2-32 Überdruckkreise einer Wasserstoffbombe von 1 Mt TNT-Äquivalent, gezündet in 1,8 km Höhe über Detroit. 1 bis 12 psi = 7 bis 83 Kilopascal, 1 mile = 1,60 km.

Quelle: Fig. 5 in US Congress 1979, US-Regierungsdokument, freie Nutzung

Es gibt auch Kernwaffeneffekte, die erst in den letzten Jahrzehnten bekannt bzw. erforscht wurden. 1962 fielen bei einer Testexplosion außerhalb der Atmosphäre Stromnetze und elektrische Geräte großflächig aus – als Ursache wurde nach vielen Untersuchungen der sog. *elektromagnetische Puls* (EMP) erkannt, hervorgerufen durch den Strom der durch die Gammastrahlung aus den Luftmolekülen losgeschlagenen Elektronen.⁶⁷ Auf einen weiteren Effekt kamen erst in den 1980er Jahren Klimaforscher: Bei einem großen Nuklearkrieg würden so viel Staub und vor allem Rauch von Bränden in die obere Atmosphäre eingebracht, dass die Sonneneinstrahlung über Monate, eventuell Jahre, massiv verringert würde. Bei diesem sog. *nuklearen Winter* würde sich die untere Atmosphäre abkühlen (um 20-40 Grad), entsprechend würden Ernten ausfallen. Im Ergebnis würden zusätzlich zu den etwa eine Milliarde Toten durch direkte Wirkungen (v. a. auf der nördlichen Erdhalbkugel) weitere Milliarden Menschen erfrieren oder verhungern (auch auf der Südhalbkugel). Die Abschätzungen sind nicht genau genug für Aussagen über die Vernichtung der gesamten Menschheit.⁶⁸

2.3 Nuklearwaffen des Kalten Krieges

2.3.1 Strategische Kernwaffen

Strategische Waffen sind solche, die Bevölkerungszentren, zentrale staatliche Einrichtungen oder Zentren der militärischen Führung angreifen können. Bedingung dafür sind einerseits eine hohe Zerstörungsfähigkeit, andererseits eine große Reichweite. Erstere war vor allem durch die Kernwaffen gegeben, zweitere zunächst durch Bombenflugzeuge, dann durch Raketen. Die ersten Spaltbomben hatten Sprengenergien von einigen 10 kt TNT-Äquivalent. Schon damit konnte ein einziges Flugzeug eine Stadt zerstören, es mussten nicht mehr Hunderte zum Ziel fliegen.

Die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg war gekennzeichnet durch einen qualitativen und quantitativen Rüstungswettlauf zwischen USA und UdSSR vor allem bei den strategischen Waffen. Zunächst ging es um die Erhöhung der Sprenge-

67 Bei einer Explosion in der freien Atmosphäre gleichen sich die elektromagnetischen Felder der kugelförmig nach allen Seiten fließenden Ströme gegenseitig aus. Ein EMP tritt auf, wenn die radioaktive Strahlung von oben auf die Atmosphäre trifft oder wenn die Explosion dicht am Boden stattfindet.

68 Harwell 1984, Crutzen/Hahn 1985.

nergie: Die Wasserstoffbombe erlaubt hundert- bis tausendfache Sprengenergie einer Spaltbombe. Sie ermöglichte die Zerstörung größerer Flächen (Großstädte) oder den Angriff gegen sog. gehärtete militärische Ziele (Bunker, Raketensilos). Sie wurden immer weiter optimiert und an neue Träger angepasst, v. a. Raketen. Parallel wurden die Träger weiter entwickelt. Tabelle 2-23 gibt Eigenschaften einiger strategischer nuklearer Gefechtsköpfe und ihrer Träger an.

Tab. 2-23 Eigenschaften einiger strategischer Nuklearwaffen der USA und ihrer Träger⁶⁹

Hiroshima-Bombe	Uran-235, 12,5 kt TNT-Äquivalent, Länge 3 m, Durchmesser 0,7 m, Masse 4.100 kg Zündung 6. Aug. 1945
Bombe B61	Wasserstoffbombe, 100-500 kt TNT-Äquivalent., Länge 3,6 m, Durchmesser 0,34 m, Masse ca. 330 kg
Bomber B-52	Länge 48 m, Spannweite 56 m, Reichweite bis 11.000 km, Zuladung über 20.000 kg, Geschwindigkeit 600-1.200 km/h
Gefechtskopf Mk21/W87	Wasserstoffbombe in Wiedereintrittskörper, 300-475 kt TNT-Äquivalent, Länge 1,75 m, Basisdurchmesser 0,55 m, Masse ca. 300 kg, 10 waren auf Peacekeeper-Rakete, jetzt 1 auf Minuteman III
Rakete Minuteman III⁷⁰	Länge 18 m, Durchmesser 1,7 m, Startmasse 35.300 kg, Nutzlast ca. 1.100 kg: 3 Gefechtsköpfe, Brennschlussgeschwindigkeit etwa 7 km/s (25.000 km/h), Reichweite 13.000 km; reduziert auf 1 Gefechtskopf

Zum Vergleich ist die Hiroshima-Bombe angegeben.

Abb. 2-33
B-52-Bomber der
USA beim Abwurf
konventioneller Bomben
in den 1960er Jahren
Foto: US Air Force,
freie Nutzung



69 Cochran et al. 1984, Kristensen/Norris 2016.
70 Die erheblich größere Peacekeeper-Rakete (10 Gefechtsköpfe) wurde ab 2002 ausgemustert.

Abb. 2-34

Beladung eines
B-52-Bombers mit
nuklearfähigem
luftgestützten
Marschflugkörper ALCM

Foto: US Air Force,
freie Nutzung

**Abb. 2-35**

Teststart der
Peacekeeper-
Rakete der USA

Foto: US Air Force,
freie Nutzung

**Abb. 2-36**

Peacekeeper-Rakete:
Mehrfachgefechtsköpfe
Mk21/W87 mit Träger
und Hülle

Foto: US Air Force,
freie Nutzung



Abb. 2-37

Strategisches Nuklear-
U-Boot (Ohio-Klasse)
der USA

Foto: US Navy, freie
Nutzung

**Abb. 2-38**

U-Boot der Ohio-Klasse
mit geöffneten
Raketenschächten

Foto: US Navy,
freie Nutzung



Zum Transport der Kernwaffen standen zunächst nur *Bomber* zur Verfügung (Abbildung 2-33, Abbildung 2-34). Sie brauchen einige Stunden bis zum Ziel und können durch Flugabwehr vom Boden aus sowie durch Jagdflugzeuge bekämpft werden. (Dagegen wurden später Marschflugkörper eingeführt, die von entfernten Positionen abgesetzt werden.) Stehen Bomber noch auf dem Flugplatz, können sie relativ einfach zerstört werden. Dies begründete das Szenario eines Überraschungsangriffs auf die Bomberflugplätze, unterstützt durch Abwehr gegen die verbleibenden Flugzeuge. Ein solcher entwaffnender Erstschatlag könnte den zweiten Schlag weitgehend neutralisieren und zu einem Sieg im Atomkrieg führen. Jede Seite versuchte, in die Position des möglichen Siegers zu kommen und die des Verlierers um jeden Preis zu vermeiden. Eine der Maßnahmen war die Einführung von Raketen.

Ballistische Raketen fliegen sehr hoch und sehr schnell und können im Flug praktisch nicht bekämpft werden.⁷¹ Im eigenen Land stationierte *Interkontinental-*

71 Raketen bewegen sich nach der Beschleunigung in der Brennphase ballistisch, d.h. nur der Schwerkraft und – wenn noch oder wieder in der Atmosphäre – den Luftkräften unterworfen. Mit ihrem Schwung steigen sie zunächst auf und fallen dann wieder hi-

raketen (Abbildung 2-35, Abbildung 2-36) verringern die Zeit zum Transport von Nuklearbomben in das gegnerische Land auf etwa eine halbe Stunde. Sie konnten Bomberflugplätze schnell bedrohen, waren aber zunächst nicht genau genug, um Raketen am Startplatz zu zerstören. Als sich das durch größere Zielgenauigkeit (s. Teilkapitel 2.4) zu ändern begann, wurden die Landraketen zum Schutz in unterirdischen Silos untergebracht.

Eine andere Möglichkeit, die Raketen zu schützen, war, sie in Unterseebooten zu stationieren (Abbildung 2-37, Abbildung 2-38). Weil man die U-Boote nicht von oben sehen und nur schwer unter Wasser orten kann, ist ein gezielter Angriff erheblich erschwert. *U-Boot-Raketen* können von Positionen abgeschossen werden, die erheblich näher am gegnerischen Land liegen, daher kann die Flugzeit nur 10–15 Minuten betragen.

Tabelle 2-24 stellt die Grundeigenschaften der verschiedenen Kernwaffenträger dar, die für Aussichten auf erfolgreichen Angriff und für Abschreckung (s. Teilkapitel 2.4) wichtig sind.

Tab. 2-24 Für Angriffserfolg wichtige Eigenschaften strategischer Kernwaffenträger

Träger	typische Flugdauer	vor Start verwundbar?	Abwehr im Flug?
Bomber	4-12 Stunden	am Boden leicht	leicht
Interkontinental-rakete	35 Minuten	in gehärtetem Silo nur bei sehr naher Kern-explosion	extrem schwierig
U-Boot-Rakete	15 Minuten	nicht, so lange U-Boot nicht geortet ist	extrem schwierig

nunter (im Weltraum beschreiben sie eine elliptische Bahn), anders als Flugzeuge, die durch Tragflächen eine Auftriebskraft gegen die Schwerkraft erzeugen und dazu in der unteren Atmosphäre bleiben müssen (bis etwa 15 km Höhe).

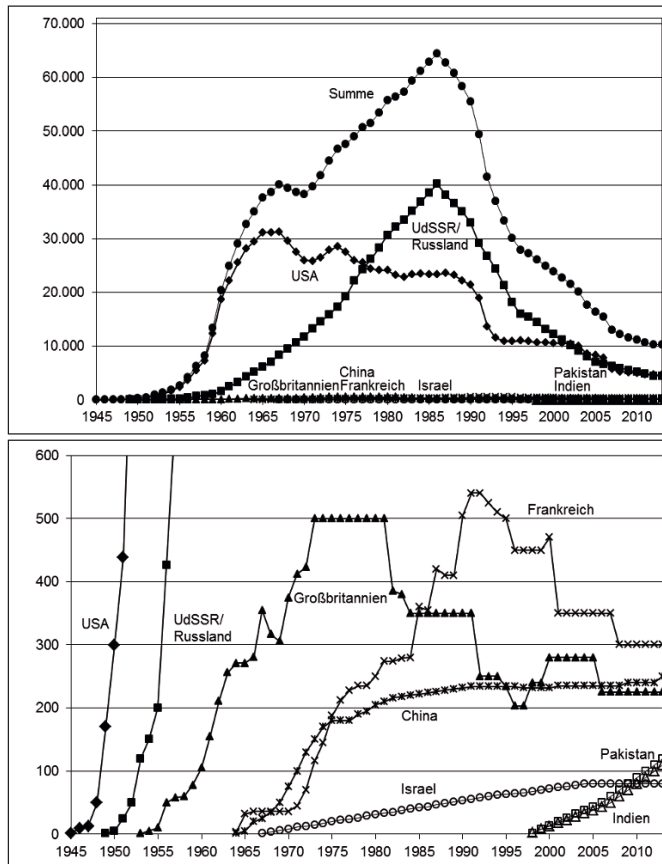


Abb. 2-39 Historische Entwicklung der Sprengkopffzahlen (funktionsfähige Nuklearwaffen) bei den fünf Kernwaffenstaaten des Nichtverbreitungsvertrags sowie drei weiteren (Maßstab bei der unteren Abbildung vergrößert)^{72,73}

In den USA und Russland befinden sich weitere Tausende zur Abrüstung vorgesehene Gefechtsköpfe in Lagern, die Gesamtzahl für 2013 wurde auf 17.000 geschätzt.

72 Wenn die Achsen allgemein verständlich sind, wird bei Funktionsgraphen (s. Abschnitt 2.1.5) einfacher verfahren: I.d.R. wird nur die Einheit angegeben (weiter unten z. B. Mrd. \$ für die Ausgaben an der y-Achse); wenn die Zahlenwerte klar machen, was gemeint ist, wird auch die Einheit weggelassen (hier bei den Jahren – naturwissenschaftlich korrekt müsste an der x-Achse „Zeit/Jahr“ oder „t/a“ stehen).

73 Kristensen/Norris 2013. Nordkorea entwickelt Nuklearwaffen, hat aber wohl noch keine stationiert.

Im Verlauf der gegenseitigen Bedrohung, des Versuchs, einem entwaffnenden Erstschlag zu entgehen, und der Entwicklung neuer Arten von Sprengköpfen und Trägern stiegen die Bestände an Kernwaffen stark an. Dabei waren USA bis etwa 1977 numerisch im Vorteil, dann die Sowjetunion. Erst seit Gorbatschow wurden die Zahlen deutlich verringert (Abbildung 2-39). Während es bei Großbritannien und Frankreich leichte Verringerungen gab, baute Israel sein Arsenal stetig auf; bei Indien und Pakistan dauert der Aufwuchs noch an.

2.3.2 Taktische Kernwaffen

Taktische Waffen sind solche für das Schlachtfeld – sie sollen gegen gegnerische Truppen in relativ kurzer Entfernung eingesetzt werden. Sie werden mit Flugzeugen (Bomben, Abstandsflugkörper) oder mit Kurzstreckenraketen (Reichweite 30-1.000 km) zum Ziel transportiert. Nachdem die Sprengköpfe stark verkleinert worden waren, konnten sie sogar per Artillerie verschossen werden (Kaliber USA zunächst 280, dann 155 und 203 mm, Reichweite 15-30 km, Sprengenergie 0,1 bis über 10 kt TNT-Äquivalent) (Abbildung 2-40). Dabei muss das Militär schon auf die radioaktive Verseuchung der eigenen Truppe achten. Als besondere Entwicklung wurden sog. Atomminen entwickelt, die ggf. sogar von Hand abgelegt werden könnten. Der kleinste solche Sprengkörper hatte eine Masse von 70 kg und eine Sprengenergie von unter 1 kt TNT-Äquivalent.⁷⁴

Mit Sprengenergien von 10 bis vielen Hundert kt TNT-Äquivalent sind die meisten taktischen Nuklearwaffen mit den Bomben von Hiroshima und Nagasaki oder sogar strategischen Waffen vergleichbar. Entsprechend setzen sie erhebliche Mengen an Radioaktivität frei, die mit dem Wind über viele 10 km verfrachtet werden können. Da sie ggf. in größerer Anzahl eingesetzt würden, würden sie ganze Landstriche verseuchen.

Nach 1990 haben die USA ihre taktischen Nuklearwaffen aus der Army (und den Überwasserschiffen der Navy) entfernt, die der Luftwaffe gibt es noch, auch in Europa und Deutschland. Russland hat seine taktischen Nuklearwaffen zurückgezogen, aber weitgehend behalten, v. a. mit dem Argument seiner Schwäche bei konventionellen Streitkräften. Die Systeme der inoffiziellen Nuklearwaffenstaaten würden nach ihrer Reichweite bei den offiziellen Nuklearmächten als taktische zählen, hätten aber im regionalen Zusammenhang vor allem strategische Rollen.

Neutronenbomben sind besondere Wasserstoffbomben, die möglichst wenig radioaktive Spaltprodukte und relativ geringen Überdruck, aber erheblich mehr

74 Cochran et al. 1984, 300 ff.

Neutronenstrahlung erzeugen sollen – auf die Sofortstrahlung entfallen 30-40 % der Sprengenergie gegenüber 5 % sonst (s. Tabelle 2-18).⁷⁵ Durch besonders starke Kompression wird die kritische Masse verkleinert, auf eine Uran-238-Umhüllung verzichtet und so der Spaltanteil auf 0,5-1 kt TNT-Äquivalent begrenzt, die gesamte Sprengenergie beträgt 1-2 kt TNT-Äquivalent. Als Fusionsmaterial wird Tritium direkt verwendet, ohne den Umweg über Lithium.



Abb. 2-40 US-Test 1953: 15-kt-TNT-Artilleriegranate von 280-mm-Kanone abgefeuert
Mit frdl. Genehmigung der National Nuclear Security Administration, Nevada Site Office

Jede Fusionsreaktion nach Gl. (75) erzeugt daher ein Neutron mit 14 MeV Energie.⁷⁶ Die Neutronenstrahlung durchdringt nahezu ungehindert schwere Materialien. Im menschlichen Körper, der zu großen Teilen aus Wasser, also leichten Atomen, besteht, setzen sie dagegen ihre Energie frei. Tödliche Dosen reichen bis über 1 km, wohingegen die Zerstörung an Gebäuden nur bis wenige 100 m zu erwarten ist. In den USA wurden seit 1974 etwa 800 Neutronensprengsätze gebaut. Die

⁷⁵ Cochran et al. 1984, 28 f.

⁷⁶ Von den 17,6 MeV Gesamtenergie gehen 14 MeV als kinetische Energie an das Neutron, der Rest an den Heliumkern.

letzten wurden 1992 verschrottet. Neutronenbomben werden heute noch in der Volksrepublik China vermutet.

Immer wieder wird über „kleine Kernwaffen“ (Jargon: Mini-Nukes) geredet, in jüngerer Zeit vor allem zur Zerstörung unterirdischer und gehärteter Bunker. Dazu sollten besondere Gefechtsköpfe tief in die Erde eindringen. Jedoch sind diesem Eindringen Grenzen gesetzt – mehr als etwa 12 m sind physikalisch nicht möglich. Das erhöht zwar die Einkopplung der Sprengenergie in den Boden, aber es wären mindestens einige kt TNT-Äquivalent erforderlich. D.h. es wird erhebliche Radioaktivität erzeugt, die bei der geringen Zündtiefe zu großen Teilen in die Luft geschleudert und verfrachtet wird – eine wirksame und „saubere“ Zerstörung von tiefen Bunkern ist nicht möglich.⁷⁷ Militärisch-politisch besteht die Gefahr, dass die Grenze zwischen konventionellem und Atomkrieg verwischt wird, deshalb gibt es im US-Kongress starke Gegenkräfte gegen solche Entwicklungen.

2.4 Zielgenauigkeit, Zerstörungswahrscheinlichkeit, Abschreckung, Stabilität

Die Wirkung einer Waffe hängt davon ab, wie gut sie ihr Ziel trifft – quantitativ gesehen, wie nahe sie ihrem Ziel kommt. Dabei sind verschiedene Fälle zu unterscheiden. Eine Gewehrkugel oder ein panzerbrechendes Geschoss verfehlt die Wirkung ganz, wenn sie/es nicht auf das Zielobjekt trifft – am Rand des Ziels springt die Wirkungsfunktion auf Null. Bei anderen Arten von Waffen fällt die Wirkung stetig mit dem Abstand ab. Bei einer explodierenden Granate oder Bombe fällt z. B. der für die Schädigung verantwortliche Explosionsüberdruck mit der dritten Potenz des Abstands vom Explosionszentrum. Bei einer Waffe mit Splitterwirkung (z. B. Handgranate, Mine) verteilen sich die Splitter auf eine Kugelfläche, so dass die Splitterdichte mit dem Quadrat des Abstands abfällt.⁷⁸ Dasselbe gilt für die Wärmestrahlung einer Nuklearbombe. Das Ziel wird immer dann zerstört, d.h. genügend stark geschädigt, wenn der Explosionsüberdruck, die Splitter- oder die Wärmestrahlungsdichte über einem für das jeweilige Ziel geltenden Schwellenwert liegen.⁷⁹ Dieser Abstand wird als *Zerstörungsradius* bezeichnet.

⁷⁷ Nelson 2002.

⁷⁸ Weil die Splitter durch den Luftwiderstand abgebremst werden, ergibt sich zusätzlich ein Maximalradius der Schädigung.

⁷⁹ Genauer betrachtet gibt es ein Spektrum von Schädigungswirkungen, und man muss das Problem statistisch analysieren, wobei auch die Verteilung der Treffer berücksichtigt

Mit *Zielgenauigkeit* einer Waffe meint man die mittlere zu erwartende Abweichung vom Ziel. Sie ist eine statistische Größe und kann einerseits in Versuchen ermittelt werden. Andererseits kann man sie auf der Grundlage theoretischer Überlegungen abschätzen. Dann gehen z. B. ein: Annahmen über die Ungenauigkeit der eigenen und der Zielposition, Annahmen über die Winkelungenauigkeit beim Abschuss (Geschoss) bzw. Brennschluss (Rakete), Annahmen über die Quer- und Längswinde, Annahmen über die Änderung der aerodynamischen Form durch Abbrennen von Material beim Wiedereintritt in die Atmosphäre.

Weil die Wirkung mit dem Abstand fällt, wird daher durch die Militärgeschichte hindurch versucht, die Waffen in die Nähe des Ziels zu transportieren⁸⁰ – das erlaubt einen größeren Wirkungsradius. So erreicht man mit handbetätigten Speeren oder Pfeil und Bogen einige 10 m Reichweite. Kanonen im Mittelalter schossen einige hundert m weit. Die Geschütze des frühen zwanzigsten Jahrhunderts erreichten mit einigen 10 km schon etwa das Maximum dessen, was mit chemischem Explosivstoff als Antrieb möglich ist.⁸¹ Weiter reichende Träger sind erstens Flugzeuge, die zunächst frei fallende Bomben abwarfen. Später wurden Lenkflugkörper, dann auch zielsuchende Bomben eingeführt. Hier war und ist i.d.R. die Flugzeugbesatzung für die Zielgenauigkeit zuständig.

Die zweite Möglichkeit, Waffen über mehr als 100 km Entfernung zu transportieren, sind Raketen, bei denen die Endgeschwindigkeit nicht durch die Geschwindigkeit der Treibgase begrenzt ist. Im Zweiten Weltkrieg erreichte die deutsche V2 mit einer Stufe eine Brennschlussgeschwindigkeit von 1,6 km/s; sie transportierte eine „Nutz“last von 750 kg Sprengstoff über etwa 300 km. Die ersten Kurzstreckenraketen der USA sowie der UdSSR basierten auf der V2, die Besatzungsmächte hatten die deutschen Ingenieure und Techniker „übernommen“. ⁸² Später wurden dann mehrstufige Raketen eingeführt, die um 1960 interkontinentale Reichweiten (5.000 km, Brennschlussgeschwindigkeit 5,5 km/s) erreichten.⁸³ Hier ist die Zielgenauigkeit v. a. durch die Exaktheit von Ort und Geschwindigkeit (Betrag, Richtung)

werden muss.

80 Oder die Waffen vorher zu positionieren und sie erst dann auszulösen, wenn ein Ziel genügend nahe kommt, wie bei See- und Landminen.

81 Die Mündungsgeschwindigkeit eines Geschosses kann nicht höher werden als die Stoßwellengeschwindigkeit im Gas des explodierten Treibstoffs, die etwa bei 2 km/s liegt.

82 Die vom Irak im Golfkrieg verschossenen Raketen waren veränderte Nachbauten der von der Sowjetunion gelieferten Scud-C; die Nuklear-Kurzstreckenrakete Scud-A (130 km Reichweite) war 1961 eingeführt worden. Die USA hatten u. a. Honest John (Einführung 1954, 38 km) und Lance (1972, 125 km).

83 Maximale Reichweiten von Interkontinental- oder U-Boot-Raketen sind 11-15 Mm (s. Tabelle 2-25), die zugehörige Brennschlussgeschwindigkeit ist über 7 km/s.

bei Brennschluss, d.h. am Ende der Beschleunigungsphase, gegeben – danach fällt die Rakete bzw. der Gefechtskopf ja wie eine Geschoss ohne Steuerung nur nach den Gesetzen der Schwerkraft und, nach Wiedereintritt in die Atmosphäre, der Aerodynamik.

Wegen der begrenzten Nutzlast von Raketen (einige Mg) sind sie meist mit Nuklearsprengköpfen bestückt. Die Zielgenauigkeit von Nuklearraketen betrug anfangs um 1 km, was – mit dem Zerstörungsradius von ebenfalls etwa 1 km – für die Zerstörung relevanter Teile von Großstädten, die ja viele km² groß sind, ausreicht. Solche Ziele nennt man *Flächenziele*. Die Zielgenauigkeit passte zur Strategie der (einfachen) *Abschreckung*: Ein Nuklearangriff gegen die eigenen Städte würde mit einem Gegenschlag gegen die Städte des anderen beantwortet (gegenseitige sichere Zerstörungsfähigkeit, englisch mutual assured destruction). Weil der Gegenschlag unvermeidbar ist und unakzeptable Schäden hervorrufen würde, gibt es ein starkes rationales Motiv gegen den ersten Angriff. Es besteht *strategische Stabilität*.

Das wäre anders, könnte man im ersten Schlag die Raketen sowie strategische Führungszentren der anderen Seite weitgehend ausschalten.⁸⁴ Diese Ziele sind jedoch klein und können durch verschiedene Maßnahmen „gehärtet“ werden (unterirdische Silos aus Stahlbeton mit entsprechenden Deckeln, Bunker in der Erde). Man nennt sie *Punktziele*. Der Zerstörungsradius gegen Punktziele kann selbst bei Nuklearwaffen u. U. nur 100 m betragen, so dass die Zerstörungswahrscheinlichkeit – bei Zielgenauigkeiten um 1 km – sehr gering wäre.

Nun ist jedoch über die Jahrzehnte sehr viel Geld aufgewandt worden, um die Zielgenauigkeit von Raketen zu erhöhen. Weil man sich im Atomkrieg nicht auf externe Methoden der Ortsbestimmung verlassen kann,⁸⁵ werden Raketen traditionell mit Trägheitsnavigationssystemen gelenkt (s. Abschnitt 2.1.7). Über die Jahrzehnte wurde deren Genauigkeit erheblich verbessert, von über 1 km mittlerer Zielabweichung in den sechziger Jahren zu etwa 90 m 1985. Dabei wurden die Grenzen der Präzisionsmechanik und -elektronik mit extremem Mitteleinsatz immer weiter hinaus geschoben.

84 Das wäre noch wirksamer, wenn der Gegenschlag der wenigen, den Erstschatz überstehenden Raketen durch Raketenabwehr noch weiter verringert werden könnte. Das ist der Hauptgrund für die destabilisierende Funktion von Raketenabwehrsystemen, wobei ihre real zu erwartenden niedrige Effektivität weniger wichtig ist als die wahrgenommene bzw. die als schlimmstmögliche Annahme zu Grunde gelegte.

85 Funksignale könnten z. B. durch den elektromagnetischen Puls von im Weltraum gezündeten Kernexplosionen gestört sein, oder die Sender könnten zerstört sein.

Tab. 2-25 Ausgewählte strategische Raketen von USA und UdSSR mit ihren wichtigen Eigenschaften

Land	Typ	Art	Einge- führt	Stufen	Gefechtsköpfe, Sprengenergie E / (Mt TNT-Äq.)	Reich- weite/ km	Zielge- nauigkeit CEP / m
USA	Titan II	ICBM	1963	2	1 * 9,0	15.000	1.300
	Minuteman III	ICBM	1970	3	3 * 0,17 → 1 * 0,335	13.000	280
	Peacekeeper	ICBM	1987	3	10 * 0,335	13.000	90
	Polaris (A-3)	SLBM	1964	2	3 * 0,20	4.600	900
	Poseidon (C-3)	SLBM	1971	2	(6-14) * 0,05	4.600	450
	Trident II (D-5)	SLBM	1988	3	14 * 0,15	11.000	120
UdSSR	UR-100 (SS-11 Mod 1)	ICBM	1966	2	1 * 1,0	10.500	1.400
	RS-20 (SS-18 Mod 4)	ICBM	1979	2	10 * 0,55	11.000	190-260
	RT-23 (SS-24 Mod 1)	ICBM	1987	3	10 * (0,1-0,55)	10.000	200
	R-21 (SS-N-5)	SLBM	1964	1	1 * 1,0	1.400	2.800
	R-29R (SS-N-18)	SLBM	1978	2	7 * 0,2	8.300	1.400
	RSM-54 (SS-N-23M1)	SLBM	2007		4 * 0,1		

Die meisten Angaben sind von Mitte der 1980er Jahre, Varianten sind weggelassen; einige Modelle sind schon ausgemustert bzw. abgerüstet, andere wurden auf 1 Gefechtskopf umgestellt. Bei den sowjetischen Raketen sind die USA-Bezeichnungen in Klammern angegeben. CEP: Circular Error Probable, ICBM: Intercontinental Ballistic Missile, SLBM: Sea-Launched Ballistic Missile.⁸⁶

Sobald die Zielgenauigkeit besser wurde, wurden auf beiden Seiten Szenarien von Angriffen gegen Raketen in ihren Silos analysiert. Um deren Verwundbarkeit zu verringern, erhöhten die USA und die UdSSR – parallel zur Steigerung der Zielgenauigkeit – die Härtung ihrer Silos. Eine statistische Modellrechnung führt zu einer Maßzahl für die Hartzielzerstörungsfähigkeit einer Nuklearwaffe, dem *K*-(kill-)Faktor

$$K = (E/Mt \text{ TNT-Äq.})^{2/3} / (CEP/sm)^2;$$

(77)

hier sind *E* die Sprengenergie und *CEP* (circular error probable) die Zielgenauigkeit. Damit *K* eine reine Zahl wird, werden hier die Größen durch die entsprechenden Einheiten geteilt. Traditionell wird bei Navigationsaufgaben in Seemeilen (sm)

86 Craig/Jungerman 1986; Schroeer 1984; Cochran et al. 1984, 1989; Podvig 2001, Kristensen/Norris 2016a.

gerechnet.⁸⁷ Wie man sieht, geht die Energie erheblich schwächer ein als die Zielgenauigkeit (Potenz 2/3 gegen 2). Will man also den *K*-Faktor erhöhen, ist verringerte Zielgenauigkeit viel wirksamer als erhöhte Sprengenergie.

Werden die Raketen vor allem auf die Silos, Führungsbunker und Bomberflugplätze der Gegenseite gerichtet, spricht man von einer *Erstschlagsstrategie*. Da es eine Reihe von Möglichkeiten gibt, sie zu unterlaufen (s. u.), ist ein Erfolg äußerst unsicher, sogar bei stark unterlegenem Gegner.

Trägheitslenksysteme der hochgenauen Klasse sind sehr teuer und verschaffen doch „nur“ eine Genauigkeit von 100 m nach 30 Minuten Flug. Für höhere Genauigkeiten bei langsamer fliegenden Waffenträgern führten die USA ab Mitte der siebziger Jahre die *Ortsbestimmung mittels Geländehöhenvergleich* (terrain contour matching, TERCOM) ein. Es handelte sich um die so genannten *Marschflugkörper* (MFK, englisch cruise missiles), automatische Kleinflugzeuge, die mit etwa 800 km/h fliegen. Ihrem Ziel nähern sie sich in geringer Höhe und sind dadurch sowie durch ihre Kleinheit (Spannweite 2,5 m, Länge 6 m) schwer zu bekämpfen. Sie werden zunächst mittels Trägheitsnavigationssystem gelenkt. An vorher bestimmten Strecken der Flugbahn messen sie mittels Radar die Höhe über Grund. Die Flughöhe ist aus dem Trägheitssystem bekannt, so dass das Höhenprofil des Bodens gemessen werden kann. Dies wird mit gespeicherten Höhenkarten der in Frage kommenden Fläche verglichen. Wo das Profil zur Karte passt, da war der MFK kurz zuvor. So lässt sich der Versatz in seitlicher und Bahn-Richtung immer wieder messen und das Trägheitsnavigationssystem korrigieren. So wird eine Zielgenauigkeit von 10 – 50 m erreicht (s. auch Abschnitt 5.5.2.2). MFK wurden auf Land, an Bord von Schiffen und von Flugzeugen stationiert. Durch den Mittelstreckenwaffen-(INF-) Vertrag von 1987 haben USA und UdSSR sich gegenseitig bodengestützte MFK verboten und ihre Bestände vernichtet.

Ein anderes Prinzip der Orientierung am Zielgelände wurde bei der Mittelstreckenrakete Pershing II der USA erstmalig verwendet: der *Szenenvergleich*. Beim Wiedereintritt in die Atmosphäre macht der Gefechtskopf ein Hochzieh-Manöver zum Abbremsen und nimmt dann Radarbilder des Zielgebiets auf. Diese werden mit gespeicherten Radarbildern verglichen, und so wird die Position bestimmt. Durch Steuerflächen am Gefechtskopf wird dann die Bahn korrigiert, so dass er das Ziel mit etwa 40 m Genauigkeit trifft. Auch die Pershing II wurde – wie die sowjetische SS-20 – durch den Mittelstreckenwaffen-Vertrag abgeschafft.

87 Das liegt daran, dass 1 Winkelminute = $1/60^\circ$ der geographischen Breite auf der Erdoberfläche einer Seemeile entspricht. 1 sm = 1,852 km.

Aufgabe 2-33

a) Berechnen Sie die K-Werte für: Interkontinentalraketen Minuteman III und Peacekeeper, Marschflugkörper GLCM, Mittelstreckenrakete Pershing II (alle USA) und Interkontinentalrakete SS-24 und Mittelstreckenrakete SS-20 (beide UdSSR). (GLCM, Pershing II und SS-20 wurden durch den Mittelstreckenvertrag verboten und abgeschafft, Peacekeeper wurde 2002-2005 ausgemustert.) (Vergessen Sie nicht, die Zielgenauigkeit auf Seemeilen umzurechnen, 1 Seemeile = 1,852 km.)

Tab. 2-26 Technische Daten von Nuklearwaffen, die für die Hartzielzerstörung durch jeweils einen Sprengkopf wichtig sind (zu vervollständigen)

Waffe	Sprengenergie E / (Mt TNT-Äq.)	CEP / m	K
Minuteman III (USA)	0,35	300	
Peacekeeper (USA)	0,35	90	
GLCM (USA)	0,01- 0,05	50	
Pershing II (USA)	0,02	40	
SS-24 (UdSSR)	0,5	200	
SS-20 (UdSSR)	0,15	400	

► b) Tabelle 2-27 gibt typische Werte der Härtung von Raketensilos an, gemessen in Überdruck, ab dem sie beschädigt werden. Dazu ist für verschiedene geforderte Zerstörungswahrscheinlichkeiten der je notwendige K-Wert angegeben. Stellen Sie fest, mit welchen Gefechtsköpfen aus Tabelle 2-26 welche Zerstörungswahrscheinlichkeiten erreicht werden können.

Tab. 2-27 Typische Härtungen von Raketensilos mit den K-Werten, die für bestimmte Wahrscheinlichkeiten der Zerstörung nötig sind

Härtung / Megapascal	K für 90 %	K für 97 %
0,7	13	20
2,1	30	45
7,0	71	108

Die Härte von 2,1 MPa wurde in den USA in den frühen 1960er Jahren erreicht. (Druck = Kraft / Fläche wird in Pascal = Newton / m² gemessen; der normale Luftdruck am Boden ist 0,1 MPa.)

► c) Nehmen Sie ein einfaches Modell zweier Nuklearmächte an: Beide haben 100 Raketen mit je einem Sprengkopf der Energie 0,10 Mt TNT-Äquivalent mit Zielgenauigkeit 130 m, alle auf Land in Silos der Härte 2,1 MPa stationiert. Seite A starte alle ihre Raketen

gleichzeitig gegen die Silos der Seite B. Seite B wird überrascht und kann nur die verbleibenden, unzerstörten Raketen starten. Wie viele Raketen sind das (benutzen Sie die Angaben in Tabelle 2-27)? Dieser Zweitschlag wird gegen die Städte von A gerichtet. Wie groß ist die gesamte zerstörte Fläche (schätzen Sie den Zerstörungsradius stark vereinfacht zu 2 km, nehmen Sie an, die Zerstörungskreise überdecken sich nicht)? Nehmen Sie eine städtische Bevölkerungsdichte von 5.000 Personen/km² an – wie viele Soforttote sind zu erwarten? Besteht strategische Stabilität, d.h. ist A durch den zu erwartenden Schaden genügend vom Erstschlag abgeschreckt? Ist B vom Gegenschlag abgeschreckt?

- d) Nehmen Sie nun an, jede Rakete trage 3 Gefechtsköpfe, die unabhängig voneinander auf ein Ziel gerichtet werden können. Bestimmen Sie ein Erstschlagsszenario, bei dem der Einfachheit halber nur je ein Sprengkopf für je ein Silo verwendet wird. Was ändert sich in Bezug auf den Schlagabtausch und die Abschreckung? Was ändert sich, wenn mittels je zweier auf ein Ziel gerichteter Sprengköpfe die Zerstörungswahrscheinlichkeit auf 99 % erhöht werden könnte?

Wenn man der möglichen Realität eines nuklearen Schlagabtausches näher kommen will, müssen eine Reihe zusätzlicher Faktoren in das statistische Modell einbezogen werden: Raketen haben verschiedene Reichweiten – die in Mitteleuropa stationierte Pershing II konnte zwar knapp Moskau erreichen, ihr hoher *K*-Wert konnte aber gegen die viel weiter östlich gelegenen sowjetischen Silos nicht ins Spiel gebracht werden. Raketen und Gefechtsköpfe können versagen. Es gibt verschiedene Typen von Raketen und Silos mit je verschiedenen *K*-Werten bzw. Härten. Mehrere Gefechtsköpfe können auf ein Ziel gerichtet werden. Manche Raketen tragen mehrere Gefechtsköpfe. Ein explodierender Sprengkopf kann einen zweiten in der Nähe befindlichen beeinträchtigen. Radioaktivität von Angriffen auf Silos kann in bewohnte Gebiete driften und dort Bevölkerung töten oder verletzen. Die Modellrechnungen können nur Wahrscheinlichkeiten – und die in einer erheblichen Bandbreite – ergeben und sind immer in der Gefahr, wichtige Effekte zu vernachlässigen. Ein Beispiel ist der so genannte Nukleare Winter: Die durch Nuklearexplosionen ausgelösten Großbrände transportieren so viel Ruß in die obere Atmosphäre, dass sich die Sonneneinstrahlung deutlich verringert und das Klima über Monate und Jahre so stark abkühlt, dass die landwirtschaftliche Produktion zusammenbricht. Auf diesen Effekt wurde man erst Anfang der 1980er Jahre aufmerksam. Andere Effekte wirken auf die militärische Effizienz ein. So wurden die starken Auswirkungen auf elektrische Anlagen und Elektronik des sog. elektromagnetischen Pulses einer sehr hoch gezündeten Kernexplosion erst 1962 durch Zufall entdeckt.

Schlagabtauschmodelle können jedoch einigermaßen verlässliche Antworten auf einfache Fragen liefern, wenn die Bandbreite auf der richtigen Seite liegt. Das sind Fragen wie: Besteht Aussicht auf einen entwaffnenden Erstschat, oder besteht durch die Unvermeidlichkeit eines Zweitschlags strategische Stabilität? Relative Abschätzungen sind ebenfalls möglich, etwa: Verringert sich durch eine neue Waf-fentechnologie die Stabilität (z. B. mit unabhängig zielbaren Mehrfachgefechtssköpfen auf Raketen, s. Aufgabe 2-33c) und d)?

Um einer möglichen Bedrohung durch einen Erstschat zu entgehen, gibt es – neben der grundsätzlichen Alternative, sich mit dem potentiellen Gegner auf Verringerung oder gar Abschaffung der Atomwaffen zu einigen – eine Reihe militärischer Maßnahmen, die USA und UdSSR im Kalten Krieg in der Tat getroffen haben. Die Härtung von Raketensilos wurde schon erwähnt. Eine zweite ist die Verteilung auf mehrere Trägerarten: Bomber, Landraketen und U-Boot-Raketen. U-Boote sind sicher, weil bzw. solange sie sich bewegen und dabei nicht geortet werden können. Dies Prinzip kann man auch auf Landraketen anwenden, die auf großen Start-Lkw durch das Land gefahren werden können. Schließlich muss man mit dem Start der eigenen Raketen nicht unbedingt warten, bis die gegnerischen Sprengköpfe angekommen sind – man kann die eigenen Waffen auch vorher starten, schon wenn man feststellt, dass die gegnerischen Raketen gestartet wurden und die Gefechtsköpfe oder Bomber anfliegen. Diese Strategie des sog. *launch on warning* ist ziemlich gefährlich, weil die Startentscheidung innerhalb von 10 Minuten (bei U-Boot-Raketen von vorderen Positionen) oder 30 Minuten (bei Interkontinentalraketen) nach der Frühwarnung über einen Angriff gefällt werden müssen. Handelte es sich um einen Fehlalarm, würde so ein Atomkrieg erst ausgelöst.

Stabilität lässt sich noch auf weitere Arten verstehen. Neben der grundsätzlichen strategischen Stabilität gibt es auch die *Stabilität in der Krise*. In einer Krise spitzt sich der Druck zum Handeln zu. Die Situation ist instabil, wenn eine Seite durch schnelles Losschlagen einen entscheidenden Vorteil hätte – dann kann folgende Überlegung stattfinden: Der Krieg ist sowieso nicht mehr vermeidbar, also benutze ich lieber meine Waffen, solange ich sie noch habe und bringe lieber den anderen in die schlechtere Situation, als sie selbst zu erleiden. Das ist offensichtlich extrem gefährlich, insbesondere wenn man in Rechnung stellt, dass große Militärapparate viel Spielraum für unglückliche Zufälle, nicht völlig informierte oder auch einmal übermütige Akteure haben. Die sich gegenseitig belauernden strategischen Militärsysteme von USA und (früher) UdSSR wurden auch schon einmal als ein

gemeinsames System mit Rückkopplung und Möglichkeiten zum Aufschaukeln an sich unbedeutender Ereignisse bis zum Atomkrieg betrachtet.⁸⁸

Eine dritte Art Stabilität hat eine längere Zeitskala – die *Stabilität in Bezug auf Wettrüsten*. Produktion von mehr Waffensystemen oder Forschung, Entwicklung und dann Produktion neuer Waffenarten dauern Jahre bis Jahrzehnte. Quantitative oder qualitative Aufrüstung können Auswege sein, um die kurzfristigen Arten von Instabilität zu vermeiden. Andererseits erzeugen sie meist auf der Gegenseite Druck, ebenfalls aufzurüsten. (Die theoretische Ausnahme sind Waffen, die erkennbar rein defensiven Charakter haben und nicht mit offensiven gekoppelt sind.)

Um weltweit höhere Genauigkeit zur Verfügung zu haben als durch Trägheitslenkung möglich, gerade auch für nicht-nukleare Waffen, haben die USA seit 1978 das Global Positioning System (GPS) aufgebaut. Es besteht aus 24 bis 32 *Navigationssatelliten*, die die Erde in verschiedenen Bahnen in 20,2 Mm Höhe umkreisen.⁸⁹ Sie senden Zeitsignale mit einigen zehn Nanosekunden Genauigkeit aus. Ein Empfänger auf der Erde oder in der Luft kann aus 4 aufgenommenen Signalen seine Position (geografische Länge und Breite sowie Höhe) berechnen. Während die ersten GPS-Empfänger viele zehntausend Dollar kosteten, kann man heute – auf Grund der Serienproduktion – ein ziviles, zigaretenschachtelgroßes Gerät zum Wandern, für das Sportboot u.ä. schon für 100-200 € kaufen. Neue Autos haben oft GPS-basierte Navigationssysteme. Im Militär sind viele Waffen mit GPS-Empfängern und entsprechender Lenkung ausgerüstet.

Die Zeitinformation wird über spezielle Codes übertragen. Die Ortsungenauigkeit des Systems ist etwa 15 m, sie ist für militärische Nutzer vorgesehen. Das zweite Signal mit dem der Öffentlichkeit bekannten Code kann künstlich verschlechtert werden, so dass sich hier ein Ortsfehler von etwa 100 m ergibt. Allerdings schaltete das US-Verteidigungsministerium die Verschlechterung im Mai 2000 ab.⁹⁰

Eine Alternative ist, ein Ziel durch einen Menschen zu markieren – etwa mittels eines Laserstrahls. Der beleuchtete Fleck wird dann von einem Suchkopf erkannt und die Bombe oder der Flugkörper genau dorthin gelenkt. (Das kann auch mit unsichtbarem, z. B. Infrarot-Licht, geschehen.) Auf diese Art kann die Zielgenauigkeit, die bei herkömmlichen Bomben 10 bis über 100 m betragen kann, auf einige

88 Wichtige historische Beispiele betreffen das Ansprechen von Frühwarnsystemen ausgelöst durch Vogelschwärme oder das Verwechseln eines Übungsprogramms mit dem echten.

89 Mit kurzer Verzögerung stationierte die UdSSR seit 1982 ein eigenes, ähnliches System GLONASS.

90 Ein Motiv dafür mag gewesen sein, dass die Europäische Union ankündigte, ein eigenes ziviles Navigationssatellitensystem Galileo aufzubauen, das eine bessere Genauigkeit ergeben soll. In Krise und Krieg behalten sich die USA die Verschlechterung vor.

Dezimeter verbessert werden. Damit wird sehr gezielte Zerstörung möglich, bei der weniger Sprengenergie aufgewendet werden muss, mit dementsprechend geringeren Nebenschäden an benachbarten Einrichtungen oder Menschen. Solche und andere *Präzisionsmunition* (precision-guided munition PGM) wird von den Streitkräften der Industriestaaten zunehmend eingeführt und verwendet.

2.5 Militärtechnische Entwicklung und Kriegstote

Mit dem Aufkommen von automatischen Schusswaffen (Maschinengewehr, Maschinepistole, Sturmgewehr) stiegen die Möglichkeiten, in kurzer Zeit viele Menschen umzubringen. Mit der Einführung des Flugzeugs und der Fliegerbombe konnte die Zivilbevölkerung großflächig zum Ziel genommen werden. Entsprechend stiegen die Anteile der Zivilbevölkerung an den Kriegstoten. In einem Atomkrieg könnten Hunderte von Millionen Menschen an den direkten Waffenfolgen sterben.

Die hohe Zielgenauigkeit der präzisionsgelenkten Waffen, seit 2002 auch ferngesteuerter Kampfdrohnen (s. Abschnitt 5.5.2.2), kann dazu führen, dass die zivilen Verluste in Kriegen, die die höchstentwickelten Industriestaaten führen, geringer werden. Andererseits kann dies auch die Kriegsschwelle herabsetzen.

Tab. 2-28 Anzahl der Toten in ausgewählten Kriegen und Konflikten des 20. und 21. Jahrhunderts⁹¹

	Zivil	Militär	Gesamt
1. Weltkrieg 1914-18			13.000.000-15.000.000
2. Weltkrieg 1939-45			65.000.000-75.000.000
Vietnam 1960-75	1.200.000	1.160.000	2.360.000
Völkermord Ruanda 1994			800.000
Bürgerkrieg Sudan 1995-2000			1.000.000
Bürgerkrieg Afghanistan 1990-2000			1.000.000
1. Irakkrieg 1990-1991	2.300-35.000	25.000-75.000	
Früheres Jugoslawien 1991-96			300.000
Bürgerkrieg Kosovo 1998-99	10.000		10.000
Kosovo NATO-Serbien 1999	500		

91 Leitenberg 2006; Irak: Wikipedia 2016, 2016a; NATO-Kosovo: Human Rights Watch 2000; Afghanistan/Pakistan: Crawford 2015; Syrien: Wikipedia 2016b.

Afghanistan ab 2001, bis 2014		
in Afghanistan	26.000	65.000 ^a
in Pakistan	22.000	35.000 ^a
2. Irakkrieg ab 2003, bis 2011	> 100.000	15.000
Syrien ab 2011, bis 2016	400.000	

a einschließlich Polizei, Taliban- u. a. -kämpfer

Die Gesamtzahl der Toten von 1901 bis 1945 war 96-108 Millionen und von 1945 bis 2000 etwa 41 Millionen. In vielen Fällen ist die Aufteilung zivil-militärisch in den verwendeten Quellen nicht angegeben.

Auch wenn hier das Schwergewicht auf die durch Naturwissenschaft ermöglichten neuen Waffenarten gelegt wird, darf man nicht übersehen, dass gegenwärtig die meisten zivilen Kriegstoten mit herkömmlichen Kleinwaffen (Gewehre, Maschinenpistolen, Granatwerfer usw., ggf. auch Buschmesser) sowie Minen umgebracht werden, und zwar in bzw. nach Bürgerkriegen. Tabelle 2-28 zeigt die Zahlen von Toten in wenigen ausgewählten Kriegen und Konflikten des 20. und 21. Jahrhunderts.

2.6 Physik und Abrüstung

Auch wenn Physik und Technik in großem Maß für Aufrüstung und Krieg eingesetzt wurden, sind sie doch auch für Abrüstung und Frieden erforderlich – und in gewissem Maß auch schon dafür genutzt worden. Das kann in vielen Bereichen geschehen und wird im Folgenden an Beispielen dargestellt. Zunächst sollen aber einige Begriffe erläutert werden.

2.6.1 Einige zentrale Begriffe

Unter *Abrüstung* versteht man allgemein die Verringerung, im besonderen die Abschaffung von Waffen oder Streitkräften. In UNO-Dokumenten und internationalen Verträgen wird häufig von „allgemeiner und vollständiger Abrüstung“ gesprochen – das bedeutet: Bei allen Staaaten werden alle Streitkräfte und militärischen Waffen abgeschafft. Ein neues internationales System muss die Sicherheit der Staaten gewährleisten.

Rüstungskontrolle dagegen ist die zwischen potentiellen Gegnern vereinbarte Gestaltung ihrer Streitkräfte und Waffen, während die grundsätzliche Bedrohung

beibehalten wird. Das englische „arms control“ wird genauer mit „kooperative Rüstungssteuerung“ übersetzt. Hierbei wurde meist Rüstung begrenzt (Strategic Arms Limitation Talks SALT I 1972, SALT II 1979), manchmal auch verringert (Strategic Arms Reduction Treaty START I 1991, START II 1993, New START 2010). *Quantitative* Rüstungskontrolle beschränkt die Anzahlen bestimmter Waffen, Träger oder Streitkräfte, *qualitative* Rüstungskontrolle beschneidet die Eigenschaften von Waffen oder Trägern, bis hin zum totalen Verbot bestimmter Systeme. *Vorbeugende* (oder *präventive*) Rüstungskontrolle beschränkt/verbietet neue Systeme, bevor sie eingeführt werden und ist damit qualitative Rüstungskontrolle, angewandt auf die Zukunft. Sie wirkt auf die Stationierung, oft aber auch schon auf die vorgelagerten Phasen Entwicklung und Erprobung, manchmal auch Forschung (s. Kapitel 6).

Wenn Staaten sich auf die Begrenzung ihrer militärischen Fähigkeiten einlassen, muss gewährleistet sein, dass der/die Vertragspartner sich daran halten. Im anderen Fall könnte ein vertragsbrüchiger Staat sich heimlich eine Überlegenheit errüsten und vertragstreue Staaten mit Aussicht auf Erfolg angreifen. Da man bei potentiellen Gegnern davon ausgeht, dass sie sich so verhalten könnten, muss durch *Verifikation* (Überprüfung der Vertragseinhaltung) sichergestellt werden, dass relevante Vertragsverletzungen so rechtzeitig bemerken würden, dass keinerlei nutzbare Überlegenheit entstehen kann. Würde man eine Verletzung bemerken, könnte man den Vertragspartner auffordern, sie rückgängig zu machen. Geschähe das nicht, könnte man im ungünstigsten Fall den Vertrag kündigen und durch eigene Aufrüstung einen eventuellen Vorsprung kompensieren. Die Aussicht, dass eine Verletzung mit hoher Wahrscheinlichkeit entdeckt würde, trägt erheblich zur Vertragseinhaltung bei.

Verifikation kann mit so genannten *Inspektionen vor Ort* durchgeführt werden. Weil dabei aber auch militärische Geheimnisse offenbar werden können, gibt es ihnen gegenüber eine gewisse Zurückhaltung. Insbesondere die Sowjetunion war Jahrzehnte lang sehr misstrauisch. Als Ausweg zeigten sich dann seit Anfang der 1960er Jahre die Überwachungssatelliten, die von außerhalb des nationalen Territoriums von oben in das Land blicken. Solche und andere Techniken wurden ab 1972 in den Rüstungskontrollverträgen erlaubt und als *nationale technische Mittel der Verifikation* bezeichnet. Inspektionen vor Ort wurden dann ab 1987 systematisch eingeführt, zunächst mit dem Mittelstreckenvertrag – der mit der Abschaffung ganzer Waffenkategorien (Mittelstreckenraketen und Marschflugkörper) ein echter Abrüstungsvertrag war. Spätere Verträge haben alle Vor-Ort-Inspektionen enthalten, mit detaillierten Regeln, wie diese durchzuführen sind und was bei ihnen erlaubt ist. Verbotsverträge, die eher durch das Kriegsvölkerrecht begründet sind (z. B. für Laserblendwaffen, Antipersonenminen, Streumunition) haben dagegen keine spezifischen Verifikationsmechanismen.

Verbreitung bedeutet zunächst, dass Waffen oder andere militärische Techniken sich ausbreiten; das aus dem Englischen übernommene Fachwort *Proliferation* (wuchern, sich stark vermehren) wird insbesondere für Nuklearwaffen verwendet. Man spricht von horizontaler Proliferation, wenn zusätzliche Staaten sich Nuklearwaffen beschaffen, und von vertikaler Proliferation, wenn Atomwaffenstaaten ihre Arsenale vergrößern (oder neue Arten von Kernwaffen einführen). Nichtverbreitung von Kernwaffen ist ein hohes internationales Ziel, das mit dem Nichtverbreitungsvertrag (englisch: Non-Proliferation Treaty, NPT) von 1968 völkerrechtlich verbindlich wurde.

In Tabelle 2-29 sind Rüstungskontroll- und Abrüstungsverträge angegeben, bei denen naturwissenschaftlich-technische Aspekte wichtig waren oder sind. Wie bei anderen völkerrechtlichen Verträge auch werden sie zunächst von den Regierungen der beteiligten Staaten *unterzeichnet*. Je nach Verfassung und politischem System muss dann ein Gremium (z. B. das Parlament) in jedem Vertragsstaat zustimmen (den Vertrag *ratifizieren*). Wann der Vertrag dann *in Kraft tritt*, ist meist im Vertrag selbst festgelegt (z. B. START I: bei Austausch der beiderseitigen Ratifikationsurkunden, Chemiewaffen-Übereinkommen: 180 Tage nach Hinterlegung der 65. Ratifikationsurkunde). In der Regel wird bei Verträgen das Unterzeichnungsjahr angegeben.

Abbildung 2-41 und Abbildung 2-42 geben einige Eindrücke vom Abrüstungsprozess unter dem START-I-Vertrag.

Tab. 2-29 Rüstungskontroll- und Abrüstungsverträge mit den Aspekten, bei denen Naturwissenschaft und Technik eine wichtige Rolle spiel(t)en

Vertrag, Unterzeichnungsjahr	Naturwissenschaftlich-technische Aspekte
Partieller Atomteststopp 1963 (Verbot von nuklearen Testexplosionen am Boden, in der Luft, unter Wasser)	Nachweis radioaktiver Stoffe; Verbreitung weltweit, daher keine besondere Verifikation nötig
Nichtverbreitungsvertrag 1968 (Verbot der Weitergabe von Kernwaffen, Gebot für nukleare Abrüstung, Förderung ziviler Kernenergienutzung)	Grundlagen für Herstellung von Atomwaffen, Folgen von Atomkrieg, Verbreitungsmechanismen, Sicherungsmaßnahmen (Überwachung bei Spaltmaterial und Anlagen: Analyse von Abzweigungsszenarien, technische Geräte)
SALT I 1972 (Begrenzung strategischer Waffen)	Arten von Kernwaffenträgern, Folgen von Atomkrieg, Schlagabtauschmodelle, Überprüfung durch nationale technische Mittel

Vertrag, Unterzeichnungsjahr	Naturwissenschaftlich-technische Aspekte
ABM-Vertrag 1972 (-2002) (Begrenzung von Raketen-abwehrsystemen)	Stabilitätsüberlegungen, mögliche Abfangtechniken, Begrenzungen für erlaubte Radars/Startgeräte/Flugkörper, Überprüfung durch nationale technische Mittel (u. a. Satelliten, Funkaufklärung mit Schiffen und Flugzeugen)
Biologische-Waffen-Übereinkommen 1972 (Verbot biologischer Waffen)	Definition; Überlegungen für noch ausstehendes Einhaltungs- und Überprüfungsprotokoll
SALT II 1979 (Begrenzung strategischer Waffen)	Wie SALT I, hervorzuheben: Beschränkung der Verschlüsselung der Telemetriedaten bei Raketentestflügen
INF-Vertrag 1987 (Abschaffung von Mittelstreckenraketen und -flugkörpern)	Analysen von Reichweiten und Zielgenauigkeiten, kooperative technische Mittel der Verifikation (hervorzuheben: Röntgendurchstrahlung von Raketenbehältern)
Offener-Himmel-Vertrag 1990 (Überflüge für Luftbilder)	Sensorausstattung der Flugzeuge, erlaubte Bodenauflösung (hervorzuheben: Zertifizierung von Luftbildkameras, Infrarotdetektoren, Radarsystemen ...)
START I 1991 (Verringerung strategischer Waffen)	Überprüfung durch nationale und kooperative technische Mittel (hervorzuheben: Gerät zur kontinuierlichen Überwachung von Raketenfabriken, Kennzeichen für mobile Raketenfahrzeuge, Gefechtskopf-Inspektionen, voller Zugang zu Telemetriedaten bei Raketentestflügen)
START II 1993 (Weitere Reduzierung strategischer Waffen, Abschaffung Mehrfachgefechtsköpfe)	Wie START I
Chemiewaffen-Übereinkommen 1993 (Verbot chemischer Waffen)	Abgrenzung Chemiewaffen – zivile Chemieproduktion, Listen begrenzter Stoffe, Nachweisverfahren für diese Stoffe
Laserblendwaffen-Verbotsprotokoll 1995	Wellenlängen, Bestrahlungsstärke, Augenschädigung
Vollständiger Atomteststopp 1996 (Verbot aller Kernexplosionen)	Nachweis radioaktiver Stoffe, Unterscheidung unterirdische Kernexplosion – Erdbeben (hervorzuheben: Internationales Überwachungssystem mit weltweit verteilten Sensoren für Seismik, Infraschall, Unterwasserakustik und Radionuklide)
Antipersonenminen-Übereinkommen 1997 (Verbot von Antipersonenminen)	Minensuche, -räumung
SORT 2002 (Begrenzung stationierter Waffen)	Keine Verifikation

Vertrag, Unterzeichnungsjahr	Naturwissenschaftlich-technische Aspekte
Streumunitions- Übereinkommen 2008 (Verbot von Streumunition)	Streumunitionssuche, -räumung
New START 2010 (Weitere Reduzierung Raketen, Bomber)	Überprüfung wie START I, zusätzlich Datenaustausch, Vorführung, Inspektionsgerät, Austausch Telemetrie- daten



Abb. 2-41 Eindrücke vom Abrüstungsprozess: Nuklearbomber unter START I

Oben: Der erste ukrainische Tu-22-Nuklearbomber wird demontiert (2001).

Unten: Abgewrackte B-52-Bomber der USA sind in Arizona zur Satellitenüberprüfung aufgestellt.

Fotos: US Defense Threat Reduction Agency, freie Nutzung

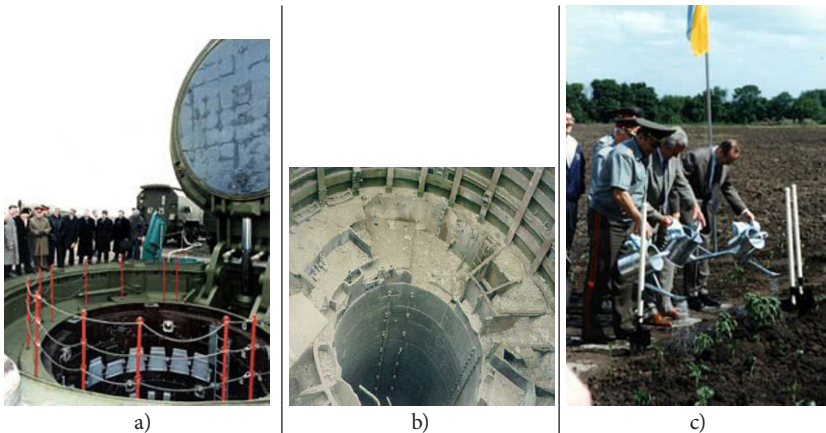


Abb. 2-42 Eindrücke vom Abrüstungsprozess der Interkontinentalraketen

- a) Verteidigungsminister der Ukraine und der USA besichtigen intakten Silo einer SS-19-Rakete in Pervomaysk, Ukraine (1994).
- b) Blick in den zerstörten Silo nach Demontage des Oberteils.
- c) Symbolisch wird ein früheres Raketenfeld in eines für Sonnenblumen umgewandelt.

Fotos: US Defense Threat Reduction Agency, freie Nutzung

Aufgabe 2-34

- a) Finden Sie heraus, welche Arten von Vor-Ort-Inspektionen Art. XIV des Vertrages über konventionelle Streitkräfte in Europa (KSE-Vertrag) vorsieht. Welche Arten nennt das Inspektionsprotokoll (Überschriften der Abschnitte VII-X)? Wieviele Inspektionen hat Deutschland in einem der letzten Jahre unter diesem Vertrag aktiv durchgeführt, wie viele hat es passiv aufgenommen? (Tipp: www.auswaertiges-amt.de, Außenpolitik)
- b) Worum geht es bei Kapitel IX und X des Wiener Dokuments der OSZE? Wieviele Inspektionen und Auswertungsbesuche wurden 2015 unter Kapitel IX durchgeführt, wie viele Verifikationsaktivitäten gab es 2015 unter Kapitel X? (Tipp: www.auswaertiges-amt.de, Außenpolitik; www.osce.org, Annual Report 2015)
- c) Nennen Sie mindestens 5 verschiedene Geräte, die laut Annex 9 zum „Protocol on Inspections and Continuous Monitoring Activities ...“ des START-I-Vertrages zur ständigen Überwachung an Produktionsstätten für mobile Raketen (Art. XI(14)) eingesetzt werden dürfen. (Tipp: www.state.gov)

2.6.2 Vorschläge für Abrüstung und Nichtverbreitung

Immer dann, wenn technische Eigenschaften von Waffen wichtig sind, müssen Vorschläge für Abrüstung und Nichtverbreitung auch naturwissenschaftlich-technische Fragen berücksichtigen. Das betraf in der Vergangenheit z. B. den Nichtverbreitungsvertrag von 1968 und die Auslegung der Beschränkungen für waffenfähiges Material. Bisher sind auch Wasserstoffbomben auf eine Spaltbombe zur Zündung angewiesen. Als Spaltmaterial kommen hochangereichertes Uran-235 und Plutonium-239 in Frage. Für ihre Gewinnung sind komplizierte und große Anlagen notwendig (s. Abschnitt 3.9.1). Hier können die Kontrollen ansetzen, für die die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) zuständig ist (s. Abschnitt 2.2.4). Die IAEO überwacht einerseits den Verbleib der Brennelemente in Forschungs- und Energieproduktionsreaktoren, andererseits die Stoffflüsse in Wiederaufarbeitungsanlagen, drittens die Vorräte an abgetrenntem Plutonium. Diese Überwachung geschieht gemäß des Nichtverbreitungsvertrags in den Staaten, die auf Kernwaffen verzichtet haben. In Kernwaffenstaaten werden auf freiwilliger Grundlage einige zivile Anlagen kontrolliert.

Aufgabe 2-35

- ▶ a) Erkunden Sie, welche Mengen an welchen Materialien bei der IAEO als signifikante Mengen von Nuklearmaterial gelten. (Tipp: www.iaea.org)
- ▶ b) Das Land X habe seit 12 Jahren einen einzigen (Forschungs-)Reaktor mit niedrig angereichertem Uran betrieben, mit einer maximalen thermischen Leistung von $P = 15$ MW (dies ist die gesamte erzeugte Leistung zum Unterschied von in der Anlage etwa daraus erzeugter elektrischer Leistung, die ja nach Gl. (53) (Wirkungsgrad) deutlich geringer sein muss). Nehmen Sie an, die mittlere Auslastung habe 70 % betragen. Berechnen Sie, wieviel Uran-235 in der bisherigen Laufzeit gespalten wurde. Nehmen Sie an, pro kg gespaltenem Uran-235 sei 0,65 kg Plutonium erzeugt worden; schätzen Sie ab, wieviel Plutonium dabei erzeugt wurde. Für wie viele Spaltbomben würde das Plutonium reichen, wenn pro Bombe 8 kg nötig sind?

Ein Beispiel für auf die Zukunft gerichtete Arbeiten ist der Prozess zur Abschaffung aller Atomwaffen: Wenn man von einem Zustand der minimalen Abschreckung (mit z. B. je 100 Kernwaffen bei USA und Russland, die anderen entsprechend weniger) auf Null übergehen will, darf keine Instabilität in Bezug auf einen entwaffnenden Erstschlag entstehen.

Ein anderes Beispiel ist die Ausgestaltung eines Verbots von Weltraumwaffen. Die zivile Nutzung von Satelliten soll erlaubt bleiben, aber ein Missbrauch für Waffenzwecke soll verhindert werden. Wie kann man das erreichen? Es gibt viele militärische Satelliten der Großmächte, die für die Kriegsführung auf der Erde eine zentrale Rolle spielen – zum Finden der Ziele für Nuklearangriffe, zum Nachweis von Kernexplosionen und Raketenstarts, für die militärische Kommunikation und Navigation, für die Steuerung von (Kampf)drohnen.⁹² Je mehr ein Gegner solche Möglichkeiten nutzt, desto stärker könnte man ihn mit Antisatellitenwaffen treffen. Bei der Konzipierung eines Verbots solcher Waffen muss also überlegt werden, ob man die Nicht-Waffenfunktionen militärischer Satelliten beschränken muss, damit die Motivation für Weltraumwaffen nicht unüberwindbar hoch wird.⁹³

2.6.3 Proliferationsresistenz

Das Beispiel der Kernenergie zeigt, dass die friedliche und die militärische Nutzung einer Technik prinzipiell verwandt sind. Jedoch hängen die Schwierigkeiten bei einem möglichen Übergang zu militärischer Nutzung von vielen Einzelheiten ab, die man bewusst gestalten kann. Das Ziel, Weiterverbreitung (Proliferation) aufzuhalten, gelingt leichter, wenn man sich nicht nur auf Kontrollen beschränkt, sondern auch physische Maßnahmen trifft.⁹⁴ Früher wurden z. B. Forschungsreaktoren durchweg mit hoch angereichertem Uran betrieben – zum Bau einer einfachen Kanonenrohr-Bombe hätte man nur das Material abzweigen müssen. Stellt man die Forschungsreaktoren auf niedrig angereichertes Uran um, ist kein direkt waffenfähiges Material vorhanden. Da Urananreicherung sehr aufwändig ist, besteht dann eine erhebliche Barriere gegenüber Proliferation.⁹⁵

Vorhandene und neue Technologien müssen darauf untersucht werden, ob die zivile Nutzung in ähnlicher Weise so gestaltet werden kann, dass die militärische Nutzung erschwert wird. Im Bereich der Kernenergie kann man z. B. durch Verzicht

92 Auch bei den anderen Weltraumnationen steigt die militärische Nutzung von Satelliten.

93 Der von deutschen Wissenschaftlern 1984 ausgearbeitete Vertragsentwurf „zur Begrenzung der militärischen Nutzung des Weltraums“ sah z. B. vor, die direkte Lenkung von Nuklearwaffen aus dem Weltraum zu verbieten und dazu die Navigationssatelliten zu begrenzen, Fischer/Labusch/Maus/Scheffran 1984.

94 Liebert 2005.

95 Seit Ende der 1970er Jahre gibt es weltweite Bemühungen, die Forschungsreaktoren auf niedrig angereichertes Uran umzustellen. Problematisch ist, dass der 2004 in Betrieb gegangene Forschungsreaktor München 2 (FRM-2) wieder hoch angereichertes Uran verwendet. S. Glaser 2002, 2005.

auf Wiederaufarbeitung sicherstellen, dass keine Vorräte an Plutonium bestehen. Bei der Endlagerung abgebrannter Brennelemente behindert die intensive Strahlung der Spaltprodukte für viele hundert Jahre den Zugriff auf das damit vermischte Plutonium. Jedoch ist schon eine große Menge Plutonium aus Kernkraftwerken abgetrennt worden. Sie kann wahrscheinlich nicht in den nächsten Jahrzehnten durch Beimischung zu Uran in Kernkraftwerken abgebaut werden. Auch hier muss eine proliferationsresistente Lösung gefunden werden – sei es Endlagerung mit Beimischung hoch radioaktiver Stoffe oder die Spaltung in besonderen Plutoniumvernichtungsreaktoren.⁹⁶

Für die Zukunft stellen sich weitere Aufgaben. Proliferationsresistente Auslegung ist nötig für neue Formen der Kernenergienutzung (wie etwa Fusionsreaktoren) oder starke Neutronenquellen, (z. B. durch sog. Spallation), wo Spalt- und Fusionsstoffe erbrütet werden könnten.

2.6.4 Vorschläge für die Verifikation und Entwicklung neuer Techniken dafür

Begrenzungsverträge für militärische Fähigkeiten müssen einerseits zuverlässig überprüft werden können, jedoch müssen die Bedürfnisse nach Schutz militärischer Geheimnisse gewahrt bleiben. Hier sind je nach Bereich verschiedene und differenzierte Lösungen nötig. Bei strategischen Nuklearwaffen reichte zunächst die Überwachung von oben, mittels Beobachtungssatelliten. Für die Feststellung der Sprengkopffzahl auf einer Rakete sind jedoch Inspektionen vor Ort nötig, die u. a. mit Kernstrahlungsmessgeräten arbeiten.

Geophysiker haben Jahrzehnte lang an dem Problem gearbeitet, für den vollständigen Teststopp die seismischen Signale von unterirdischen Atomspaltungen von denen von Erdbeben zu unterscheiden. Um 1980 waren sie erfolgreich, die Unterscheidung kann folgende Kriterien benutzen:⁹⁷

- Bei Sprengungen sind die längs der Erdoberfläche laufenden Wellen gegenüber den durch den Erdkörper laufenden deutlich schwächer ausgeprägt.
- Bei Sprengungen ist die erste Welle überall nach außen gerichtet. Bei Erdbeben dagegen – wo zwei Schollen aufreißen und sich seitlich gegeneinander versetzen – ist die erste Auslenkung in manchen Richtungen auf den Herd zu gerichtet.
- Bei den Raumwellen von Sprengungen sind höhere Frequenz stärker vertreten.

⁹⁶ Pistner 2006.

⁹⁷ Harjes/Aichele/Rademacher 1983.

- Wenn der aus den Ankunftszeiten bestimmbare Herd tiefer als etwa 10 km liegt, muss die Quelle eine natürliche gewesen sein, da man nicht tiefer bohren kann.

Ohne die sichere Unterscheidungsmöglichkeit wäre der Vollständige Teststoppvertrag nicht zu Stande gekommen – es hat dann jedoch noch bis 1996 gedauert, bis er unterzeichnet wurde (s. auch Abschnitt 5.5.6.2).

Zur Durchführung der internationalen Überwachung soll die Comprehensive Test Ban Treaty Organisation (CTBTO) in Wien eingerichtet werden, die dort bisher ein Provisorisches Technisches Sekretariat (PTS) hat. Dieses betreibt ein weltweites Netz von Sensorstationen (Abbildung 2-43). Damit wurden die unterirdischen Nuklearexplosionen von Nordkorea (2006, 2009, 2012, 2016) zuverlässig gemessen.⁹⁸ Seit 2008 wird das Netz auch für die Warnung vor Tsunamis genutzt.

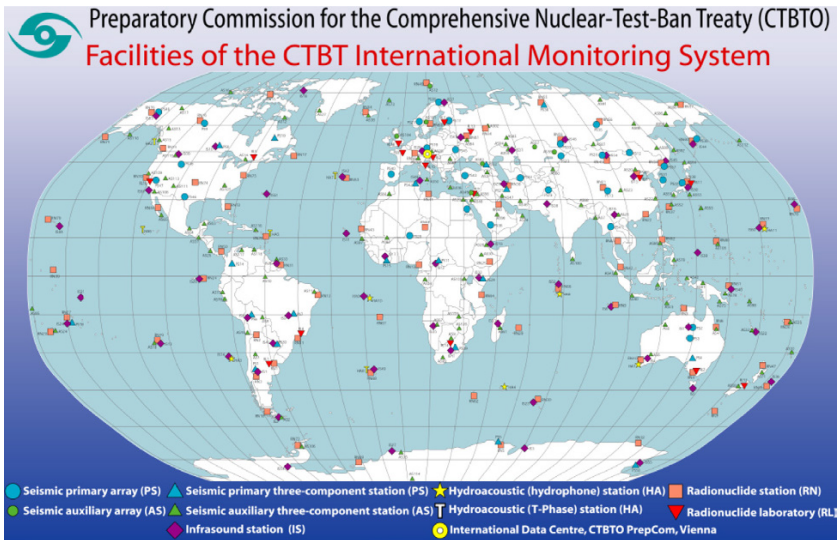


Abb. 2-43 Weltweites Sensornetz der CTBT-Organisation in Wien

Quelle: © CTBTO, Abdruck mit freundlicher Genehmigung

⁹⁸ CTBTO 2016. Bei den Nukleartests von Indien und Pakistan (1998) war das Überwachungssystem noch nicht in Betrieb, die Signale wurden aber an vielen anderen seismischen Stationen nachgewiesen.

Aufgabe 2-36

(Tipp: <http://www.ctbto.org>)

- ▶ a) Warum war für den Partiellen Atomteststoppvertrag von 1963 (verbietet Kernwaffentestexplosionen in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser) die Verifikationsfrage kein starker Hinderungsgrund?
- ▶ b) Warum besteht in Wien nur ein Provisorisches Technisches Sekretariat (PTS)?
- ▶ c) Mittels welcher Signale überprüft die CTBTO/das PTS, ob der Teststoppvertrag eingehalten wird? Wie viele Stationen sind jeweils vorgesehen?
- ▶ d) Erkunden Sie, welche Überwachungsstationen in Deutschland stehen oder von Deutschland (mit) aufgestellt werden.

2.6.5 Rüstungstechnikfolgenabschätzung und vorbeugende Rüstungskontrolle

Militärische Nutzung neuer Technologien kann zu negativen Folgen führen. Sie kann z. B. Begrenzungsverträge gefährden, die strategische Stabilität verringern, die Verbreitung in Krisenregionen fördern oder für Terrorismus genutzt werden. Wichtige Aufgaben für unabhängige naturwissenschaftliche Analysen sind: die Untersuchung konkreter militärtechnologischer Entwicklungstrends, die Beurteilung unter Kriterien von Frieden und Sicherheit sowie die Erarbeitung von Vorschlägen für die vorbeugende Beschränkung, einschließlich von Verfahren für die Verifikation (präventive Rüstungskontrolle).

Begrenzungen neuer Technologien bedeuten meist auch Begrenzungen der absehbaren militärischen Fähigkeiten, es sei denn, die Technologien liegen sehr weit in der Zukunft. Von daher sind Streitkräfte mit hohem Technikeinsatz oft gegen vorbeugende Begrenzungen, und die Prioritäten müssen politisch gesetzt werden.

Ein Beispiel, wo vorbeugende Begrenzungen teilweise gelungen sind, ist der Vertrag zur Begrenzung von Raketenabwehrsystemen (anti-ballistic missiles, ABM-Vertrag) von 1972. Der Vertrag zwischen USA und UdSSR erlaubte jeder Seite eine feste Raketenabwehrstellung auf Land, entweder bei der Hauptstadt oder bei einem Interkontinentalraketenfeld.⁹⁹ Diese Abwehrsysteme – bestehend aus Abfangraketen (damals nuklear bestückt), Startgeräten dafür und Abfangradars – waren in den 1960er Jahren entwickelt worden. Denkbar war, sie auch auf Schiffen,

⁹⁹ Zunächst zwei (Hauptstadt und Interkontinentalraketenfeld), durch ein Protokoll zum Vertrag 1974 auf eine Stellung reduziert. Der Vertrag wurde im Dezember 2001 von den USA gekündigt und lief im Juni 2002 aus.

in Flugzeugen oder im Weltraum zu stationieren. Das wurde jedoch vorbeugend ausgeschlossen: In Artikel V des ABM-Vertrags heißt es:

1. Jede Vertragspartei verpflichtet sich, keine ABM-Systeme oder Bestandteile zu entwickeln, zu erproben oder zu dislozieren, die see-, luft- oder weltraumgestützt sind oder als bewegliches System landgestützt sind.

Bemerkenswert ist, dass schon in den Verhandlungen zum Vertrag überlegt wurde, dass es andere Verfahren geben könnte, Raketen abzufangen, etwa mit Hochleistungslasern. Auch hierfür wurde 1972 schon eine allgemeine Regel vereinbart. In den Gemeinsamen Erklärungen heißt es (Übersetzung J.A.):

[D]

Um die Erfüllung der Verpflichtung sicherzustellen, keine ABM-Systeme oder ihre Bestandteile aufzustellen außer wie in Artikel III des Vertrags vorgesehen, stimmen die Vertragsparteien überein, dass, sollten in Zukunft ABM-Systeme geschaffen werden, die auf anderen physikalischen Prinzipien beruhen und Bestandteile enthalten, die an die Stelle von ABM-Abfangflugkörpern, ABM-Abschussvorrichtungen oder ABM-Radargeräten treten können, besondere Begrenzungen solcher Systeme und ihrer Komponenten gemäß Artikel XIII der Diskussion und gemäß Artikel XIV des Vertrags der Übereinstimmung unterliegen würden.

Diese Erklärung war ein wichtiges Argument der Kritiker, als in der Raketenabwehrinitiative von US-Präsident Reagan (Strategic Defense Initiative SDI, ab 1983) u. a. Laserwaffen im Weltraum für die Abwehr vorgesehen wurden.

Auch andere Rüstungsbegrenzungsverträge haben vorbeugende Elemente, so verbietet z. B. der Weltraumvertrag von 1967 in Artikel IV die Stationierung von Nuklearwaffen oder anderen Massenvernichtungswaffen in Erdumlaufbahnen oder auf Himmelskörpern. Dieses Verbot hat militärischen Interessen nicht sehr widersprochen: Einerseits gab es mit den Raketen schon genügend Möglichkeiten, Nuklearwaffen schnell zum potentiellen Gegner zu transportieren. Andererseits ist die Kontrolle solcher Waffen im Umlauf viel schwieriger, es kann Unfälle geben, und perspektivisch könnten die Satelliten auch angegriffen oder gekidnappt werden.

Die internationale Gemeinschaft verlangt seit vielen Jahren ein generelles Verbot von Weltraumwaffen. Hier gibt es aber starken Widerstand vor allem von den USA, die sich ihre militärische Handlungsfähigkeit – bei weltraumgestützter Raketenabwehr, bei Antisatellitenwaffen und bei Weltraumwaffen gegen Luft- und Bodenziele – nicht beschneiden lassen wollen.

Aktuell sind einige neue militärische Technologien in Forschung und Entwicklung, die im Interesse des Friedens und der Stabilität begrenzt werden müssten.

Das betrifft u. a. Nanotechnologie, autonome Kampffahr- und -flugzeuge bzw. Kampfroboter¹⁰⁰.

Aufgabe 2-37

- ▶ a) Suchen Sie eine Resolution der UN-Generalversammlung zu Weltraumwaffen. Was wird dort verlangt? (Tipp: <http://www.un.org>)
- ▶ b) Überlegen Sie sich zwei Methoden, mit denen ein allgemeines Verbot von Weltraumwaffen überprüft werden kann.
- ▶ c) Was haben SPD und Bündnis-90/Grüne in ihrem Koalitionsvertrag von 2002 zu präventiver Rüstungskontrolle bei neuen Militärtechnologien geschrieben? Was enthält der letzte Jahresabrüstungsbericht der Bundesregierung zu dem Thema? (Tipp: Internet-Suchmaschine, <http://www.auswaertiges-amt.de>, Außenpolitik)

2.6.6 Beseitigung von Altlasten

Der Kalte Krieg hat viele Altlasten hinterlassen, u. a. radioaktive Verseuchungen in den Kernwaffenstaaten und den Uranbergbau-Gebieten sowie chemische Waffen, die z. B. in der Ostsee versenkt wurden. Naturwissenschaftlich-technische Studien sind nötig für die Aufräumarbeiten und die sichere Entsorgung.

Im Rahmen der Atomwaffenabrüstung fällt viel Plutonium und hoch angereichertes Uran an. Die geeignetsten Methoden müssen erarbeitet werden, wie dieses Material so bearbeitet und ggf. gelagert werden kann, dass es nicht leicht wieder für neue Kernwaffen verwendet werden kann.

Ein drittes Feld betrifft die Räumung von Landminen. V. a. in Bürgerkriegen wurden sie in hohen Zahlen ausgelegt, gefährden aber noch nach Jahrzehnten die Bevölkerung. Weltweit liegen etwa 60 Millionen Landminen, die bis zum Verbot jedes Jahr 15.000–20.000 Opfer forderten – die Opfer verbluten oder ihnen müssen Gliedmaßen amputiert werden. Das 1997 unterzeichnete Übereinkommen zum Verbot von Antipersonenminen verbietet nicht nur die Produktion und Verlegung neuer Minen, sondern fordert auch die Beseitigung der alten innerhalb von zehn Jahren. Diese Frist musste für viele Länder verlängert werden. Zur Beschleunigung der Räumung müssen die bisherigen Methoden der Minensuche (Metallsuchgerät, Suchhunde, Prüfnadel) durch erheblich schnellere ergänzt oder ersetzt werden.

100 Altmann 2006, 2013.

Aufgabe 2-38

- ▶ a) Worin besteht der prinzipielle Unterschied zwischen Uran-235 und Plutonium, wenn man versucht, diese Materialien aus abgerüsteten Kernwaffen möglichst weitgehend vor Wiederverwendung in Waffen zu sichern?
- ▶ b) Nennen Sie die am meisten von Minen betroffenen Länder. (Tipp: Wikipedia, Internet-Suchmaschine)
- ▶ c) In welchen Ländern werden mit finanzieller Unterstützung des deutschen Auswärtigen Amtes Minen geräumt? Wer führt diese Räumung durch? (Tipp: <http://www.auswaertiges-amt.de>, Außenpolitik)

2.6.7 Weitere Themen

Physikalisch-technische Arbeit ist nötig in vielen weiteren Bereichen, darunter:

- Konversion militärischer Hochtechnologie – wie können militärische Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen und –projekte in Richtung auf zivile Produkte umgestellt werden?
- Analyse der naturwissenschaftlich-technischen Aspekte von Konflikten, die mit Umwelt, Ressourcen und Energie zu tun haben.
- Mathematische Modelle – sie können zum Verständnis von Aufrüstungs- und Abrüstungsprozessen oder von Konflikten beitragen.

2.7 Übersicht Größen, Beziehungen, Konstanten, Waffen

Für SI-Grundeinheiten und –Vorsilben s. Abschnitt 2.1.2, für Elemente und ihre Eigenschaften s. Teilkapitel 3.2, für Kernwaffenwirkungen s. auch Abschnitt 2.2.5.

Griechische Buchstaben/Aussprache

α	δ	Δ	Φ	η	λ	μ	ν	π	ρ	σ	τ
alpha	delta	Delta	Phi	eta	lambda	mü	nü	pi	rho	sigma	tau

Größen, Einheiten

Größe	Formelzeichen, Gleichung	Einheit
Länge	s, l, r, d, h	m, Seemeile = 1.852 m
Zeit	t	s, min = 60 s, h = 3.600 s, d = 24 h
Geschwindigkeit	$v = \Delta s / \Delta t$	m/s, km/h = (1/3,6) m/s
Beschleunigung	$a = \Delta v / \Delta t$	m/s ²
Fläche	A	m ²
Volumen	V	m ³
Masse	m	kg, t = Mg
Dichte	$\rho = m/V$	kg/m ³
Kraft	$F = m a$	N = kg m/s ²
Druck	$p = F/A$	Pa = N/m ² ; bar = 10 ⁵ Pa
Energie	E	J = Nm =Ws, kWh = 3,6 MJ, eV = 1.6·10 ⁻¹⁹ J, kg TNT-Äq. = 4,2 MJ
kinetische	$E_{\text{kin}} = m v^2/2$	
potentielle	$E_{\text{pot}} = m g h$	
Wärme-	Q	
elektrische	$E_{\text{el}} = U I \Delta t$	
Leistung	$P = \Delta E / \Delta t$	W = J/s
Strahl-	Φ	
elektrische	$P_{\text{el}} = U I$	
Temperatur	T	°C, K; 0 °C = 273,2 K
spezifische Wärme-	$c = \Delta Q / (m \Delta T)$	J/(kg K)
kapazität		
Wirkungsgrad	$\eta = E_2 / E_1$	1
Stoffmenge	μ	mol
elektr. Stromstärke	I	A
elektr. Spannung	U	V = J/(A s)
elektr. Widerstand	R	Ohm = V/A
Frequenz	ν	Hz = 1/s
Wellenlänge	λ	m
Bestrahlungsstärke	$E = \Phi / A$	W/m ²
Strahlendosis		
Energiedosis	$D = E_{\text{absorbiert}} / m$	Gray = J/kg, rad = 0,01 Gy
Äquivalentdosis	$H = D q$ (q : Bewertungsfaktor)	Sievert, rem = 0,01 Sv

Beziehungen

Maßstab $M = d_{\text{Karte}} / d_{\text{Erde}}$

Bei konstanter Beschleunigung a : $v(t) = a t + v_0$, $s(t) = a/2 t^2 + v_0 t + s_0$

Bremsbeschleunigung durch Luftwiderstand: $a_L = -\rho/2 v^2 c_W A/m$, c_W : Widerstandsbeiwert

Flächen: Rechteck, Seiten a, b : $A = a b$ (Quadrat: $a = b$); Kreis, Radius r : $A = \pi r^2$

Volumina: Quader, Seiten a, b, c : $V = a b c$ (Würfel: $a = b = c$); Kugel, Radius r : $V = 4 \pi r^3 / 3$

Oberfläche: Kugel $A = 4 \pi r^2$

Wärmeenergie zum Aufheizen: $\Delta Q = c m \Delta T$, c : spezifische Wärmekapazität

Obergrenze für Wirkungsgrad bei Wärmekraftmaschinen: $\eta_{\max} = 1 - T_2 / T_1$ (absolute Temperaturen, in K)

Stromstärke durch Widerstand R bei Spannung U : $I = U / R$

Frequenz bei Periode T : $\nu = 1 / T$

Wellengeschwindigkeit bei Frequenz ν und Wellenlänge λ : $c = \lambda \nu$

Bestrahlungsstärke auf der Achse im Abstand r von Sendeantenne (Kreisfläche A_S) bei Wellenlänge λ , Sendeleistung Φ_S : $E = \Phi_S A_S / (\lambda^2 r^2)$

Aufgefangene Leistung eines Radars (Empfangsantennenfläche A_E , Radarrückstreuquerschnitt σ): $\Phi_R = \Phi_S A_S A_E \sigma / (4 \pi \lambda^2 r^4)$

Radarreichweite (Verlustfaktor $F_L = 5-10$, Boltzmann-Konstante k_B , absolute Temperatur T , Frequenzbandbreite des Empfängers $\Delta\nu$, Rauschfaktor $F_N \approx 3$, Nachweisfaktor über Rauschen $(S/N)_{\det} = 20-60$): $r_{\det} = [\Phi_S A_S A_E \sigma / (4 \pi \lambda^2 F_L k_B T \Delta\nu F_N (S/N)_{\det})]^{1/4}$

Beziehung zwischen Energie E und (Ruhe-)Masse m , Lichtgeschwindigkeit c : $E = m c^2$

Energie eines Quants (Photons) einer elektromagnetischen Welle der Frequenz ν (Planck'sche Konstante h): $E = h \nu$

Energie/Fläche bei Strahlung in alle Richtungen (E_{Str} ausgesandte Energie, r Abstand): $E/A = E_{\text{Str}} / (4 \pi r^2)$

Konstanten

Schwerebeschleunigung am Erdboden: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (ggf. mit Minuszeichen)

Dichten: Luft $\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$, Wasser $\rho_W = 1,00 \text{ Mg/m}^3$, Uran $\rho_U = 18,9 \text{ Mg/m}^3$

Widerstandsbeiwert Kugel $c_W = 0,45$

Schallgeschwindigkeit in Luft (Normalbedingungen): $c_{\text{Schall}} = 340 \text{ m/s}$

Lichtgeschwindigkeit in Vakuum/Luft: $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

spezifische Wärmekapazität von Wasser: $c_{\text{Wasser}} = 4,19 \text{ kJ/(kg K)}$

Anzahl Teilchen/Mol: $L = 6,02 \cdot 10^{23} / \text{mol}$

spezifischer Energiegehalt von TNT: $(Q/m)_{\text{TNT}} = 4,2 \text{ MJ/kg}$

mittlere Energiefreisetzung bei Spaltung eines Kerns Uran-235: $200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

Energiefreisetzung bei Fusion Deuteriumkern – Tritiumkern: $17,6 \text{ MeV} = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

Boltzmann-Konstante: $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Planck'sche Konstante: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/Hz}$

Massen von Teilchen: Elektron $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, Proton $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, Neutron $m_n = 1,674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Kernphysik, Radioaktivität, Kernwaffen

Alphastrahlung: Heliumkerne (${}^4_2\text{He}$, 2 Protonen und 2 Neutronen); Betastrahlung: Elektronen; Gammastrahlung: Photonen (wie Röntgenstrahlung)

Kernteilchen: Protonen, Neutronen

Spaltbare Kerne: ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ und weitere Plutonium-Isotope

Anteile Uran-235 in Uran: Natururan 0,7 %, Leichtwasserreaktor etwa 4 %, Spaltbombe > 90 %

Fusion: Deuterium (${}^2_1\text{H}$) + Tritium (${}^3_1\text{H}$) $\rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ (Tritium ggf. aus ${}^6_3\text{Li}$ erbrütet)

Energieaufteilung Kernexplosion in Atmosphäre: Hitzestrahlung 35 %, Druckwelle 50 %, radioaktive Sofortstrahlung 5 %, verzögerte radioaktive Strahlung 10 %

Benötigte Energie/Fläche ungefähr: Papier entzünden 250 kJ/m^2 , Stoff und Holz entzünden 800 kJ/m^2 , Verbrennungen zweiten Grades 200 kJ/m^2 , dritten Grades 300 kJ/m^2

Tödliche Strahlendosis: $LD_{50/30 \text{ d}} = 4,5 \text{ Gy}$

Zerstörungsfaktor gegen gehärtete Ziele (E Sprengenergie, CEP Zielgenauigkeit):

$$K = (E/Mt \text{ TNT-Äq})^{2/3} / (CEP/\text{sm})^2$$

Einige Waffen und -träger

Waffe/Träger	Eigenschaften	typische Reichweite / km	typische Geschwindigkeit / (km/s)
Landmine	ortsfest, zündet bei Annäherung	0,005-0,05	-
Handgranate	zum Werfen von Hand, Sprengladung	0,03	0,02
Gewehr	tragbar, Rohr, Kaliber um 1 cm	0,5	0,5
Geschütz	Geschoss/Granate aus Rohr, Kaliber einige cm bis 30 cm, Bahn flach bis steil	5-30	0,5-1
Artillerierakete	Rakete aus Gestell oder offenem Rohr	5-50	0,5-1
Kurzstreckenrakete	Start von Werferfahrzeug	100-1.000	1-2
Mittelstreckenrakete	Start von Werferfahrzeug oder U-Boot	2.000-5.000	4-5,5
Langstreckenrakete	Start aus Silo, von Werferfahrzeug oder U-Boot	5.000-15.000	5,5-7
Langstreckenbomber	Flugzeug, unter Schallgeschwindigkeit	> 10.000 (ohne Luftbetankung)	0,3
Abstandsflugkörper	von Bomber abgesetzt	100-200	1
Marschflugkörper (Langstrecke)	automatisches Kleinflugzeug (Düsenantrieb) für Einmalverwendung; Start von Bomber, Fahrzeug, Schiff, U-Boot	1.000-2.500	0,2
Kampfdrohne (Kampf-UAV)	Ferngesteuertes/teilautonomes unbemanntes Flugzeug (Propellerantrieb) für Lenkflugkörper oder Bomben	800-2.000	0,1

2.8 Abkürzungsverzeichnis

(Für die SI-Vorsilben für Einheiten s. Tabelle 2-1.)

A	Ampere
ABM	Anti-ballistic missile
CEP	Circular error probable
CTBTO	Comprehensive Test Ban Treaty Organisation
D	Deuterium
eV	Elektronenvolt
GLCM	Ground-launched cruise missile
GPS	Global Positioning System
h	Stunde
H	Wasserstoff
Hz	Hertz
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
INF	Intermediate-range nuclear forces
J	Joule
K	Kelvin
kcal	Kilokalorie
kg	Kilogramm
KSE	konventionelle Streitkräfte in Europa
m	Meter
MFK	Marschflugkörper
N	Newton
Pa	Pascal
PS	Pferdestärke
PTS	Provisorisches Technisches Sekretariat
Pu	Plutonium
Radar	Radio detection and ranging
s	Sekunde
SALT	Strategic Arms Limitation Talks
SDI	Strategic Defense Initiative
SI	Système International d'Unités
sm	Seemeile (= 1,852 km)
SORT	Strategic Offensive Reductions Treaty
SPD	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
START	Strategic Arms Reduction Treaty
t	Tonne

T	Tritium
TERCOM	Terrain contour matching
TNT	Trinitrotoluol
U	Uran
UAV	Uninhabited/unmanned aerial vehicle
U-Boot	Untersee-Boot
UdSSR	Union der sozialistischen Sowjetrepubliken
USA	United States of America
V	Volt
W	Watt

Literatur

Grundlegende Literatur

Allgemeine Physik: Breuer 1987, 1988.

Physik und gesellschaftliche Bezüge (Energie, Rüstung, Philosophie): Hobson 1999.

Physik/Naturwissenschaft und neue Waffen: Brodie 1973; Craig/Jungerman 1986; Schroerer 1984.

Wirkungen von Kernwaffen: Glasstone/Dolan 1977.

Rüstungskontrollverträge: Abrüstung 1983; <http://www.armscontrol.de>, Dokumente.

Allgemein: <https://de.wikipedia.org>, <https://en.wikipedia.org>.

Zum Nach- und Weiterlesen

Abrüstung – Nachrüstung – Friedenssicherung, München: dtv, 1983.

D. Albright, S. Kelleher-Vergantini, D. Schnur, Civil Plutonium Stocks Worldwide End of 2014, Washington DC: Institute for Science and International Security, November 16, 2015, http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/Civil_Plutonium_Stocks_Worldwide_March_14_2015_FINAL.pdf.

J. Altmann, Acoustic Weapons – A Prospective Assessment, Science and Global Security 9 (3), 165-234, 2001.

J. Altmann, Military Nanotechnology – Potential Applications and Preventive Arms Control, Abingdon/New York: Routledge, 2006.

J. Altmann, Arms Control for Armed Uninhabited Vehicles – An Ethical Issue, Ethics and Information Technology, vol. 15 no. 2, 137-152, 2013.

H. Breuer, dtv-Atlas zur Physik, Bd. 1/2, München: dtv, 1987/1988.

H.L. Brode, Review of Nuclear Weapons Effects, Annual Review of Nuclear Science, vol. 18, 153-202, 1968.

B. Brodie, F.M. Brodie, From Crossbow to H-Bomb – The evolution of the weapons and tactics of warfare, revised and enlarged edition, Bloomington IN: Indiana University Press, 1973.

- T.B. Cochran, W.M. Arkin, M.M. Hoenig, *Nuclear Weapons Databook, Volume I – U.S. Nuclear Forces and Capabilities*, Cambridge MA: Ballinger, 1984.
- T.B. Cochran, W.M. Arkin, R.S. Norris, J.I. Sands, *Nuclear Weapons Databook, Volume IV – Soviet Nuclear Weapons*, New York: Harper&Row, 1989.
- Committee for the Compilation of Materials on Damage Caused by the Atomic Bombs in Hiroshima and Nagasaki, *Hiroshima and Nagasaki – The Physical, Medical, and Social Effects of the Atomic Bombings*, New York, Basic, 1981.
- P.P. Craig, J.A. Jungerman, *Nuclear Arms Race – Technology and Society*, New York etc.: McGraw-Hill, 1986.
- N.C. Crawford, *War-related Death, Injury, and Displacement in Afghanistan and Pakistan 2001-2014*, Cost of War Project, Brown University, 2015.
- P.J. Crutzen, J. Hahn (Hg.), *Schwarzer Himmel – Auswirkungen eines Atomkrieges auf Klima und globale Umwelt – Kurzfassung des SCOPE-Berichts „Environmental Consequences of Nuclear War“*, Frankfurt/M.: Fischer, 1985.
- CTBTO (Comprehensive Test Ban Treaty Organization), 6 January 2016 – North Korea – Announced Nuclear Test, 2016, <https://www.ctbto.org/the-treaty/developments-after-1996/2016-dprk-announced-nuclear-test>.
- H. Fischer, R. Labusch, E. Maus, J. Scheffran, *Entwurf eines Vertrages zur Begrenzung der militärischen Nutzung des Weltraums*, in: R. Labusch, E. Maus, W. Send (Hg.), *Weltraum ohne Waffen*, München: Bertelsmann, 1984.
- A. Glaser, *The Conversion of Research Reactors to Low-Enriched Fuel and the Case of the FRM-II*, *Science & Global Security* 10 (1), 61-79, 2002.
- A. Glaser, *Neutronics Calculations Relevant to the Conversion of Research Reactors to Low Enriched Fuel*, Dissertation, TU Darmstadt, 2005.
- A. Glaser, *On the Proliferation Potential of Uranium Fuel for Research Reactors at Various Enrichment Levels*, *Science & Global Security* 14 (1), 1-24, 2006.
- S. Glasstone, P.J. Dolan (eds.), *The Effects of Nuclear Weapons*, Washington DC: US Department of Defense/US Energy Research and Development Administration, 1977 (als pdf von <http://nnsa.energy.gov/sites/default/files/nnsa/inlinefiles/glasstone%20and%20dolan%201977.pdf>).
- H.-P. Harjes, H. Aichele, H. Rademacher, *Es kommt auf den politischen Willen an: Ein seismisches Netz zur Erfassung unterirdischer Nuklearexplosionen*, in H.-P. Dürr u. a. (Hg.), *Verantwortung für den Frieden – Naturwissenschaftler gegen Atomrüstung*, Reinbek: Rowohlt, 1983.
- M.A. Harwell, *Nuclear Winter – The Human and Environmental Consequences of Nuclear War*, New York etc.: Springer, 1984.
- A. Hobson, *Physics: Concepts and Connections*, 5th edition, Boston MA: Pearson Addison-Wesley, 2010.
- Human Rights Watch, *Civilian Deaths in the NATO Air Campaign*, February 2000, <http://www.hrw.org/reports/2000/nato/index.htm>.
- IPFM (International Panel on Fissile Materials), *Global Fissile Material Report 2015: Nuclear Weapon and Fissile Material Stockpiles and Production*, December 2015, <http://fissilematerials.org/library/gfmr15.pdf>.
- G.F. Kinney, K.J. Graham, *Explosive Shocks in Air*, Berlin etc.: Springer, 1985.
- H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*, Stuttgart: Teubner, 2004.

- H.M. Kristensen, R.S. Norris, Global nuclear weapons inventories, 1945–2013, *Bulletin of the Atomic Scientists* 69 (5), 75–81, 2013.
- H.M. Kristensen, R.S. Norris, United States nuclear forces 2016, *Bulletin of the Atomic Scientists* 72 (2), 63–73, 2016.
- H.M. Kristensen, R.S. Norris, Russian nuclear forces 2016, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 72 (3), 125–134, 2016a.
- M. Leitenberg, Deaths in Wars and Conflicts Between 1945 and 2000, Occ. Paper no. 29, 3rd edition, Ithaca NY: Peace Studies Program, Cornell University, August 2006, <https://pacs.einaudi.cornell.edu/sites/pacs/files/Deaths-Wars-Conflicts3rd-ed.pdf>.
- W. Liebert, Proliferationsresistenz: Risiken und notwendige Schritte zur effektiven Eindämmung der nuklearen Proliferation, in G. Neuneck, C. Mölling (Hg.), *Die Zukunft der Rüstungskontrolle*, Baden-Baden: Nomos, 2005.
- M.G. McKinzie, T.B. Cochran, R.S. Norris, W.M. Arkin, *The U.S. Nuclear War Plan: a Time For Change*, Washington DC: Natural Resources Defense Council, 2001.
- R. Nelson, Low-Yield Earth-Penetrating Nuclear Weapons, *Science & Global Security* 10 (1), 1–20, 2002.
- P. Podvig (ed.), *Russian Strategic Nuclear Forces*, Cambridge MA/London: MIT Press, 2001.
- D. Schroerer, *Science, Technology, and the Nuclear Arms Race*, New York etc.: Wiley, 1984.
- R. Serber, *Los Alamos Primer – The First Lectures on How To Build an Atomic Bomb*, Berkeley CA etc.: University of California Press, 1992.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment, *The Effects of Nuclear War*, Washington DC: U.S. Government Printing Office, 1979, <http://ota.fas.org/reports/7906.pdf>.
- Wikipedia, Zweiter Golfkrieg, https://de.wikipedia.org/wiki/Zweiter_Golfkrieg, 2016.
- Wikipedia, Irakkrieg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Irakkrieg>, 2016a.
- Wikipedia, Bürgerkrieg in Syrien, https://de.wikipedia.org/wiki/Bürgerkrieg_in_Syrien, 2016b.

Naturwissenschaft - Rüstung - Frieden

Basiswissen für die Friedensforschung

Altmann, J.; Bernhardt, U.; Nixdorff, K.; Ruhmann, I.;

Wöhrle, D.

2017, XXI, 573 S. 106 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-01973-0