

**W****W**

- Wolfram
- Watt

**Wahrnehmungszeit**

Zeit, die zwischen Einwirkung und Wahrnehmung eines Reizes vergeht.

Bei der visuellen Wahrnehmung handelt es sich um die Wahrnehmung von in Form und Leuchtdichteunterschied zur Umgebung charakterisierten Details. Die W. für Leuchtdichteunterschiede ist um so kleiner, je größer diese sind, je höher die mittlere Leuchtdichte im Bild und je besser die Adaptation ist:

Bei der Formerkennung hängt die W. von der Lichtfarbe, der Leuchtdichte, der Größe des Sehwinkels, unter dem das Detail gesehen wird, und vom Kontrast ab.

Weiter spielen physiologische Einflüsse, Erfahrung und Intelligenz eine große Rolle "lange Leitung", so daß quantitative Aussagen problematisch sind.

**Wahrscheinlichkeit**

**P**; Führt man eine Anzahl  $n$  Versuche aus, bei denen  $n_1$  mal das Ereignis  $E$  eintritt, so ist das Verhältnis  $n_1/n$  die relative Häufigkeit des Ereignisses  $E$ .

Die W. ist der Grenzfall der relativen Häufigkeit für große  $n$ .

Da  $n_1$  nur zwischen Null und  $n$  liegen kann, ist die W. eine Zahl zwischen Null und Eins.

Auch die Angabe in Prozent (0–100%) ist üblich.

Für sichere Ereignisse ( $n_1 = n$ ) gilt  $P = 1$ , für unmögliche ( $n_1=0$ ) ist  $P = 0$

**Wandstativ**

Vorrichtung, meistens bestehend aus Säule mit Tragarm zur Halterung und Verstellung eines Röntgenstrahlers, die an der Wand fest oder schienengebunden beweglich angebracht ist.

**Wärme**

Formelzeichen:  $Q$ ; Wärme ist in der Physik die Energie, die zwischen zwei thermodynamischen Systemen lediglich aufgrund eines Temperaturunterschieds übertragen wird. Beide Systeme ändern dabei ihren Zustand.

Wärme fließt stets vom Ort höherer Temperatur zum Ort tieferer Temperatur. Der Wärmetransport kann durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung oder ein strömendes Medium (Konvektion) erfolgen. In vielen Fällen steigt dabei die tiefere und verringert sich die höhere der beiden Temperaturen, aber es gibt auch Ausnahmen, wenn z. B. Eis von 0 °C sich durch Wärmezufuhr in Wasser von 0 °C umwandelt.

Alle anderen Energieformen, die von einem System auf ein anderes übergehen, werden zusammenfassend als Arbeit bezeichnet. Die Summe von Wärme und Arbeit bestimmt die Änderung der inneren Energie jedes Systems (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Während Arbeit stets mit einer Änderung von äußeren Parametern verbunden ist, wie z. B. Vergrößerung oder Verkleinerung der räumlichen Ausdehnung, verändert Wärme die Entropie des betreffenden Systems. Eine Maschine, die fortwährend Wärme aufnimmt und Arbeit leistet, heißt Wärmekraftmaschine. Aus prinzipiellen Gründen, die der 2. Hauptsatz der Thermodynamik näher beschreibt, muss dabei ein Teil der aufgenommenen Wärme als Abwärme abgeführt werden. Eine kontinuierliche Umwandlung von Wärme in Arbeit kann daher nicht vollständig erfolgen

In der grundlegenden Erklärung der thermodynamischen Phänomene durch die statistische Mechanik besteht jedes System aus einer Vielzahl einzelner Teilchen, die auf verschiedene Energieniveaus verteilt sind. Sie wechseln statistisch fluktuierend zu anderen Niveaus, wobei aber im Gleichgewichtszustand die durchschnittliche Besetzungszahl jedes Niveaus gleich bleibt und in Form einer statistischen Verteilung festgelegt ist. Zufuhr oder Abgabe von Wärme beeinflusst die durchschnittlichen Besetzungszahlen, während Arbeit, die am System oder vom System geleistet wird, die Energien der einzelnen Energieniveaus anhebt bzw. absenkt.

Die international verwendete Einheit für Wärme ist das Joule, früher war auch Kalorie üblich.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die physikalische Wärme häufig mit den Begriffen Wärmehalt oder thermische Energie verwechselt. Diese sind in der Physik jedoch Zustandsgrößen. Ihre Werte bestimmen sich daher allein durch den momentanen Systemzustand (z. B. gegeben durch Druck, Tempe-

ratur, sowie Art und Menge des Stoffes). Die Größe einer Wärmemenge hängt nach der physikalischen Definition aber erstens von einem Anfangs- und einem Endzustand ab, sowie zweitens davon, wie der Prozess abläuft, der den einen in den anderen überführt. Wärme ist in der Physik keine Zustandsgröße, sondern eine Prozessgröße.

## Wärmeenergie

Energieform, die eine ganz bestimmte physiolog. Empfindung im menschl. Organismus hervorruft.

Es ist die kinetische Energie der ungeordneten Bewegung der Moleküle. Bewegung der Moleküle durch Bewegung der Körper als Ganzes trägt nicht zur Wärme eines Körpers bei. Wärmemengen wurden in Kalorien gemessen. Die SI-Einheit ist das Joule (J).

$$\begin{array}{l} \text{Es gilt} \\ 1 \text{ Kalorie (cal)} = 4,19 \text{ J} \\ 1 \text{ J} = 0,239 \text{ cal} \end{array}$$

## Wärmeabgabe des Röntgenstrahlers

### DIN 6814

Die höchste kontinuierliche Wärmeabgabe ist der Wert der Eingangsleistung des Röntgenstrahlers, der im Röntgenstrahler in einer Umgebung mit einer Temperatur zwischen 20 °C und 25 °C und unter angegebenen Bedingungen dauernd zugeführt werden kann, ohne daß der Röntgenstrahler die höchste zulässige Temperatur überschreitet.

## Wärmeinhalt der Anode

### DIN 6814

Der Wärmeinhalt der Anode ist die Wärmemenge, die in der Anode einer Röntgenröhre während der Röntgenröhrenbelastung gespeichert bzw. nach der Belastung in ihr enthalten ist.

## Wärmeinhalt des Röntgenstrahlers

### DIN 6814

Der Wärmeinhalt des Röntgenstrahlers ist die Wärmemenge, die während der Röntgenröhrenbelastung in dem Röntgenstrahler gespeichert wird bzw. nach der Belastung in ihm enthalten ist.

## Wärmekapazität

Formelzeichen C

Quotient aus der einem Körper zugeführten Wärmemenge und der dadurch bewirkten Temperaturerhöhung.

Die Wärmekapazität ist gleich dem Produkt aus Masse und spezifischer Wärmekapazität des Körpers.

SI-Einheit ist Joule pro Kelvin (J/K), früher cal/Grad.

### spezifische Wärmekapazität

(früher spezifische Wärme), Formelzeichen c, SI-Einheit ist J/(kg·K)

Die auf die Masse m bezogene Wärmekapazität.

Die spezifische Wärmekapazität c gibt an, welche Wärme Q einer Masse m zuzuführen bzw. zu entziehen ist, um seine Temperatur um die Differenz  $\Delta t$  zu ändern.

Sie ist zahlenmäßig gleich der Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1kg eines Stoffes um 1K zu erwärmen.

Man unterscheidet die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen ( $c_v$ ) und die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck ( $c_p$ ), es gilt stets  $c_p > c_v$ . (Dulong-Petit-Regel)

$$\text{Es ist:} \quad 1 \text{ cal/g} \cdot \text{Grad} = 4,19 \text{ J} \cdot \text{g} \cdot \text{Grad}$$

$c_p$  : Isobare Wärmekapazität (Temperaturänderung erfolgt bei der Bestimmung von  $c_p$  unter Konstanthaltung des Druckes p)

$c_v$  : Isochrone Wärmekapazität (Temperaturänderung erfolgt bei der Bestimmung von  $c_v$  unter Konstanthaltung des Volumens v)

Kappa  $\kappa$  = Verhältnis der isobaren zur isochoren Wärmekapazität

### Dulong-Petit-Regel

Näherungsregel, nach der die molare Wärmekapazität (Atomwärme) für alle festen Elemente unabhängig von der absoluten Temperatur ist und  $3R \approx 25 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$  beträgt ( $R$  universelle Gaskonstante).

Die Dulong-Petit-Regel lässt sich aus der kinetischen Theorie der Wärme ableiten.

### Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\alpha$ , auch spezifisches Wärmeleitvermögen oder Wärmeleitfähigkeit genannt, ist eine für die Wärmeleitung in isotropen Medien, also in Medien, die nach allen Richtungen hin gleiche Eigenschaften aufweisen, maßgebliche Konstante  $\lambda$ .

Die Wärmeleitfähigkeit ist vom Material abhängig und hat die SI-Einheit

$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Die Wärmeleitfähigkeit wird definiert durch die Gleichung  $q = \lambda \times F \times dT/dx$

wobei  $q$  der durch einen konstanten Querschnitt  $F$  hindurchgehende Wärmestrom (der auf eine Zeiteinheit entfallende Energietransport) ist, wenn die auf die Strecke  $dx$  fallende Temperaturänderung (unabhängig von der Zeit)  $dT$  beträgt.

### Wärmemenge

Die in einem Körper enthaltene, ihm zugeführte oder entzogene Wärmeenergie

Einheit: Joule

### Wärmespeicherfähigkeit der Anode

#### DIN 6814

Die Wärmespeicherfähigkeit der Anode ist der höchste zugelassene Wärmeinhalt, den die Anode einer Röntgenröhre während der Röntgenröhrenbelastung erreichen darf.

Bei Röntgenröhren die Energie, die von der Anode beim Betrieb aufgenommen werden kann. Sie wird in Wattsekunden oder Wärmeeinheiten (Heat units, HU) angegeben und liegt für Diagnostikröhren bei etwa 100.000 – 1.000.000 J.

1 J = 1,35 HU

Die W. kann bei Graphit-Verbundanoden auf etwa das Doppelte (bei gleichem Tellergewicht) von Metalltellern gesteigert werden, da die spezifische Wärme von Graphit bei 1.000 °C etwa 6-mal (12-mal) so groß wie die von Molybdän (Wolfram) ist.

### Wärmespeicherfähigkeit des Röntgenstrahlers

#### DIN 6814

Die Wärmespeicherfähigkeit des Röntgenstrahlers ist sein höchster zugelassener Wärmeinhalt, der seiner höchsten zulässigen Temperatur bei einer Umgebungstemperatur zwischen 20 °C und 25 °C entspricht.

## Wärmeübergangszahl

$\alpha$

Die Wärmeübergangszahl, auch Wärmeübergangskoeffizient genannt, soll alle Einflüsse der Materialeigenschaften und der Strömungsvorgänge bei Flüssigkeiten bzw. bei Gasen berücksichtigen.

Sie ist unter anderem von den geometrischen Verhältnissen abhängig und nimmt mit dem Temperaturunterschied zu. Die Wärmeübergangszahlen hängen sehr stark von den speziellen Bedingungen ab und sind experimentell zu bestimmen.

## Wärmeverlust bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen

Etwa 99 %.

Im Spannungsbereich der Röntgendiagnostik wird der überwiegende Teil der kinetischen Energie der Kathodenelektronen an der Anode in Wärmeenergie umgewandelt. Diese entsteht durch die Wechselwirkung der Kathodenelektronen mit den elektrischen Kraftfeldern der Hüllenelektronen und der Atomkerne des Anodenmaterials (Energieverlust und Ablenkung der Kathodenelektronen). Weniger als 1 % wird in Röntgenstrahlen umgesetzt. Anders ist dagegen der Wirkungsgrad von Elektronenbeschleunigern in der Hochvolttherapie, bei der mehr Röntgenstrahlung als Wärme entsteht.

## Wärmeverstärkungsfaktor

TER

Bei der mit Wärmeanwendung Hyperthermie kombinierten Strahlentherapie das Verhältnis der für eine bestimmte Wirkung erforderlichen Strahlendosis  $D_0$  zu der Dosis für die gleiche Wirkung bei zusätzlicher Hyperthermie  $D_{Hyp}$ .

Im Falle der Wirksamkeit der Hyperthermie gilt  $TER > 1$

## Wasserphantom

Ein Wasserphantom ist ein mit destilliertem Wasser gefüllter Plexiglasbehälter, der stellvertretend für lebendes Gewebe zur Überprüfung von in der Strahlentherapie verwendeten Elektronen-Linearbeschleunigern verwendet wird. Wasser weist eine dem lebenden Gewebe vergleichbare Durchgängigkeit für ionisierende Strahlung der eingesetzten Quellen auf. Überprüfungen mittels Wasserphantom müssen nach gesetzlich bestehenden Vorschriften etwa im Abstand von drei Monaten durchgeführt werden, damit sichergestellt ist, dass die am Therapiegerät für einen bestimmten Punkt im Raum, bzw. im Körper oder eben im Wasserphantom eingestellte und gemäß Bestrahlungsplan vorgesehene Strahlungsleistung dort auch in genau dieser Stärke auftritt. Die Überprüfung mittels Wasserphantom wird durch den in der radiologischen Praxis nach der Strahlenschutzverordnung und der Röntgenverordnung eingesetzten Medizinphysiker oder durch externe Prüfingenieure durchgeführt und dokumentiert.

In einem dreidimensionalen Wasserphantom werden nach DIN 6448 Kontrollen der Tiefendosisverläufe und Querprofile durchgeführt. Notwendig sind diese Prüfungen im Rahmen der Strahlentherapie, da die mittels Wasserphantom gemessene Dosis mit der berechneten Dosis des Bestrahlungsplanungssystems übereinstimmen muss. Der Inhalt des Wasserphantoms ist bevorzugterweise destilliertes Wasser, da es besser als gewöhnliches Wasser zu lebendem Gewebe vergleichbare Ergebnisse liefert. Im Wasser ist ein fahrbares Dosimeter angebracht, das den gesamten Bereich abfährt und jeweils eine Dosismessung durchführt. Die gesammelten Messungen werden schließlich graphisch im Tiefendosisprofil und im Querprofil aufgetragen.

## Wasserstoff

Hydrogenium

Chem. Zeichen	<b>H</b>			
Ordnungszahl	1			
Atomgewicht	1,00794			
Massenzahl	1 [2			
Radioisotope		$T_{1/2}$	Energie [MeV]	
	3	12 a	$\beta = 0,02$	
Dichte	0,08988 g/l bei 0 °C			
Schmelzpunkt	-259,14 °C			

## Lex W

Siedepunkt	-252,87 °C
spez. Wärmekapazität	14.304 J/(g*K)
Wärmeleitfähigkeit	1,815 W/(m*K)
Nukleonenzahl	
Elektronegativität	2,10 [Oxidationsstufe]
Häufigstes Isotop	99,985 %
1. Ionisationspotential	13,598 V
1. Ionisierungsenergie	5.8680 <sup>-0002</sup> kJ/mol bei 25 °C
Verdampfungsenergie	0,44936 kJ/mol
Ionenradius (Oxidationszahl)	pm ()
Atomradius	0,79 pm
Kovalenzradius	0,32
Kerndurchmesser	10 <sup>-12</sup>
Atomdurchmesser	10 <sup>-8</sup>
Masse des Protons m <sub>p</sub>	1,67 · 10 <sup>-24</sup> g = 1840 m <sub>e</sub>
Masse des Elektrons m <sub>e</sub>	9,11 · 10 <sup>-28</sup> g
Atomvolumen	14,40 cm <sup>3</sup> /mol
Elektronenkonfiguration	1
I. Hauptgruppe	
Umlaufgeschwindigkeit des Elektrons	2.000 km/s
Umlauffrequenz	10 <sup>16</sup> Hz

Wasserstoff ist ein chemisches Element mit dem Symbol H (für lateinisch hydrogenium „Wassererzeuger“; von altgriechisch ὕδωρ hydōr „Wasser“ und γίγνομαι gignomai „werden, entstehen“) und der Ordnungszahl 1. Im Periodensystem steht es in der 1. Periode und der 1. Gruppe, nimmt also den ersten Platz ein.

Wasserstoff ist das häufigste chemische Element im Universum, jedoch nicht in der Erdrinde. Er ist Bestandteil des Wassers und beinahe aller organischen Verbindungen. Somit kommt gebundener Wasserstoff auch in sämtlichen lebenden Organismen vor.

Wasserstoff ist das leichteste der chemischen Elemente. Das häufigste Isotop enthält kein Neutron, besteht aus nur einem Proton sowie einem Elektron und wird auch Protium genannt. Unter Bedingungen, die normalerweise auf der Erde herrschen (siehe auch Normalbedingungen), kommt dieser atomare Wasserstoff nicht vor, stattdessen liegt Wasserstoff in der dimerisierten Form vor, dem molekularen Wasserstoff  $H_2$ , einem farb- und geruchlosen Gas. Dennoch kommt es vor, dass bei bestimmten chemischen Reaktionen Wasserstoff sehr kurz atomar als H, bezeichnet als Status nascendi, auftritt und mit anderen Verbindungen oder Elementen reagiert.

### Geschichte

Entdeckt wurde Wasserstoff vom englischen Chemiker und Physiker Henry Cavendish im Jahre 1766, als er mit Metallen (Eisen, Zink und Zinn) und Säuren experimentierte. Cavendish nannte das dabei entstandene Gas wegen seiner Brennbarkeit "inflammable air". Er untersuchte das Gas eingehend und veröffentlichte seine Erkenntnisse darüber noch im selben Jahr.

Eine genauere Analyse geschah durch Antoine Laurent de Lavoisier, der dem Wasserstoff auch seinen Namen gab. Der französische Chemiker entdeckte das Gas im Jahr 1787 unabhängig von Cavendish, als er in einem Experiment zeigen wollte, dass bei chemischen Reaktionen keine Masse verloren geht oder erzeugt wird. Er leitete Wasserdampf in einer abgeschlossenen Apparatur über glühende Eisen-späne und ließ ihn an anderer Stelle kondensieren. Dabei stellte er fest, dass die Masse des kondensierten Wassers etwas geringer war als die der ursprünglichen Menge. Dafür entstand ein Gas, dessen Masse zusammen mit dem Gewichtszuwachs des oxidierten Eisens genau der „verlorengegangenen“ Wassermenge entsprach. Sein eigentliches Experiment war also erfolgreich.

Lavoisier untersuchte das entstandene Gas weiter und führte die heute als Knallgasprobe bekannte Untersuchung durch, wobei das Gas verbrannte. Er nannte es daher zunächst „brennbare Luft“. Als er in weiteren Experimenten zeigte, dass sich aus dem Gas umgekehrt auch Wasser erzeugen lässt, taufte er es hydro-gène (griechisch: *hydro* = Wasser; *genes* = erzeugend). Das Wort bedeutet demnach: „Wasserbildner“. Die deutsche Bezeichnung lässt auf die gleiche Begriffsherkunft schließen.

### Vorkommen

Wasserstoff ist das häufigste chemische Element in der Sonne und den großen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, die über 99,99 % der Masse des Sonnensystems in sich vereinen. Wasserstoff stellt 75 % der gesamten Masse beziehungsweise 93 % aller Atome des Sonnensystems. Im gesamten Weltall wird (unter Nichtbeachtung dunkler Materie) ein noch höherer Anteil an Wasserstoff vermutet.

### Vorkommen im Universum

Schon kurz nach der Entstehung des Universums waren Protonen und Neutronen in überwältigender Zahl vorhanden. Bei den vorherrschenden hohen Temperaturen vereinigten sich diese zu leichten Atomkernen, wie  $^2H$  und  $^4He$ . Die meisten Protonen blieben allerdings unverändert und stellten die zukünftigen  $^1H$ -Kerne dar. Nach ungefähr 380.000 Jahren war die Strahlungsdichte des Universums so gering geworden, dass sich Wasserstoff-Atome einfach durch Zusammenschluss der Kerne mit den Elektronen bilden konnten ohne gleich wieder durch ein Photon auseinander gerissen zu werden.

Mit der weitergehenden Abkühlung des Universums formten sich unter dem Einfluss der Gravitation und ausgehend von räumlichen Dichteschwankungen allmählich Wolken aus Wasserstoffgas, die sich zunächst großräumig zu Galaxien und darin zu Protosternen zusammenballten. Unter dem wachsenden Druck der Schwerkraft setzte schließlich die Kernfusion ein, bei der Wasserstoff zu Helium verschmilzt. So entstanden erste Sterne und auch die Sonne.

Sterne bestehen weit überwiegend aus Wasserstoff-Plasma. Die Kernfusion von Wasserstoff  $^1H$  erfolgt hauptsächlich über die Zwischenstufen Deuterium  $^2H$  und Tritium  $^3H$  zu Helium  $^4He$ . Die dabei frei werdende Energie ist die Energiequelle der Sterne. Der in unserer Sonne enthaltene Wasserstoff macht den größten Teil der gesamten Masse unseres Sonnensystems aus.

Aber auch die schweren Gasplaneten bestehen zu großen Teilen aus Wasserstoff, was den Massenanteil des Elements im Sonnensystem weiter erhöht. Unter den extremen Drücken, die in großen Tiefen in den großen Gasplaneten Jupiter und Saturn herrschen, kann er in metallischer Form existieren. Dieser Zustand ist wegen der elektrischen Leitfähigkeit vermutlich für die Ausbildung der planetaren Magnetfelder verantwortlich.

Außerhalb unseres Sonnensystems kommt Wasserstoff auch in gigantischen Gaswolken vor. In den so genannten H-I-Gebieten liegt das Element nichtionisiert und molekular vor. Diese Gebiete emittieren Strahlung von etwa 1420 MHz, die sogenannte 21-cm-Linie, auch HI- oder Wasserstofflinie genannt, die von Übergängen des Gesamtdrehimpulses herrührt. Sie spielt eine wichtige Rolle in der Astronomie und dient dazu, Wasserstoffvorkommen im All zu lokalisieren und zu untersuchen.

Ionisierte Gaswolken mit atomarem Wasserstoff nennt man dagegen H-II-Gebiete. In diesen Gebieten strahlen große Sterne hohe Mengen ionisierende Strahlung ab. Mit ihrer Hilfe lassen sich Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der interstellaren Materie ziehen. Wegen ständiger Ionisation und Rekombination der Atome senden sie mitunter sichtbare Strahlung aus, die oft so stark ist, dass man diese Gaswolken mit einem relativ kleinen Fernrohr sehen kann.

### **Irdische Vorkommen**

Auf der Erde ist der Massenanteil wesentlich geringer. Bezogen auf die Erd-Gesamtmasse bestehen etwa 0,12 % und bezogen auf die Erdkruste etwa 2,9 % aus Wasserstoff. Außerdem liegt der irdische Wasserstoff im Gegensatz zu den Vorkommen im All überwiegend gebunden und nur selten in reiner Form als unvermishtes Gas vor. Die bekannteste und am häufigsten auftretende Verbindung ist das Wasser. Neben diesem sind auch Erdgase wie z. B. Methan sowie das Erdöl wichtige wasserstoffhaltige Verbindungen auf der Erde. Auch in mehr als der Hälfte aller bisher bekannten Minerale ist Wasserstoff enthalten.

Der größte Anteil irdischen Wasserstoffs kommt in der Verbindung Wasser vor. In dieser Form bedeckt er über zwei Drittel der Erdoberfläche. Die gesamten Wasservorkommen der Erde belaufen sich auf circa 1,386 Milliarden  $\text{km}^3$ . Davon entfallen 1,338 Milliarden  $\text{km}^3$  (96,5 %) auf Salzwasser in den Ozeanen. Die verbliebenen 3,5 % liegen als Süßwasser vor. Davon befindet sich wiederum der größte Teil im festen Aggregatzustand: in Form von Eis in der Arktis und Antarktis sowie in den Permafrostböden vor allem in Sibirien. Der geringe restliche Anteil ist flüssiges Süßwasser und findet sich meist in Seen und Flüssen, aber auch in unterirdischen Vorkommen, etwa als Grundwasser.

In der Erdatmosphäre liegt Wasserstoff hauptsächlich chemisch gebunden in Form von Wasserdampf vor. Dessen Anteil an der Luft schwankt stark und liegt bei bis zu über 4 Volumenprozent. Er wird als relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Diese gibt den Anteil an Wasserdampf im Verhältnis zum temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck an. Beispielsweise entsprechen bei 30 °C Lufttemperatur 100 % Luftfeuchtigkeit 4,2 Volumenprozent Wasserdampf in der Luft.

Die Häufigkeit von molekularem Wasserstoff in der Atmosphäre beträgt nur 0,55 ppm. Dieser niedrige Anteil kann mit der hohen thermischen Geschwindigkeit der Moleküle und dem hohen Anteil an Sauerstoff in der Atmosphäre erklärt werden. Bei der mittleren Temperatur der Atmosphäre bewegen sich die  $\text{H}_2$ -Teilchen im Durchschnitt mit fast 7.000 km/h. Das ist rund ein Sechstel der Fluchtgeschwindigkeit auf der Erde. Aufgrund der Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Geschwindigkeiten der  $\text{H}_2$ -Moleküle gibt es aber dennoch eine beträchtliche Zahl von Molekülen, welche die Fluchtgeschwindigkeit trotzdem erreichen. Die Moleküle haben jedoch nur eine extrem geringe freie Weglänge, sodass nur Moleküle in den oberen Schichten der Atmosphäre tatsächlich entweichen. Weitere  $\text{H}_2$ -Moleküle kommen aus darunter liegenden Schichten nach, und es entweicht wieder ein bestimmter Anteil, bis letztlich nur noch Spuren des Elements in der Atmosphäre vorhanden sind. Zudem wird der Wasserstoff in den unteren Schichten der Atmosphäre durch eine photoaktivierte Reaktion mit Sauerstoff zu Wasser verbrannt. Bei einem geringen Anteil stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Verbrauch und Neuproduktion (durch Bakterien und photonische Spaltung des Wassers) ein.

### **Molekularer Wasserstoff**

Einfache chemische Prozesse zur Produktion von  $\text{H}_2$  sind die Reaktion verdünnter Säuren mit unedlen Metallen (z. B. Zink) oder die Zersetzung des Wassers durch Alkalimetalle. Diese, im chemischen Laboratorium für kleine Mengen üblichen Methoden, sind aber für die industrielle Herstellung ungeeignet und unwirtschaftlich.

Eine Methode zur industriellen Gewinnung von molekularem Wasserstoff ist die Dampfreformierung. Unter hoher Temperatur und hohem Druck werden Kohlenwasserstoffe mit Wasser umgesetzt. Dabei entsteht Synthesegas, ein Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff. Das Mengenverhältnis kann dann durch die sogenannte Wassergas-Shift-Reaktion eingestellt werden. Diese Methode wird hauptsächlich für industrielle Hochdrucksynthesen eingesetzt. Die zweite gängige Methode in der Industrie ist die partielle Oxidation. Hierbei reagiert meistens Erdgas mit Sauerstoff unter Bildung von  $\text{H}_2$  und Kohlenmonoxid.

Eine alte und effiziente Möglichkeit zur Wasserstoffgewinnung ist die Elektrolyse von Wasser. Dabei wird Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten.

Wasser wird durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten.

Meist wird dem Wasser ein wenig Säure zur Katalyse der Reaktion zugesetzt. An der Kathode entsteht Wasserstoffgas, an der Anode Sauerstoffgas, im Mol- und Volumenverhältnis 2:1.

Diese Methode wird heute allerdings nur noch in sehr geringem Umfang eingesetzt, vor allem zur Gewinnung von „schwerem Wasser“, das sich bei der Elektrolyse im nicht umgesetzten Rest anreichert.

Eine sehr moderne Methode ist das Kväerner-Verfahren. Dabei zerlegt ein Plasmabrenner Kohlenwasserstoffe zu Kohlenstoff und Wasserstoff und erreicht dabei enorm hohe Wirkungsgrade. Ein anderes modernes Verfahren bedient sich der Grünalgen. Hier kommen biologische Prozesse zum Einsatz. Die benötigte Energie entnehmen die Algen einfach dem Sonnenlicht. Das Verfahren ist also sehr ökologisch. Allerdings verursacht der Unterhalt der Algen hohe Kosten und ist somit wenig ökonomisch und wird deshalb kaum angewendet.

### Atomarer Wasserstoff

Atomarer Wasserstoff kann durch Zufuhr der Dissoziationsenergie aus dem molekularen Element erzeugt werden. Methodisch wird dieses bewerkstelligt durch Erhitzung auf mehrere tausend Grad, elektrische Entladung bei hoher Stromdichte und niedrigem Druck, Bestrahlung mit Ultraviolettlicht, Beschuss mit Elektronen bei 10 bis 20 Elektronenvolt oder Mikrowellenstrahlung. Allerdings reagiert atomarer Wasserstoff sehr schnell wieder zu molekularem Wasserstoff. Es stellt sich somit ein Fließgleichgewicht ein, das in der Regel weit auf der Seite des molekularen Wasserstoffs liegt.

Durch Energiezufuhr dissoziiert molekularer Wasserstoff in die atomare Form.

Zur Darstellung von größeren Mengen atomaren Wasserstoffs sind das Woodsche Darstellungsverfahren (Robert Williams Wood, 1898) und dasjenige von Irving Langmuir besonders geeignet.

### Physikalische Eigenschaften

Wasserstoff ist das Element mit der geringsten Dichte. Molekularer Wasserstoff ( $H_2$ , ein Molekül besteht also jeweils aus 2 Wasserstoffatomen) ist etwa 14,4-mal leichter als Luft. Sein Siedepunkt liegt bei 20,27 Kelvin, der Schmelzpunkt bei 14,02 Kelvin ( $-259\text{ °C}$ ). Die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser beträgt 1,6 mg/l.

Einige thermodynamische Eigenschaften (Transportphänomene) sind aufgrund der geringen Molekülmasse und der daraus resultierenden hohen mittleren Geschwindigkeit der Wasserstoffmoleküle (1770 m/s bei  $25\text{ °C}$ ) von besonderer Bedeutung, (wie z. B. beim Oberth-Effekt-Raketentreibstoff). Wasserstoff besitzt bei Raumtemperatur das höchste Diffusionsvermögen, die höchste Wärmeleitfähigkeit und die höchste Effusionsgeschwindigkeit aller Gase. Eine geringere Viskosität weisen nur drei- oder mehratomige reale Gase wie zum Beispiel n-Butan auf.

Die Mobilität des Wasserstoffs in einer festen Matrix ist, bedingt durch den geringen Molekülquerschnitt, ebenfalls sehr hoch. So diffundiert Wasserstoff durch Materialien wie Polyethylen und glühendes Quarzglas. Ein sehr wichtiges Phänomen ist die außerordentlich hohe Diffusionsgeschwindigkeit in Eisen, Platin und einigen anderen Übergangsmetallen, da es dort dann zur Wasserstoffversprödung kommt. In Kombination mit einer hohen Löslichkeit treten bei einigen Werkstoffen extrem hohe Permeationsraten auf. Hieraus ergeben sich technische Nutzungen zur Wasserstoffanreicherung, aber auch technische Probleme beim Transportieren, Lagern und Verarbeiten von Wasserstoff und Wasserstoffgemischen, da nur Wasserstoff diese räumlichen Begrenzungen durchwandert (siehe Sicherheitshinweise).

Die ersten Spektrallinien im sichtbaren Bereich, zusammengefasst in der so genannten Balmer-Serie, liegen bei 656 nm, 486 nm, 434 nm und 410 nm. Daneben gibt es weitere Serien von Spektrallinien im Infrarot- (Paschen-Serie, Brackett-Serie und Pfund-Serie) und eine im Ultraviolettbereich (Lyman-Serie) des elektromagnetischen Spektrums. Eine besondere Bedeutung in der Radioastronomie hat die 21-Zentimeter-Linie in der Hyperfeinstruktur.

In einem magnetischen Feld verhält sich  $H_2$  sehr schwach diamagnetisch. Das bedeutet, die Dichte der Feldlinien eines extern angelegten Magnetfeldes nimmt in der Probe ab. Die magnetische Suszeptibilität ist bei Normdruck  $\chi_m = -2,2 \cdot 10^{-9}$  und typischerweise einige Größenordnungen unter der von diamagnetischen Festkörpern.

Gegenüber elektrischem Strom ist  $H_2$  ein Isolator. In einem elektrischen Feld hat er eine Durchschlagsfestigkeit von mehreren Millionen Volt pro Meter.

### Aggregatzustände



Bei Temperaturen unterhalb von 20,27 Kelvin kondensiert Wasserstoff zu einer klaren, farblosen Flüssigkeit. Dieser Zustand wird auch als **LH<sub>2</sub>** abgekürzt (engl. *liquid*, „flüssig“). Senkt man die Temperatur weiter, dann geht Wasserstoff bei 14,02 Kelvin (−259,2 °C) in einen schlammartigen Zustand, genannt Slush über, bevor er gefriert und einen kristallinen Festkörper mit hexagonal dichtester Kugelpackung (hcp) bildet, wobei jedes Molekül von zwölf weiteren umgeben ist.

Anders als bei Helium tritt beim Verflüssigen von einfachem Wasserstoff (<sup>1</sup>H) keine Suprafluidität auf; prinzipiell kann aber das Isotop Deuterium (<sup>2</sup>H) suprafluid werden.

Der Tripelpunkt des Wasserstoffs, bei dem seine drei Aggregatzustände gleichzeitig vorkommen, ist einer der Fixpunkte der Internationalen Temperaturskala. Er liegt bei einer Temperatur von exakt 13,8033 Kelvin und einem Druck von 7,042 kPa. Der kritische Punkt liegt bei 33,18 K und 13,0 bar, die kritische Dichte beträgt 0,03136 g/cm<sup>3</sup> (die niedrigste kritische Dichte aller Elemente).

Unter extremen Drücken, wie sie innerhalb von Gasplaneten herrschen, wird wahrscheinlich metallischer Wasserstoff, d. h. in metallischer Form, ausgebildet. Dabei wird er elektrisch leitend (vgl. Leiterbahn).

### Atom- und kernphysikalische Eigenschaften

Ein einzelnes Wasserstoffatom besteht aus einem positiv geladenen Kern und einem negativ geladenen Elektron, das über die Coulomb-Wechselwirkung an den Kern gebunden ist. Dieser besteht stets aus einem einzelnen Proton (<sup>1</sup>H-Isotop) und je nach Isotop aus einem oder zwei zusätzlichen Neutronen (<sup>2</sup>H bzw. <sup>3</sup>H-Isotop). Das Wasserstoffatom <sup>1</sup>H wird aufgrund seines einfachen Aufbaus als „Modellatom“ in der physikalischen Beschreibung der Atome herangezogen.

So entstand aus Untersuchungsergebnissen am Wasserstoff das Bohrsche Atommodell, mit dessen Hilfe eine vergleichsweise einfache Beschreibung vieler Eigenschaften des Wasserstoffatoms möglich ist. Man stellt sich dazu vor, dass das Elektron den Kern auf einer bestimmten konzentrischen, kugelförmigen Kreisbahn umläuft. Nach Bohr kann das Elektron auch auf andere, im Abstand zum Kern genau definierte Bahnen springen, so auch auf weiter außen liegende, wenn ihm die dazu nötige Energie zugeführt wird (z. B. durch Erhitzen). Beim Rücksprung von einer äußeren auf eine innere Bahn wird jeweils eine elektromagnetische Strahlung oder Welle einer bestimmten, der frei werdenden Energie entsprechende Wellenlänge abgegeben. Mit diesem Modell lassen sich die Spektrallinien des H-Atoms erklären, die im sichtbaren Licht bei Wellenlängen von 656 nm, 486 nm, 434 nm und 410 nm liegen (Balmer-Serie); im ultravioletten Bereich liegt die Lyman-Serie mit Wellenlängen von 122 nm, 103 nm, 97 nm und 95 nm. Wichtige Serien im Infraroten sind die Paschen-Serie (1,9 µm; 1,3 µm; 1,1 µm und 1 µm) und die Brackett-Serie (4,1 µm; 2,6 µm; 2,2 µm und 1,9 µm) (in allen Serien sind hier nur die ersten vier Linien angegeben). Das Bohrsche Modell reicht aber bei der Betrachtung von Details und für andere Atome zur Erklärung der dabei beobachteten bzw. gemessenen Phänomene nicht aus.

Physikalisch korrekter ist die quantenmechanische Beschreibung. Das H-Atom ist das einzige, für das sich das Eigenwertproblem sowohl der nichtrelativistischen Schrödingergleichung als auch der relativistischen Diracgleichung analytisch, das heißt ohne den Einsatz numerischer Verfahren, lösen lässt. Das ist sonst nur für Ionen möglich, denen lediglich ein Elektron verblieben ist (beispielsweise He<sup>+</sup>, Li<sup>2+</sup>, usw.).

Andere quantenmechanische Phänomene bewirken weitere Effekte. Die Feinstruktur der Spektrallinien kommt u. a. daher, dass Bahndrehimpuls und Spin des Elektrons miteinander koppeln. Berücksichtigt man darüber hinaus auch den Kernspin, kommt man zur Hyperfeinstruktur. Eine sehr kleine, aber physikalisch besonders interessante Korrektur durch Vakuumfluktuationen ist die Lambverschiebung. Durch all diese Korrekturen wird bereits das Spektrum des Wasserstoffs zu einem komplexen Phänomen, dessen Verständnis im Rahmen der Quantenmechanik viel theoretisches Wissen erfordert.

### Kernspinzustände im H<sub>2</sub>-Molekül

Unter normalen Bedingungen ist Wasserstoffgas H<sub>2</sub> ein Gemisch zweier Molekülzustände, die sich durch die „Richtung“ ihrer Kernspins unterscheiden. Diese beiden Formen werden als *ortho*- und *para*-Wasserstoff bezeichnet (kurz o- und p-Wasserstoff). Bei o-Wasserstoff haben die Kernspins die gleiche (parallele) Richtung, während sie beim p-Wasserstoff entgegengesetzte (antiparallele) Richtung aufweisen. o-Wasserstoff ist die energiereichere Form. Die beiden Molekülzustände hängen über folgende, temperaturabhängige Gleichgewichtsbeziehung miteinander zusammen:

Die beiden Formen können unter Energieaufnahme bzw. -abgabe ineinander übergehen.

Am absoluten Nullpunkt findet man ausschließlich p-Wasserstoff. Unter Standardbedingungen liegen 25 % des Wasserstoffs als p-Form und 75 % als o-Form vor. Theoretische Berechnungen ergeben, dass der Anteil der o-Form nicht über diesen Anteil hinaus gesteigert werden kann. Die physikalischen Eigen-

schaften von o- und p-Wasserstoff sind geringfügig verschieden. So liegen beispielsweise der Schmelz- und Siedepunkt der p-Form etwa 0,1 K unter denen der o-Form.

Bei der industriellen Herstellung von flüssigem Wasserstoff spielt die Übergangsbedingung zwischen o- und p-Wasserstoff eine wichtige Rolle. Der Wechsel der Kerne in die antiparallele Orientierung (p-Wasserstoff) erfolgt beim Abkühlen nur sehr langsam, da die Wechselwirkungen zwischen den Kernen – genauer gesagt beeinflussen sich die Kerne über ihre magnetischen Momente – nur sehr schwach sind. Deswegen versucht man, die Einstellung des Gleichgewichts durch den Einsatz von Katalysatoren zu beschleunigen.

### Chemische Eigenschaften

Im Periodensystem steht Wasserstoff in der I. Hauptgruppe, weil er 1 Valenzelektron besitzt. Ähnlich wie die ebenfalls dort stehenden Alkalimetalle hat er in vielen Verbindungen die Oxidationszahl **+1**. Allerdings sitzt sein Valenzelektron auf der K-Schale, die nur maximal 2 Elektronen haben kann und somit die Edelgaskonfiguration bereits mit 2 Elektronen und nicht mit 8 wie die anderen Schalen erreicht.

Durch Aufnahme eines Elektrons kann er also die Edelgaskonfiguration des Heliums erreichen. Er hat dann die Oxidationszahl  $\square$  und in Bindungen einen Halogencharakter. Diese Bindungen geht er mit sehr unedlen Metallen ein. Man spricht dann von einem Hydrid.

Diese Stellung quasi „in der Mitte“ zwischen Edelgaskonfigurationen, in der er die gleiche Anzahl Elektronen aufnehmen oder abgeben kann, ist eine Eigenschaft, die der IV. Hauptgruppe ähnelt, was auch seine Elektronegativität erklärt, die eher der des Kohlenstoffs als der des Lithiums gleicht.

Aufgrund dieser „gemäßigten“ Elektronegativität sind die für die I. Hauptgruppe typischen Bindungen des Wasserstoffs in der Oxidationszahl **+1** keine Ionenbindungen wie bei den Alkalimetallen, sondern kovalente Molekülbindungen.

Zusammenfassend sind die Eigenschaften des Wasserstoffs für die I. Hauptgruppe atypisch, da aufgrund der Tatsache, dass die K-Schale nur 2 Elektronen aufnehmen kann, auch teilweise Eigenschaften anderer Gruppen hinzukommen.

### Molekularer Wasserstoff

#### Lewisformel des Wasserstoffmoleküls

Bei Zündung reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff und Chlor heftig, ist sonst aber vergleichsweise beständig und wenig reaktiv. Bei hohen Temperaturen wird das Gas reaktionsfreudig und geht mit Metallen und Nichtmetallen gleichermaßen Verbindungen ein.

Mit Chlor reagiert Wasserstoff exotherm unter Bildung von gasförmigem Chlorwasserstoff, der in Wasser gelöst Salzsäure ergibt. Beide Gase reagieren dabei mit gleichen Stoffmengenanteilen:

je ein Chlor- und Wasserstoffmolekül reagieren zu zwei Chlorwasserstoffmolekülen

Diese Reaktion ist unter dem Namen Chlorknallgasreaktion bekannt, die sich schon durch die Bestrahlung mit Licht zünden lässt. Für die Knallgasreaktion (Wasserstoff und Sauerstoff) bedarf es einer Zündung

je ein Sauerstoff- und zwei Wasserstoffmoleküle reagieren zu zwei Wassermolekülen

Die aggressivste Reaktion bei niedrigen Temperaturen geht jedoch Wasserstoff mit Fluor ein. Wird Wasserstoffgas bei  $-200\text{ °C}$  auf gefrorenes Fluor geleitet, reagieren die beiden Stoffe sofort explosiv miteinander.

je ein Fluor- und Wasserstoffmolekül reagieren zu zwei Fluorwasserstoffmolekülen

### Angeregter Wasserstoff

Wasserstoff im *statu nascendi*, d. h. im *Zustand des Entstehens* unmittelbar nach einer Wasserstoff erzeugenden Reaktion, existiert nur für Sekundenbruchteile. Innerhalb dieser Zeitspanne reagieren in der Regel zwei H-Atome miteinander. Aber auch nach diesem Zusammenschluss liegt der Wasserstoff für kurze Zeit in einem angeregten Zustand vor und kann so – abweichend vom „normalen“ chemischen

Verhalten – für verschiedene Reaktionen genutzt werden, die mit molekularem Wasserstoff nicht möglich sind.

So gelingt es zum Beispiel nicht, mit Hilfe von im Kippschen Apparat erzeugtem Wasserstoffgas, in einer angesäuerten, violetten Kaliumpermanganatlösung ( $\text{KMnO}_4$ ) oder gelben Kaliumdichromatlösung ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) den die Reduktion anzeigenden Farbwechsel hervorzurufen. Mit direkt in diesen Lösungen, durch Zugabe von Zinkpulver generiertem Wasserstoff *in statu nascendi* gelingt diese reduktive Farbänderung.

Nascierender Wasserstoff vermag unter sauren Bedingungen violette Permanganatlösung zu entfärben.

Unter sauren Bedingungen wird gelbe Dichromatlösung grün durch die reduktive Wirkung des nascierenden Wasserstoffs.

### Atomarer Wasserstoff

Um molekularen Wasserstoff in die Atome zu zerlegen, muss Energie von etwa 4,5 eV pro Molekül oder genauer 436,22 kJ/mol aufgewendet werden (der Chemiker spricht von Enthalpie); beim Zusammenschluss zu Wasserstoffmolekülen ( $\text{H}_2$ ) wird diese Energie wieder freigesetzt:

Zwei H-Atome reagieren zu einem  $\text{H}_2$ -Molekül und setzen dabei Energie frei.

Das Gleichgewicht dieser Reaktion liegt unter Normalbedingungen vollkommen auf der rechten Seite der dargestellten Gleichung, denn atomarer Wasserstoff reagiert sehr rasch und stark exotherm zu molekularem Wasserstoff (oder mit anderen Reaktionspartnern, wenn solche in der Nähe sind).

Eine Anwendung findet diese Reaktion beim Arcatom-Schweißen.

Auch im Weltraum liegt bei niedrigen Temperaturen in der Regel molekularer Wasserstoff vor. In der Nähe heißer Sterne wird molekularer Wasserstoff jedoch von deren Strahlung aufgespalten, so dass dort die atomare Form überwiegt. Diese ist zwar sehr reaktiv und geht schnell neue Verbindungen ein, vor allem mit anderen Wasserstoffatomen, die jedoch von der Strahlung ebenfalls wieder gespalten werden.

Wasserstoff in den Sternen liegt nicht nur atomar vor, sondern auch als Plasma: Die Elektronen sind infolge der dort herrschenden hohen Temperaturen je nach Temperatur von den Protonen mehr oder weniger abgetrennt. Die Oberfläche der Sonne hat jedoch nur eine Temperatur von ungefähr 6000 °C. Bei dieser Temperatur ist immer noch der größte Teil des Wasserstoffes nicht ionisiert und sogar molekular, d. h. das Gleichgewicht liegt weit auf der Seite des molekularen Wasserstoffes. Die thermische Energie ist bei 6000 °C weit unter der Energie von 4,5 eV, die zur Auflösung der molekularen Bindung erforderlich ist. Die Sonne ist jedoch in der Korona mit mindestens einer Million Kelvin wesentlich heißer. Daher sind im Sonnenlicht die Übergänge der Elektronen im atomaren Wasserstoff erkennbar. Chemische Verbindungen können sich bei so hohen Temperaturen kaum bilden und zerfallen sofort.

### Wasserstoffbrückenbindung

Eine wichtige Eigenschaft des Wasserstoffs ist die so genannte Wasserstoffbrückenbindung, eine anziehende elektrostatische Kraft zwischen zwei Molekülen. Ist H an ein stark elektronegatives Atom, wie zum Beispiel Fluor oder Sauerstoff, gebunden, so befindet sich sein Elektron eher in der Nähe des Bindungspartners. Es tritt also eine Ladungsverschiebung auf und das H-Atom wirkt nun positiv polarisiert. Der Bindungspartner wirkt entsprechend negativ. Kommen sich zwei solche Moleküle nahe genug, tritt eine anziehende elektrische Kraft zwischen dem positiven H-Atom des einen Moleküls und des negativen Teils des jeweiligen Partners auf. Das ist eine Wasserstoffbrückenbindung.

Da die Wasserstoffbrückenbindung mit nur 17 kJ/mol bis 167 kJ/mol schwächer ist als die Bindungskraft innerhalb eines Moleküls, verbinden sich die Moleküle nicht dauerhaft. Vielmehr bleibt die Wasserstoffbrücke wegen ständiger Bewegung nur Bruchteile einer Sekunde bestehen. Dann lösen sich die Moleküle voneinander, um erneut eine Wasserstoffbrückenbindung mit einem anderen Molekül einzugehen. Dieser Vorgang wiederholt sich ständig.

Die Wasserstoffbrückenbindung ist für viele Eigenschaften verschiedener Verbindungen verantwortlich, wie etwa DNA oder Wasser. Bei Letzterem führen diese Bindungen zu den Anomalien des Wassers, insbesondere der Dichteanomalie.

Anmerkung: Die Wasserstoffbrückenbindung sollte nicht mit der *Van-der-Waals-Bindung* verwechselt werden, die auf ungleichmäßigen Ladungsverteilungen bei *nicht*polaren Molekülen beruht und unter anderem für den Schmelz- oder Siedepunkt eines Stoffes verantwortlich ist.

## Isotope

Es existieren drei natürlich vorkommende Isotope des Wasserstoffs. Von allen Elementen unterscheiden sich beim Wasserstoff – wenn auch nur geringfügig – die Isotope in ihren chemischen Reaktionsfähigkeiten am meisten. Das liegt an dem vergleichsweise großen Gewichtsunterschied (Deuterium doppelt, Tritium dreimal so schwer wie Wasserstoff). Dieser Unterschied beträgt schon bei den Isotopen des nächstschwereren Elements Helium nur noch 25 %. In jüngerer Zeit gelang es, die kurzzeitige Existenz von vier weiteren Kernen nachzuweisen ( $^4\text{H}$ ,  $^5\text{H}$ ,  $^6\text{H}$  und  $^7\text{H}$ ).

Wasserstoff, Deuterium, Tritium

Diese Kerne haben aber alle eine sehr kurze Lebensdauer ( $< 10^{-21}$  s).

Isotop	Name	Symbol	Eigenschaften
$^1\text{H}$	Protium	H	Das einfachste Wasserstoff-Isotop $^1\text{H}$ besitzt keine Neutronen im Kern und wird gelegentlich Protium genannt. Es hat mit einer relativen Häufigkeit von 99,99 % den weitaus größten Anteil am irdisch vorkommenden Wasserstoff. Es ist nicht radioaktiv, also stabil.
$^2\text{H}$	Deuterium	D	Das Isotop $^2\text{H}$ hat neben dem Proton ein Neutron im Kern. Man bezeichnet es als Deuterium. Für Deuterium gibt es das D als ein eigenes Elementsymbol. Verwendung findet es z. B. als Bestandteil von Lösungsmitteln für die $^1\text{H}$ -NMR Spektroskopie, da es dabei kein störendes Nebensignal liefert. Es macht 0,0115 % aller Wasserstoffatome aus (nach IUPAC). Deuterium ist ebenfalls stabil.
$^3\text{H}$	Tritium	T	Tritium ist das dritte natürlich vorkommende Isotop des Wasserstoffs. Es hat aber nur einen verschwindenden Anteil am gesamten in der Natur vorkommenden Wasserstoff. Tritium besitzt zwei Neutronen und wird mit $^3\text{H}$ oder T gekennzeichnet. Tritium ist radioaktiv und zerfällt durch Betazerfall ( $\beta^-$ ) mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren in $^3\text{He}$ . Tritium wird durch Kernreaktionen in der oberen Erdatmosphäre ständig als kosmogenes Radionuklid gebildet. Bei einem Gleichgewicht von natürlicher Produktion und Zerfall ergibt sich, entsprechend der Quelle, ein Inventar von 3,5 kg auf der Erde. Tritium kann in Oberflächenwassern und in Lebewesen nachgewiesen werden. Durch Kernwaffentests ist die Konzentration des Tritiums in der Atmosphäre nach 1950 deutlich angestiegen.

## Exotische Isotope

Mit einer Lebensdauer von 2  $\mu\text{s}$  vergleichsweise langlebig sind das *Myonium* und ein exotischer Wasserstoff mit einem effektiven Kern bestehend aus einem  $^4\text{He}$ -Kern und einem Myon.

Myonium besteht aus einem Kern mit einem *Anti-Myon* an Stelle eines Protons und einem Elektron. Auf Grund seiner Kernladungszahl von 1 e handelt es sich chemisch um Wasserstoff. Die Lebensdauer von Myonen beträgt 2  $\mu\text{s}$ , so dass dieses Wasserstoffisotop nur im Teilchenbeschleuniger hergestellt werden kann. Wegen der geringen Atommasse von 0,1 u (1/36 von H) treten Isotopeneffekte bei chemischen Reaktionen besonders stark in Erscheinung, so dass damit Theorien für Reaktionsmechanismen gut überprüft werden können.

Ein exotischer Wasserstoff mit einer Masse von 4,1 u entsteht, wenn in einem  $^4\text{He}$ -Atom ein Elektron durch ein *Myon* ersetzt ist. Auf Grund seiner wesentlich höheren Masse ist das Myon dicht am He-Kern lokalisiert und schirmt eine Elementarladung ab. Zusammen bilden He-Kern und Myon einen Kern mit einer Masse von 4,1 u und einer Ladung von 1 e, so dass es sich chemisch um Wasserstoff handelt. Die Lebensdauer ist wegen des Myons auf 2  $\mu\text{s}$  begrenzt.

## Verwendung

Jedes Jahr werden weltweit mehr als 600 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff (rd. 30 Mio. t) für zahllose Anwendungen in Industrie und Technik produziert. Wichtige Einsatzgebiete sind:

*Energieträger:* Beim Schweißen, als Raketentreibstoff. Auch als Kraftstoff für Strahltriebwerke oder Verbrennungsmotoren kann Wasserstoff verwendet werden – dieser Weg ist kurzfristig technologisch einfacher umzusetzen und besonders für Nutzfahrzeuge mit hohen Kilometerleistungen aufgrund der mangelnden Standfestigkeit der Brennstoffzellen die einzige Möglichkeit, siehe Wasserstoffantrieb.

*Reduktionsmittel:*  $H_2$  kann mit Metalloxiden reagieren und ihnen dabei den Sauerstoff entziehen. Es entsteht Wasser und das reduzierte Metall. Das Verfahren wird bei der Verhüttung von metallischen Erzen angewandt, insbesondere um Metalle möglichst rein zu gewinnen.

Mit dem (Haber-Bosch-Verfahren) wird aus Stickstoff und Wasserstoff Ammoniak hergestellt und daraus wichtige Düngemittel und Sprengstoffe.

*Kohlehydrierung:* Durch verschiedene chemische Reaktionen wird Kohle mit  $H_2$  in flüssige Kohlenwasserstoffe überführt. So lassen sich Benzin, Diesel und Heizöl künstlich herstellen. Momentan hat das Verfahren wegen höherer Kosten kaum wirtschaftliche Bedeutung. Das könnte sich aber drastisch ändern, sobald die Ölvorräte der Erde zur Neige gehen.

*Fetthärtung:* Gehärtete Fette werden oft aus Pflanzenöl mittels Hydrierung gewonnen. Dabei werden die Doppelbindungen in den Fettsäure-Ketten der Fettmoleküle mit Wasserstoff abgesättigt. Die entstandenen Fette haben einen höheren Schmelzpunkt, wodurch das Produkt fest wird. Auf diese Weise stellt man Margarine her. Dabei können sich auch so genannte *trans*-Fettsäuren bilden.

*Lebensmittelzusatzstoff:* Wasserstoff ist als E 949 zugelassen und wird als Treibgas, Packgas, Gas zum Aufschlagen von Sahne u.ä. verwendet.

*Kühlmittel:* Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität benutzt man Wasserstoff in Kraftwerken und den dort eingesetzten Turbogeneratoren als Kühlmittel. Insbesondere setzt man  $H_2$  dort ein, wo eine Flüssigkeitskühlung problematisch werden kann. Die Wärmekapazität kommt dort zum Tragen, wo das Gas nicht oder nur langsam zirkulieren kann. Weil die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls hoch ist, verwendet man strömendes  $H_2$  auch zum Abtransport von thermischer Energie in große Reservoirs (z. B. Flüsse). In diesen Anwendungen schützt Wasserstoff die Anlagen vor Überhitzung und erhöht die Effizienz.

*Kryogen:* Wegen der hohen Wärmekapazität eignet sich flüssiger Wasserstoff als Kryogen, also als Kühlmittel für extrem tiefe Temperaturen. Auch größere Wärmemengen können von flüssigem Wasserstoff gut absorbiert werden, bevor eine merkliche Erhöhung in seiner Temperatur auftritt. So wird die tiefe Temperatur auch bei äußeren Schwankungen aufrechterhalten.

*Traggas:* In Ballons und Luftschiffen fand Wasserstoff eine seiner ersten Verwendungen. Wegen der leichten Entzündlichkeit von  $H_2$ -Luft-Gemischen führte dies jedoch wiederholt zu Unfällen. Die größte Katastrophe in diesem Zusammenhang ist wohl das Unglück der „Dixmude“ 1923, am bekanntesten wurde sicherlich die „Hindenburg-Katastrophe“ im Jahr 1937. Wasserstoff als Traggas wurde mittlerweile durch Helium ersetzt und erfüllt diesen Zweck nur noch in sehr speziellen Anwendungen.

Die beiden natürlichen Isotope haben spezielle Einsatzgebiete.

Deuterium findet (in Form von schwerem Wasser) in Schwerwasserreaktoren als Moderator Verwendung, d. h. zum Abbremsen der bei der Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen auf thermische Geschwindigkeit.

Deuterierte Lösungsmittel werden in der magnetischen Kernresonanzspektroskopie benutzt, da Deuterium einen Kernspin von Eins besitzt und im NMR-Spektrum des normalen Wasserstoff-Isotops nicht sichtbar ist.

In der Chemie und Biologie helfen Deuteriumverbindungen bei der Untersuchung von Reaktionsabläufen und Stoffwechselwegen (Isotopenmarkierung), da sich Verbindungen mit Deuterium chemisch und biochemisch meist nahezu identisch verhalten wie die entsprechenden Verbindungen mit Wasserstoff. Die Reaktionen werden von der Markierung nicht gestört, der Verbleib des Deuteriums ist in den Endprodukten dennoch feststellbar.

Ferner sorgt der erhebliche Massenunterschied zwischen Wasserstoff und Deuterium für einen deutlichen Isotopeneffekt bei den massenabhängigen Eigenschaften. So hat das schwere Wasser einen messbar höheren Siedepunkt als Wasser.

Das radioaktive Isotop Tritium wird in Kernreaktoren in industriell verwertbaren Mengen hergestellt. Außerdem ist es neben Deuterium ein Ausgangsstoff bei der Kernfusion zu Helium. In der zivilen Nutzung dient es in Biologie und Medizin als radioaktiver Marker. So lassen sich beispielsweise Tumorzellen aufspüren. In der Physik ist es einerseits selbst Forschungsgegenstand, andererseits untersucht man mit hochbeschleunigten Tritiumkernen schwere Kerne oder stellt künstliche Isotope her.

Mit Hilfe der Tritiummethode lassen sich Wasserproben sehr genau datieren. Mit einer Halbwertszeit von etwa zwölf Jahren eignet es sich besonders für die Messung relativ kurzer Zeiträume (bis zu einigen hundert Jahren). Unter anderem lässt sich so das Alter eines Weines feststellen.

Es findet auch Verwendung als langlebige, zuverlässige Energiequelle für Leuchtfarben (im Gemisch mit einem Fluoreszenzfarbstoff), vor allem in militärischen Anwendungen, aber auch in Armbanduhren. Weitere militärische Verwendung findet das Isotop in der Wasserstoffbombe und gewissen Ausführungen von Kernwaffen, deren Wirkung auf Spaltung beruht.

### **Wasserstoff als Energiespeicher**

Wasserstoff wird oft als „Energieträger der Zukunft“ (Wasserstoffwirtschaft), der keinerlei schädliche Emissionen, insbesondere kein Kohlendioxid, verursacht, tituliert – oft in einem Atemzug etwa mit Wind und Sonne. Derartige Aussagen sind aber mit Vorsicht zu genießen und beruhen zum Teil auf Verwechslung von Primärenergie und Energie(über)träger. Unzweifelhaft enthält Wasserstoffgas mehr Energie pro Gewichtseinheit als jeder andere chemische Brennstoff, jedoch muss Wasserstoff zunächst erst einmal energieintensiv hergestellt werden. Insofern ist Wasserstoff keine Energiequelle, sondern seine Erzeugung bietet ggf. Möglichkeiten, anderweitig gewonnene Energie (etwa aus Wind und Sonne) zu speichern. Allerdings sind auch die Probleme bei Speicherung und Transport groß. Wasserstoffatome sind aber auch in den Molekülen vieler etablierter Energieträger wie Erdöl, Erdgas oder Biomasse enthalten; Wasserstoff hat also auch einen nicht unerheblichen Anteil am Brennwert bzw. Heizwert dieser Stoffe. Die Speicherung von Wasserstoff als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge stellt besondere Anforderungen an die Konstruktion von Wasserstoff-Tanks, einerseits im Hinblick auf Sicherheitsbedenken insbesondere in Unfallsituationen, andererseits aus ökonomischen Gesichtspunkten. Beispielsweise sind beim Wasserstoffantrieb mit Brennstoffzellen oder in einem Verbrennungsmotor die Größe und das Gewicht des Tanks im Verhältnis zur Reichweite des Fahrzeugs sehr groß, der Energieaufwand für die Kühlung und Wasserstoffverluste durch Diffusion sind zu berücksichtigen.

In Anbetracht der vorstehenden Überlegungen konkurrieren drei Speichermethoden miteinander:

- die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff in Druckbehältern,
- die Speicherung von flüssigem Wasserstoff in vakuumisolierten Behältern,
- die Einlagerung von Wasserstoff in Metallhydriden oder in Kohlenstoff-Nanoröhren

Die ersten beiden Methoden erlauben eine einfache Wiedergewinnung des Wasserstoffs. Sie genügen auch im vollem Maße den Sicherheitsanforderungen. Drucktanks mit bis zu 700bar sind Behälter, die als nahezu unzerstörbar gelten. Da sich das Sicherheitsventil für Überdruck innerhalb des Tanks befindet, wird Wasserstoff im Notfall schrittweise abgegeben und verflüchtigt sich schnell. Wenn eine Zündquelle in der Nähe ist, kann sich der Wasserstoff entzünden, verbrennt aber schnell und mit geringer Wärmeabstrahlung. Eine Explosion ist nahezu unmöglich, da die Konzentration des Wasserstoffs in der Luft nicht ausreicht. Reiner Wasserstoff ist nicht explosiv. Dagegen sind die herkömmlichen Plastikbenzintanks deutlich unsicherer. Sollte ein Benzinauto brennen wird es durch die höhere Wärmeabstrahlung im Auto viel schneller warm,. Der Flüssigtank ist leichter zu beschädigen, aber im Vergleich mit heutigen Tanks auch sicher.

Speicherung in Hydriden oder Nanoröhren stellen die sichersten Methoden dar. Die Tanks sind allerdings sehr schwer, in einem 200-kg-Tank können nur etwa 2 kg Wasserstoff gespeichert werden, was energetisch etwa 8 Litern Benzin entspricht. Auch ist die Rückgewinnung gasförmigen Wasserstoffs komplizierter, v. a. in größeren Mengen zur gleichen Zeit. Die dazu verwendete Technik erfordert hohes technisches und physikalisches Verständnis und hochwertige Bauteile. Diese Form der Speicherung kann daher sehr teuer werden.

### **Biologische Bedeutung**

Wasserstoff ist in Form verschiedenster Verbindungen essentiell für alle bekannten Lebewesen. An vorderster Stelle zu nennen ist hier Wasser, welches als Medium für alle zellulären Prozesse und für alle Stofftransporte dient. Zusammen mit Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff (und seltener auch anderen Elementen) ist er Bestandteil derjenigen Moleküle aus der organischen Chemie, ohne die jegliche uns bekannte Form von Leben schlicht unmöglich ist.

Wasserstoff spielt im Organismus auch aktive Rollen, so bei einigen Koenzymen wie z. B. Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid (NAD/NADH), die als Reduktionsäquivalente (oder „Protonentransporter“) im Körper dienen und bei Redoxreaktionen mitwirken. In den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle, dient die Übertragung von Wasserstoffkationen (Protonen) zwischen verschiedenen Molekülen der so genannten Atmungskette dazu, ein Potential, einen Protonengradienten, zur Generierung von energiereichen Verbindungen wie Adenosintriphosphat (ATP) bereitzustellen. Bei der Photosynthese in Pflanzen und Bak-

terien wird der Wasserstoff aus dem Wasser dazu benötigt, das fixierte Kohlendioxid in Kohlenhydrate umzuwandeln.

Bezogen auf die Masse ist Wasserstoff im menschlichen Körper das dritt wichtigste Element: Bei einer Person mit einem Körpergewicht von 70 kg, sind rund 7 kg (= 10 Gew.-%) auf den enthaltenen Wasserstoff zurückzuführen. Nur Kohlenstoff (ca. 20 Gew.-%) und Sauerstoff (ca. 63 Gew.-%) machen einen noch größeren Gewichtsanteil aus. Bezogen auf die Anzahl der Atome ist der sehr leichte Wasserstoff sogar das mit Abstand häufigste Atom im Körper eines jeden Lebewesens. (Die 7 kg beim Menschen entsprechen  $3,5 \cdot 10^3$  Mol Wasserstoff mit je  $2 \cdot 6 \cdot 10^{23}$  Atomen, das sind rund  $4,2 \cdot 10^{27}$  Wasserstoffatome).

### Medizinische Bedeutung

In biologischen Systemen reagiert molekularer Wasserstoff mit reaktiven Sauerstoffspezies und wirkt so als Antioxidans. Im Tierversuch führt die Anreicherung von Trinkwasser mit molekularem Wasserstoff nach Nierentransplantation zu einem besseren Überleben des Transplantates, zu einem verminderten Auftreten einer chronischen Schädigung des Transplantates, zu einer Verminderung der Konzentration an reaktiven Sauerstoffspezies und zu einer Hemmung von Signalwegen, welche die entzündliche Aktivität verstärken (proinflammatorische Signalwege).

### Sicherheitshinweise

Wasserstoff ist hochentzündlich; es reagiert mit heißer Flamme mit reinem Sauerstoff oder Luft sowie mit anderen gasförmigen Oxidationsmitteln wie Chlor oder Fluor. Gemische mit Chlor oder Fluor sind schon durch UV-Licht entzündlich (siehe *Chlorknallgas*). Außer der nach GHS vorgeschriebenen Kennzeichnung (siehe Info-Box) müssen H<sub>2</sub>-Druckgasflaschen nach DIN EN 1089-3 mit roter Flaschenschulter und rotem Flaschenkörper versehen sein.

In geringen Mengen ist Wasserstoff für Menschen ungiftig. In hohen Konzentrationen können allerdings Bewegungsstörungen auftreten. Weitere Exposition kann zur Bewusstlosigkeit und schließlich zum Erstickungstod führen. In einem solchen Falle ist die betroffene Person (unter Selbstschutz) an die frische Luft zu bringen und ein Arzt hinzuzuziehen. Bei einem Atemstillstand muss die Person künstlich beatmet werden.

Beim Mischen mit Luft zu 4 bis 76 Volumenprozent (Vol.-%) ist Wasserstoff entzündlich. Erst bei einer Konzentration von 18 % in der Luft ist Wasserstoff explosiv (Knallgas). Die Zündtemperatur in Luft beträgt 560°C. Das Sicherheitsdatenblatt ist zu beachten. Bei der Handhabung ist der Wasserstoff von Zündquellen, einschließlich elektrostatischen Entladungen, fernzuhalten. Die Lagerung der Behälter sollte fern von oxidierenden Gasen (Chlor) und anderen brandfördernden Stoffen erfolgen.

Sauerstoff/Wasserstoffgemische mit einem Anteil von unter 10,5 Volumenprozent Wasserstoff sind schwerer als Luft und sinken zu Boden. Die Entmischung erfolgt nicht unmittelbar, so dass bis zur Unterschreitung der 4 Volumenprozent Grenze die Zündfähigkeit erhalten bleibt. Beim Umgang mit Wasserstoff müssen Sicherheitsvorschriften und Entlüftungsanlagen dieses Verhalten berücksichtigen.

Wird Wasserstoff in einfachen Metalltanks unter Druck gelagert, so kommt es wegen der geringen Molekülgröße zur Diffusion, das heißt Gasmoleküle treten langsam durch die Gefäßwände aus. Die heute für Gastanks und Leitungen verwendeten Materialien berücksichtigen diese Eigenschaften des Wasserstoffs, so dass im täglichen Gebrauch keine größeren Risiken entstehen als z. B. durch die Verwendung von Benzin. Wasserstofffahrzeuge mit Drucktanks können problemlos in Parkhäusern und Tiefgaragen geparkt werden. Es existiert keine gesetzliche Bestimmung, die das einschränkt (siehe dazu: Wasserstoffspeicherung).

Der Austausch von Wasserstoff-Isotopen in chemischen Verbindungen kann die Toxizität der entsprechenden Verbindung beeinflussen. So ist Schweres Wasser (D<sub>2</sub>O) – das Isotop <sup>1</sup>H wurde gegen <sup>2</sup>H (Deuterium) ausgetauscht – im Vergleich zu Wasser giftig für viele Lebewesen. Die für Menschen gefährliche Menge ist aber recht groß und im Regelfall kaum zu erreichen.

### Nachweis

Molekularen Wasserstoff kann man durch die Knallgasprobe nachweisen. Bei dieser Nachweisreaktion wird eine kleine, beispielsweise während einer Reaktion aufgefangene Menge eines Gases, in einem Reagenzglas entzündet. Wenn danach ein dumpfer Knall, ein Pfeifen oder ein Bellen zu hören ist, so ist der Nachweis positiv (das heißt, es war Wasserstoff in dem Reagenzglas). Der Knall kommt durch die Reaktion von Wasserstoffgas mit dem Luftsauerstoff zustande:

(exotherme Reaktion)

Wasserstoff reagiert mit Sauerstoff zu Wasser

Mit der gleichen Reaktion verbrennt Wasserstoff mit einer schwach bläulichen Flamme, wenn man ihn gleich an der Austrittsstelle entzündet (Pfeifgas).

Die Knallgasprobe ist die „klassische“ Methode zum Nachweis und ist besonders in Schulversuchen beliebt. Sehr viel genauer lässt sich das Element mit Hilfe der Kernspinresonanzspektroskopie (kurz NMR; *nuclear magnetic resonance*) nachweisen, die daher bevorzugt im Laborbetrieb angewandt wird. Dabei macht man sich quantenmechanische Gegebenheiten zu Nutze: Der Kernspin eines Wasserstoffatoms kann sich in einem angelegten äußeren Magnetfeld unterschiedlich ausrichten. Dadurch liegt der Atomkern in einem von zwei möglichen Energiezuständen vor, deren Differenz umso größer ist, je stärker das äußere Magnetfeld ist. Diese Differenz ist charakteristisch für jedes Element und kann durch Strahlungsanregung gemessen werden.

### Verbindungen

Wasserstoff geht mit den meisten chemischen Elementen Verbindungen mit der allgemeinen Summenformel  $\text{EH}_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) ein. Einige wenige dieser Elementwasserstoffe sind nur in Form so genannter Addukte bekannt, wie  $\text{L}_m \cdot \text{EH}_n$  (L steht für einen Liganden).

Wasserstoff kann in Verbindungen sowohl positive als auch negative Ladungsanteile tragen. Das ist abhängig davon, ob der Bindungspartner eine höhere oder eine niedrigere Elektronegativität als Wasserstoff (2,2) besitzt. Zwischen den beiden Verbindungstypen lässt sich im Periodensystem keine scharfe Grenze ziehen, da zum Beispiel das Säure-Base-Verhalten mit berücksichtigt werden muss. Eine mehr oder weniger willkürliche Betrachtung besagt, dass in den Wasserstoffverbindungen der Elemente Bor, Silicium, Germanium, Zinn und Blei sowie allen links davon der Wasserstoff negativ polarisiert ist, in Verbindungen mit Kohlenstoff, Phosphor, Arsen, Antimon, Bismut und allen Elementen rechts davon positiv. Entsprechend lässt sich bei Monosilan ( $\text{SiH}_4$ ) die Oxidationszahl für Silicium auf +4 (Wasserstoff dementsprechend -1), in Methan ( $\text{CH}_4$ ) für Kohlenstoff auf -4 (Wasserstoff +1) festlegen.

Zur Darstellung von Wasserstoffverbindungen  $\text{EH}_n$  werden hauptsächlich drei verschiedene Verfahren genutzt:

Die Umsetzung des entsprechenden Elements E mit Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ; Hydrogenolyse)

Ein Element reagiert mit Wasserstoff bei Energiezufuhr zum entsprechenden Elementwasserstoff.

Die Reaktion von Metallverbindungen des Typs  $\text{M}_n\text{E}$  mit Wasserstoffsäuren ( $\text{H}^+$ ; Protolyse)

Eine Metallverbindung des Elements E reagiert mit einer Säure HA zum Elementwasserstoff und einem Metallsalz.

Die Umsetzung von Halogenverbindungen ( $\text{EHal}_n$ ) mit Hydriden ( $\text{H}^-$ ; Hydridolyse)

Hydridionen setzen aus einer Halogenverbindung des Elements E den entsprechenden Elementwasserstoff frei.

### Salzartige Verbindungen

In Verbindung mit Metallen kann Wasserstoff jeweils ein Elektron aufnehmen, so dass negativ geladene Wasserstoffionen (Hydridionen,  $\text{H}^-$ ) entstehen, die mit Metallkationen Salze bilden. Diese Verbindungen werden Hydride genannt. Salzartige Elementwasserstoffe sind von den Alkali- und, mit Ausnahme von Beryllium, den Erdalkalimetallen bekannt. Außerdem zählt man die Dihydride des Europiums und Ytterbiums ( $\text{EuH}_2$  und  $\text{YbH}_2$ ) dazu.

Metallhydride reagieren sehr heftig mit Wasser unter Freisetzung von molekularem Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und können sich an der Luft selbst entzünden, wobei sich Wasser und das Metalloxid bilden. In der Mehrzahl sind sie aber nicht explosiv. Minerale, die (an Sauerstoff gebundenen) Wasserstoff enthalten, sind Hydrate oder Hydroxide.

### Metallartige Verbindungen

In metallartigen Wasserstoffverbindungen – mit wenigen Ausnahmen sind das die Übergangsmetallhydride – ist atomarer Wasserstoff in der entsprechenden Metallstruktur eingelagert. Man spricht in diesem Fall auch von Wasserstoff-Einlagerungsverbindungen, obwohl sich bei der Aufnahme des Wasserstoffs die Struktur des Metalls ändert (was eigentlich nicht der Definition für Einlagerungsverbindungen entspricht). Das Element besetzt die oktaedrischen und tetraedrischen Lücken in den kubisch- bzw. hexagonal-dichtesten Metallatompäckungen.



Die Löslichkeit von Wasserstoff steigt mit zunehmender Temperatur. Man findet jedoch selbst bei Temperaturen über 500 °C selten mehr als 10 Atomprozent Wasserstoff im betreffenden Metall. Am meisten Wasserstoff können die Elemente Vanadium, Niob und Tantal aufnehmen. Bei Raumtemperatur sind folgende Stöchiometrien zu beobachten:  $\text{VH}_{0,05}$ ,  $\text{NbH}_{0,11}$  und  $\text{TaH}_{0,22}$ . Ab 200 °C findet man bei diesen Metallen eine 1:1-Stöchiometrie (MH) vor. Das kubisch-raumzentrierte Kristallgitter bleibt dabei unangestastet.

### Kovalente Verbindungen

Verbindungen, bei denen Wasserstoff der elektropositivere Partner ist, haben einen hohen kovalenten Anteil. Als Beispiele seien Fluorwasserstoff (HF) oder Chlorwasserstoff (HCl) genannt. In Wasser reagieren diese Stoffe als Säuren, da der Wasserstoff sofort als Proton ( $\text{H}^+$ -Ion) von umgebenden Wassermolekülen abgespalten werden kann. Isolierte  $\text{H}^+$ -Ionen verbinden sich in wässriger Lösung sofort mit Wassermolekülen zu  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen; dieses Ion ist verantwortlich für die saure Eigenschaft von wässrigen Chlorwasserstofflösungen.

### Säure-Base-Verhalten

#### Schematische Darstellung verschiedener Wasserstoffoxide

Die kovalenten Wasserstoffverbindungen der Elemente der IV. bis VII. Hauptgruppe des Periodensystems sowie Borwasserstoffe sind Säuren nach der Definition von Brønsted, geben also Protonen an andere Verbindungen ab.

Die Säurestärke der Verbindungen nimmt dabei in den Hauptgruppen von oben nach unten und in den Perioden von links nach rechts zu. Ebenso steigt sie mit der Zahl der Element-Element-Bindungen bei Wasserstoffverbindungen eines bestimmten Elements. So ist zum Beispiel Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) eine schwächere Säure als Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Ethan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) in der Säurestärke schwächer als Ethen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) und Ethin ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ).

Umgekehrt können kovalente Elementwasserstoffe als Basen fungieren. Wasserstoffverbindungen der Elemente aus Hauptgruppe V bis VII können Protonen aufnehmen, da sie über freie Elektronenpaare verfügen.

pH-Wert

Ursache für die Acidität oder Basizität einer wässrigen Lösung ist die Stoffkonzentration an Protonen ( $\text{H}^+$ -Ionen). Den negativen dekadischen Logarithmus dieser Konzentration nennt man pH-Wert. Z. B. bedeutet eine Konzentration von 0,001 mol  $\text{H}^+$ -Ionen pro Liter Wasser „pH 3,0“. Dieses Beispiel trifft auf eine Säure zu. Wasser ohne jeden Zusatz hat bei Normalbedingungen den pH 7, Basen haben pH-Werte bis 14

Wasserstoffoxide (auch Hydrogeniumoxide) sind Verbindungen, die nur aus Wasserstoff und Sauerstoff bestehen, von größter Wichtigkeit ist das Wasser (Wasserstoffoxid); von technischer Bedeutung ist daneben Wasserstoffperoxid, früher Wasserstoffsuperoxid genannt. Ein weiteres, aber selteneres Oxid ist das Dihydrogentrioxid.

Von außerordentlicher Bedeutung für alles Leben auf der Erde sind auch Alkohole und Saccharide sowie Carbonsäuren, die (nur) Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff enthalten.

Wasserstoff bildet mit Kohlenstoff die kovalenten Kohlenwasserstoffe, deren Studium sich die Kohlenwasserstoffchemie verschrieben hat.

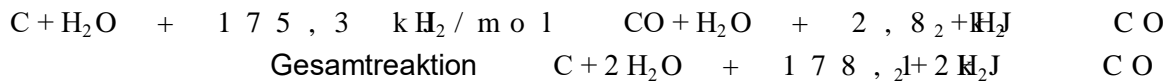
### Wasserstoff-Gewinnung

**Kohlevergasung:** Elementarer Wasserstoff wird technisch durch Überleiten von heißem Wasserdampf über glühenden Koks gewonnen. Dabei entsteht das *Wassergas*. Das primär gebildete Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) wird mit weiterem Wasser unter Katalyse mit Nickel(III)oxid oder Chrom(III)oxid zu Wasserstoff umgesetzt, wobei Kohlendioxid entsteht. Durch Auswaschen des Synthesegases mit Soda- oder Pottaschelösungen sowie anschließender Waschung mit Kupfer(I)chlorid-Lösung kann  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$  entfernt werden. Dabei wird auch der Schwefelwasserstoff, der aus dem in der Kohle enthaltenen Schwefel entsteht, ebenfalls abgetrennt.

Gewinnung von Wasserstoff durch Kohlevergasung:

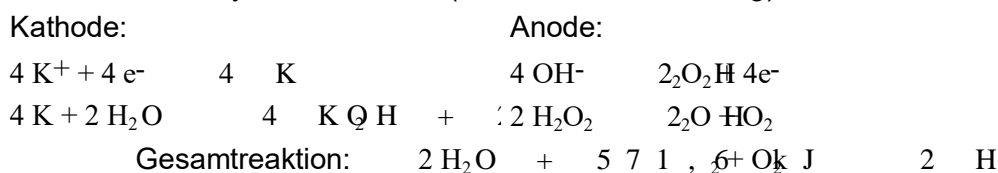
Wassergas-Erzeugung

Wassergas-Shift-Reaktion



**Elektrochemisch aus Wasser:** Effektiv kann Wasserstoff auch durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen werden. Man verwendet hierzu, da die Eigenleitfähigkeit reinen Wassers sehr gering ist, geeignete Elektrolyte. Als besonders geeignet hat sich die Elektrolyse 70 bis 90°C heißer 25% Kaliumhydroxid-Lösungen erwiesen, die bei einer Stromdichte von 0,15 bis 0,5 A/cm<sup>2</sup> und einer Spannung von 1,9 V elektrolysiert werden. Diese Darstellung hat einen Wirkungsgrad von 80%. Dabei werden an der Kathode Kalium-Ionen an der negativ geladenen Kathode entladen, und bilden dann elementares Kalium. Dieses reagiert sofort mit dem Wasser zurück zu Kaliumhydroxid und Wasserstoff, der aufsteigt und abgefangen werden kann. An der Anode werden die Hydroxid-Ionen an der positiv geladenen Anode zu Hydroxyl-Radikalen entladen, welche sofort zu Wasserstoffperoxid weiterreagieren. Dieser zerfällt jedoch gleich weiter nach Wasser und Sauerstoff. Der Sauerstoff kann gleich dem Wasserstoff abgeleitet und aufgefangen werden.

Elektrolyse von Wasser (verdünnte KOH-Lösung):



### Durch Umsatz unedler Metalle mit Säure:

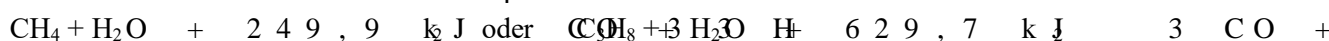
Im Labormaßstab durch Reaktion unedler Metalle mit Säuren. So kann Wasserstoff beispielsweise durch Zink oder Aluminium mittels Salzsäure im Kipp'schen Apparat gewonnen werden.

### Kippscher Apparat

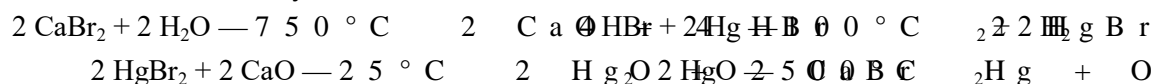
### Elektrolyse

### Kohlevergasung

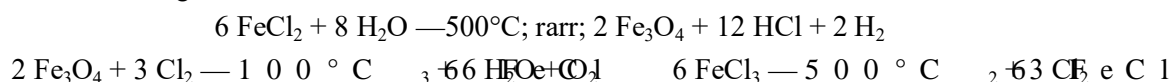
**Darstellung aus Methan (Steam-Reforming):** Hierbei wird Methan (oder ein beliebiges anderes Alkan) und Wasserdampf bei 900°C an Nickel als Katalysator umgesetzt, wobei der gesamte gebundene Wasserstoff reaktiv erhalten werden kann. Als Nebenprodukt entsteht Kohlenmonoxid.



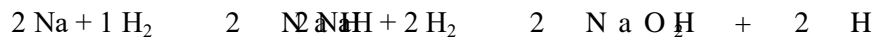
**Aus Calciumbromid und Wasser.** Hierzu wird im ersten Schritt Calciumbromid mit Wasser bei 750°C zu Calciumoxid und Bromwasserstoffgas umgesetzt. Der entstandene Bromwasserstoff wird bei 100°C an Quecksilber zu Quecksilberbromid und elementarem Wasserstoff umgesetzt. Quecksilberbromid reagiert dann mit dem Calciumoxid weiter zu Calciumbromid und Quecksilberoxid. Diese Mischung bildet beim Erhitzen wieder Quecksilber zurück, wobei Sauerstoff frei wird. Im Endeffekt wirken also Quecksilber und Calciumbromid nur katalytisch.



**Darstellung unter Katalyse mit Eisen(II)chlorid und Chlor:** Hierzu wird zunächst Eisen(II)chlorid mit Wasser umgesetzt, wodurch Eisen(II,III)oxid, Chlorwasserstoff und elementarer Wasserstoff entstehen. Das Eisen(II,III)oxid wird dann mit Chlor und Salzsäure zu Eisen(III)chlorid, Wasser und Sauerstoff weiter umgesetzt. Im letzten Schritt wird das entstandene Eisen(III)chlorid thermisch zersetzt, wodurch das Eisen(II)chlorid zurück gebildet wird, sowie das ebenfalls für die Reaktion relevante Chlor.



**Durch wiederholtes Synthetisieren und Zersetzen von Natriumhydrid:** Natriumhydrid setzt in Wasser Wasserstoff frei, und zwar pro Mol NaH werden zwei Mol H<sub>2</sub> gewonnen. Setzt man den Wasserstoff nun wieder mit Natrium quantitativ um, so werden pro Mol Wasserstoff 2 Mol Natriumhydrid gewonnen. So kann durch wiederholtes Umsetzen jedesmal die Menge an Wasserstoff verdoppelt werden, wobei als Nebenprodukt Natronlauge entsteht.



Wasserstoff kommt in seinen Verbindungen stets in den Oxidationsstufen +1 (gegenüber elektronegativeren Partnern, Nichtmetalle) oder -1 (gegenüber elektropositiveren Partnern, Metalle) vor.

Da der Wasserstoff in seiner Atomhülle nur ein einzelnes Elektron hat, kann er keine positiven Ionen bilden, da dies das Auftreten freier Protonen bedeuten würde. Daher sind auch die Verbindungen mit stark elektronegativen Atomen oder Molekülen stets stark polare Atomverbindungen. Dies betrifft die Verbindungen des Wasserstoffs mit Sauerstoff, Fluor und Stickstoff, welche durch die hohe EN-Differenz starke Dipole aufweisen, und dadurch Wasserstoff-Brücken untereinander bilden. Dadurch bedingt haben Ammoniak (NH<sub>3</sub>, Wasserstoffnitrid), Wasser (H<sub>2</sub>O, Wasserstoffoxid) und Fluorwasserstoff (HF) bei Weitem höhere Schmelz- und Siedepunkte, als es von ihrer Molekülmasse zu erwarten wäre.

Mit weniger stark elektronegativen Elementen (Phosphor, Kohlenstoff, Schwefel, Chlor, Brom, Iod) bildet der Wasserstoff tief schmelzende und siedende Verbindungen, in welchen er leicht positiv polarisiert vorliegt.

Gegenüber noch stärker elektropositiven Elementen werden kovalent gebaute Hydride gebildet, in welchen dem Wasserstoff eine eher negative Partialladung zukommt. Diese Verbindungen sind entweder flüchtig oder hochpolymer.

Gegenüber den Alkali-, Erdalkalimetallen, sowie gegenüber Europium, Ytterbium und Nobelium werden salzartige Hydride gebildet, in welchem "echte" H<sup>-</sup>-Anionen vorliegen.

Mit den meisten anderen Metallen werden legierungsartige bis kovalent gebaute Hydride gebildet, in welchem der Wasserstoff eine negative Formalladung zukommt.

Keine Verbindungen bildet der Wasserstoff mit den Edelgasen.

Da Wasserstoff mit einem Proton das einfachste Atom darstellt, und biatomar vorkommt, ist er das leichteste aller Elemente. Wasserstoff verhält sich (wie auch Helium) annähernd wie ein ideales Gas.

**Wasserstoff als Treibstoff:** Da elementarer Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser verbrennt, gewinnt er als umweltfreundlicher Treibstoff immer mehr an Bedeutung.

**Schweißgas:** Zusammen mit Sauerstoff kann beim Verbrennen eine Temperatur von 3000°C erzielt werden, weswegen es als Schweißgas für bestimmte Hochtemperatur-Anwendungen Verwendung findet.

**Kohlehydrierung:** Mit zunehmender Verknappung der natürlichen Erdgas- und Ölresourcen gewinnt die Kohlehydrierung mehr an Bedeutung. Dabei wird Kohlenstoff mittels höherer Temperaturen und Drücke sowie unter Verwendung von Katalysatoren mit Wasserstoff zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt.

Wasserstoff werden in rot gefärbten Druckgasflaschen in den Handel gebracht. Diese haben am Anschluss ein Linksgewinde, um Verwechslungen mit anderen Gasen zu vermeiden.

## Watson & Sons

W. Watson & Sons; Sunic House, Parker Street, Kingsway, London, W.C.2.

W. Watson & Sons Manufacturers war ein Optiker und Kamerahersteller mit Sitz in Holborn, London, und später mit Standorten in Barnet (North London), Edinburgh, Birmingham und Melbourne, Australien. Das Unternehmen wurde 1837 von William Watson gegründet, war aber zu diesem Zeitpunkt nicht mit optischen Produkten beschäftigt. Watson begann in den 1880er Jahren mit der Herstellung von Kameras; William Watson starb 1881, und die Leitung der Firma wurde von einem seiner Söhne, Thomas P. Watson, übernommen. Mehrere seiner Brüder waren auch in der Firma tätig.

Watson fertigte feine Holzsuchtkameras sowie Ferngläser, Mikroskope, Filmprojektoren und so weiter. Im Jahr 1900 kaufte sie die optisch-wissenschaftliche Firma von John Browning & Co. 1915 gründete Charles H. Watson mit dem Partner Geoffrey Pearce ein neues Unternehmen, Watson & Sons (Electro-Medical) Ltd., das Röntengeräte herstellte.

1939 war Watson and Sons eine Tochtergesellschaft von GEC.

1948 Ein neues privates Unternehmen, Machlett X-Ray Tubes (Great Britain) Ltd., wird eingetragen; es wird eng mit Watson and Sons verbunden.

Dieses Unternehmen wurde 1954 von General Electric gekauft. Das optische-fotografische Unternehmen dauerte bis mindestens 1968. Das australische Unternehmen wurde irgendwann zu Watson Victor Ltd. und war Vertreiber von britischen Watson-Kameras und anderen Waren sowie medizinischem und wissenschaftlichem Zubehör.

1958 Langjährige Zusammenarbeit mit der Machlett Company of the USA bei Röntgenröhren.

1961 Hersteller von Röntgengeräten. 400 Mitarbeiter.

1968 erreichte die beste Leistung aller Zeiten.

## Weber

Wb; Nach dem Physiker W. E. Weber (1804–1891) benannte Einheit des magnetischen Flusses im SI-System.

Sie ergibt sich aus der Beziehung: Änderung des magnetischen Flusses = elektrische Spannung x Zeit

Die Definition lautet: Das Weber ist der magnetische Fluß, der in einer ihn umfließenden Windung eine Spannung von einem Volt induziert, wenn man ihn in einer Sekunde gleichmäßig auf Null abnehmen läßt.

## Weber-Fechnersches Gesetz

Die Stärke der subjektiven Empfindung (E) eines Reizes (R) (z.B. Schall, Licht) ist dem Logarithmus der Größe des physikalischen Reizes proportional.

oder in anderer Schreibweise:

d.h. , bei einer Änderung des Reizes um den Betrag  $\Delta R$  ist die Änderung der Empfindung  $\Delta E$  proportional zu  $\Delta R/R$ , proportional der relativen Änderung des Reizes. Die Gültigkeit dieses Gesetzes ist an spezielle Voraussetzungen gebunden und nicht allgemein.

## Wechselrichter

Ein Wechselrichter (auch Inverter oder Drehrichter) ist ein elektrisches Gerät, das Gleichspannung in Wechselspannung umwandelt. Wechselrichter bilden neben Gleichrichtern, Gleichspannungswandlern und Umrichtern eine Untergruppe der Stromrichter.

Je nach Anwendung erzeugen Wechselrichter entweder einen ein- oder mehrphasigen Ausgangsstrom bzw. eine ein- oder mehrphasige Ausgangsspannung. Der Wirkungsgrad halbleiterbasierender Geräte kann bis zu 99 Prozent erreichen.

Eingesetzt werden Wechselrichter dort, wo elektrische Verbraucher Wechselspannung bzw. Strom zum Betrieb benötigen, aber nur eine Gleichspannungsquelle zur Verfügung steht. Wichtige Anwendungsgebiete sind unter anderem die Ansteuerung von Wechselstrommotoren oder in der Photovoltaik zur Umwandlung des von Solarmodulen gewonnenen Gleichstroms in einen Wechselstrom, zur Einspeisung in das öffentliche Stromversorgungsnetz oder dem direkten Verbrauch.

Es gibt elektromechanische Zehacker, Motorgeneratoren und elektronische Wechselrichter mit Röhren oder Halbleitern (Prinzip von Oszillator oder astabiler Kippstufe/Multivibrator).

### Steuerung

Man unterscheidet zwei Steuerungsarten von Wechselrichtern:

Selbst geführte Wechselrichter, auch Inselwechselrichter, verwenden Transistoren, zum Beispiel IGBTs. Sie dienen der Umwandlung von Gleichspannung in Wechselspannung, als Nebenfall ist auch der umgekehrte Weg möglich. Da die Ventile mit einem vom Wechselrichter selbst erzeugten Takt an- und ausgeschaltet werden können, ist keine Referenz vom Netz nötig. Selbst geführte Wechselrichter können damit zur Erzeugung einer Wechselspannung unabhängig vom Stromnetz dienen und ein sogenanntes Inselnetz aufbauen.

Fremd- oder netzgeführte Wechselrichter verwenden meist ebenfalls IGBT, aber auch Thyristoren oder Triacs. Sie benötigen zur Funktion eine feste Wechselspannung im Netz und beziehen sogenannte Kommutierungsblindleistung. Sie dienen dazu, Energie von der Gleichspannungsseite in das Wechselstromnetz einzuspeisen, die umgekehrte Richtung ist oft ebenso möglich. Dieser Typ verfügt über eine Abschaltung der Anlage bei Netzstörungen. So wird Überspannung oder Spannung in abgeschalteten Netz-Abschnitten vermieden. Dies wird in der VDE-Norm 0126 geregelt

## Anwendungsbeispiele für selbst geführte Wechselrichter

Berghütten, Wetterstationen ohne Netzanbindung, mobile Geräte, Wechselrichter in Wohnmobilen, Unterbrechungsfreie Stromversorgungen in Krankenhäusern, Kraftwerken und Rechenzentren

## Anwendungsbeispiele für fremd geführte Wechselrichter

- in der Röntgentechnik bei Batteriegeneratoren und bei Mittelfrequenz-Röntgengeneratoren.
- an einspeisefähigen (netzgekoppelten) Photovoltaikanlagen und Brennstoffzellen
- zur Netzkopplung von Windkraftanlagen mit variabler Drehzahl und Gleichspannungszwischenkreis
- zur Energierückgewinnung (Bremsenergienutzung) an 2-Quadranten-Frequenzumrichtern
- Form der Ausgangsspannung selbst geführter Wechselrichter

Ausgangsspannung eines Trapezwechselrichters für den Betrieb von 230-V-Geräten

Spannungsform am Glättungskondensator einer handelsüblichen Kompaktleuchtstofflampe, die an einer Sinusspannung betrieben wird

Spannungsform am Glättungskondensator einer handelsüblichen Kompaktleuchtstofflampe, die an einer Trapezspannung betrieben wird.

Drei Ausgangsspannungsformen von selbst geführten Wechselrichtern sind üblich:

### Rechteck- und Trapezform:

Rechteck- und Trapezwechselrichter werden oft zur Erzeugung von Wechselfspannung mit der Netzspannung gleichendem Effektivwert aus Gleichspannungsquellen (z. B. 12-Volt-Akkumulatoren) verwendet.

Rechteckwechselrichter erzeugen eine Rechteckspannung.

Trapezwechselrichter (im Handel werden sie auch als modifizierter Sinus-, oder Quasi-Sinuswechselrichter bezeichnet) erzeugen ebenfalls eine Rechteckspannung, wobei jedoch zwischen positivem und negativem Rechteck eine Pause liegt.

Rechteck- und Trapezwechselrichter lassen sich kostengünstiger herstellen als Sinuswechselrichter, da hier auf die aufwändige Pulsweitenmodulation, die im Sinuswechselrichter vorhanden ist, verzichtet wird.

Die rechteckige Ausgangsspannung ist für manche Geräte, die damit betrieben werden, problematisch, da sie stark von der Sinusspannung abweicht.

Transformatoren, Motoren und Heizgeräte können zwar mit rechteckförmiger Spannung betrieben werden, die steilen Spannungsanstiege verursachen jedoch Störemissionen. Solche Wechselrichter sind unproblematisch für Geräte, die sich ohmsch verhalten (z. B. Glühlampen, Heizgeräte). Problematisch an Trapezwechselrichtern sind Geräte, die ihre Leistung durch Triacs steuern (Staubsauger, manche modernen Kaffeemaschinen) – sie funktionieren eingeschränkt oder gar nicht. Einige Spezialmonitore oder auch Kühlschränke mit Elektrothermostat erkennen manchmal einen Unterschied und zeigen eine Störung an, wenn keine Sinuswechselfspannung anliegt.

### Sinusform

Sinuswechselrichter erzeugen aus einer Gleichspannung eine Sinuswechselfspannung. Sie eignen sich für alle Geräte, auch solche mit kapazitivem Verhalten (LED-Lampen, Kompaktleuchtstofflampen, Schaltnetzteile). Auch Sinuswechselrichter erzeugen Störungen, diese sind jedoch gering. Die Störungen rühren daher, dass die Sinusform mittels einer pulsweitenmodulierten Rechteckspannung, meist im zweistelligen kHz-Bereich, synthetisiert wird.

Bei induktiven Lasten (Motoren, Kühlschränke, Werkzeuge) muss aufgrund des Anlaufstromes die Spitzenleistung des Wechselrichters ausreichend hoch sein. Der Notwendigkeit, für Millisekunden einen ca.

zehnmal so hohen Anlaufstrom zu benötigen, tragen höherwertige Modelle Rechnung. Sie vertragen kurzzeitig eine dreimal so hohe Last wie ihre angegebene Dauer-Nennleistung.

## Anwendungen

### Photovoltaik

Ein Solarwechselrichter ist Teil einer Solaranlage. Auf der Eingangsseite befindet sich üblicherweise ein oder mehrere Gleichstromsteller mit Maximum-Power-Point-Tracker, den ein Mikroprozessor steuert und den Zwischenkreis speist. Auf der Ausgangsseite befindet sich ein ein- bis dreiphasiger Wechselrichter und synchronisiert sich automatisch mit dem Stromnetz.

### Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)

Eine USV enthält einen Wechselrichter, der bei Stromausfall im einfachsten Fall mit einem Relais statt des Netzes an die Verbraucher geschaltet wird. Die kurze Umschaltpause von einigen Millisekunden wird von den meisten Verbrauchern toleriert. Der Wechselrichter besteht aus einem Akkumulator, der bei vorhandenem Netz mit einer Ladeschaltung geladen und auf der Ladeschlussspannung gehalten wird. Ältere USV arbeiteten mit einem netzfrequenten Transistor-Zerhacker und einem nachfolgenden netzfrequenten Transformator, heutige Geräte benutzen höherfrequente PWM-Wechselrichter und sind daher leichter.

### Frequenzumrichter und NetZRückspeisung

Eine weitere Anwendung findet der Wechselrichter als Komponente eines Frequenzumrichters. Hier wird aus einer Wechselspannung nach Gleichrichtung (Zwischenkreis) eine Wechselspannung anderer Frequenz erzeugt. Damit kann beispielsweise ein Asynchronmotor in der Drehzahl geregelt werden. Die Energie beim Abbremsen des Motors, er arbeitet dann als Generator, wird bei einfachen Frequenzumrichtern in einem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Um diese Energie stattdessen ins Netz rückspeisen zu können, kann am Zwischenkreis ein netzgeführter Wechselrichter angeschlossen werden. Es entsteht ein 4-Quadranten-Umrichter. Solche Umrichter können auch ohne Gleichrichter und Zwischenkreis realisiert werden (Matrix-Umrichter).

An drehzahlveränderlichen Wasser- oder Windkraftanlagen ist ebenfalls ein 4-Quadranten-Umrichter erforderlich.

### Wechselrichter in Kraftfahrzeugen

Wechselrichter für den Einsatz in Kraftfahrzeugen sind meist für den Anschluss an den Zigarettenanzünder oder für Festanschluss (Wohnmobile, Busse, LKW) ausgelegt. Es gibt sie für 12 Volt (PKW) und 24 Volt (LKW, Busse).

Der erste Fahrzeughersteller, der in einem Serien-PKW einen Wechselrichter mit der Netzspannung 230 V anbot, war die Volkswagen AG. Mittlerweile sind für verschiedene PKW-Modelle Wechselrichter mit einer Steckdose für Eurostecker als Sonderausstattung zu haben, Wechselrichter mit Haushaltssteckdosen sind auch erhältlich.

Beim Betrieb von Wechselrichtern höherer Leistung über den Zigarettenanzünder an einem 12-Volt-Bordnetz ist zu beachten, dass bei der niedrigen Spannung von 12 V ein sehr hoher Strom geführt werden muss (Wärmeentwicklung, Kontaktbelastung). Der Zigarettenanzünder ist in der Regel mit 15 A abgesichert und sollte dauerhaft nicht mit mehr als 10 A belastet werden, um die Kontakterwärmung in Grenzen zu halten. Es können also nur Verbraucher mit bis etwa 100 bis 150 Watt Dauerleistungsaufnahme am Zigarettenanzünder betrieben werden. Zudem sind die starke Belastung der Bordbatterie und deren geringe Zyklenlebensdauer zu beachten. Eine Entladetiefe von unter 30 % sollte vermieden werden; somit lassen sich aus einer üblichen 50-Ah-Batterie sinnvoll max. 35 Ah entnehmen.

Bei laufendem Motor muss beachtet werden, dass die Lichtmaschine zwar einen Ladestrom im Bereich von 50 A liefern kann, ein beträchtlicher Teil aber durch die Beleuchtung und andere Verbraucher aufgenommen wird, wodurch bereits bei einem Laststrom von 20 A zusätzlich eine Entladung der Batterie stattfinden kann.

Wechselrichter, die für den Einsatz in Kraftfahrzeugen vorgesehen sind, müssen eine E-Kennzeichnung enthalten. Dieses Zeichen weist darauf hin, dass das Bauteil die erforderlichen Prüfungen und Genehmigungen bestanden hat und somit in Kraftfahrzeugen eingebaut werden darf.

### Beleuchtung

Anwendung findet der Inverter, hier in Form eines Resonanzwandlers, bei Leistungen im Bereich von einigen 10 W als elektronisches Vorschaltgerät in Leuchtstofflampen.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet dieser Inverter ist die Stromversorgung von Leuchtröhren (CCFL), die häufig als Hintergrundbeleuchtung für TFT-Flachbildschirme verwendet werden.

Inverter aus dem Sockel einer Kompaktleuchtstofflampe

### Aufbau

Wechselrichter können elektromechanisch als Zerhacker oder Motorgenerator oder elektronisch mit Röhren oder Halbleiter realisiert werden. Bei den früher üblichen Zerhackern (Kontaktwechselrichter) polt ein mechanischer Kontakt periodisch die zugeführte Gleichspannung mit einem Wagnerschen Hammer um. Den dabei auftretenden Kontaktverschleiß verringerte der Turbowechselrichter. Bei ihm sind die periodisch schaltenden Kontakte durch einen Quecksilberstrahl ersetzt, der sich in einer geschlossenen Kammer von einem Motor betrieben im Kreis dreht.

### Mit Elektronenröhren

Mit Vakuumröhren realisierte Wechselrichter sind nur für kleinere Leistungen geeignet, sind mechanisch empfindlich und wurden kaum gebaut. Wechselrichter größerer Leistung wurden mit steuerbaren Quecksilberventilen (Thyratrons) realisiert. Später verwendete man für diesen Zweck Thyristoren (mit Löschthyristor oder GTO).

### Mit Halbleitern

Alle diese Frequenzumrichter arbeiteten im Takt der Frequenz der zu erzeugenden Wechselspannung und konnten keine Sinus-Ausgangsspannung erzeugen. Diese Wechselrichter sind in der Schaltfrequenz daher auf wenige hundert Hertz begrenzt, meist arbeiteten sie mit 50 Hz. Leistungstransistoren (Bipolartransistoren, MOSFET, IGBT) können das Zerhacken der Gleichspannung mit hoher Effizienz und ohne Verschleiß bewerkstelligen, sie arbeiteten u. a. in USV im Rechteckbetrieb mit 50 Hz und speisten wie auch früher die Zerhacker einen 50-Hz-Transformator. Eine solche Schaltung wäre z. B. ein Vierquadrantensteller.

Transistoren ermöglichen jedoch auch Schaltfrequenzen von bis zu einigen 10 kHz und arbeiten dann im Chopperbetrieb. Dies wird auch als Unterschwingungsverfahren bezeichnet: Mit den als Schaltelemente verwendeten Transistoren (meist IGBT) wird durch Pulsweitenmodulation (PWM) im Chopperbetrieb eine Sinus-Wechselspannung aus kurzen Pulsen hoher Frequenz (einige bis über 20 kHz) nachgebildet (Sinus-Wechselrichter). Die Transistoren polen, wie auch früher die Zerhacker, die Gleichspannung periodisch um, jedoch mit höherer Frequenz. Der Mittelwert der hochfrequenten, pulsweitenmodulierten Schaltfrequenz ist die Ausgangs-Wechselspannung. Man setzt also die Ausgangswechselspannung aus kleinen, unterschiedlich breiten Impulsen zusammen und nähert so den netzüblichen sinusförmigen Spannungsverlauf an. Zur Glättung der PWM dienen Drosseln, die jedoch viel kleiner sind als solche, die für die Glättung der Ausgangswechselspannung früherer Wechselrichter erforderlich waren. Bei Motoren kann auf eine Drossel ganz verzichtet werden. Die Grundschaltungen sind in Schaltnetzteilen zu finden. Der Unterschied besteht in der modulierten Referenzspannung zur Steuerung der Ausgangsspannung.

⇒ Umrichter

### Wechselstrom

AC, Alternating Current, Schaltzeichen  $\sim$

elektr. Strom, dessen Stärke und Richtung sich periodisch mit der Zeit ändern.

Die Zeit zwischen zwei in Größe und Richtung gleichen Werten des Stromes heißt Periode T. Der Verlauf zwischen 2 aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen wird als positive oder negative Halbwelle bezeichnet.

Die Anzahl der Perioden / s,  $1 / T$ , heißt Frequenz und wird in Hertz (Hz) gemessen.  $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ .

Die Frequenz beträgt für den gewöhnlichen W. in Europa 50, in Amerika 60 Hz. Bei 50 Hz beträgt die Dauer einer Periode 20 ms.

In der Technik werden meist sinusförmige W. verwendet; für ihren zeitl. Verlauf gilt:

(I<sub>t</sub>) Momentanwert zum Zeitpunkt t

I<sub>0</sub> Scheitelstromstärke, mit Kreisfrequenz  $\omega$ , Frequenz  $\nu$  des W. und Periodendauer T.  
Entsprechend der Wechselspannung gilt für den Effektivwert I<sub>eff</sub> des W.:

Wechselströme entstehen primär durch Induktion im elektr. Generator; ihre Frequenz ist meist 50/60 Hz (Netzfrequenz). Durch Verkettung dreier, um je 120° phasenverschobener W. entsteht ein Drehstrom.

### Prinzipschaltbild eines Einphasenwechselrichters.

Die elektronischen Schalter S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub> (meist Thyristoren oder Transistoren) werden durch eine Ansteuerelektrode abwechselnd geöffnet und geschlossen

Verlauf der Ausgangsspannung

Kenngrößen eines sinusförmigen  
Wechselstromes

## Wechselstrommaschinen

elektr. Maschinen, die Wechsel- bzw. Drehstrom erzeugen (Generatoren) oder verbrauchen (Elektromotoren).

Im Prinzip können alle W. als Generator oder als Motor arbeiten. Sie bestehen aus einem feststehenden Teil, dem Ständer (Stator), und einem rotierenden Teil, dem Läufer (Rotor), meist innerhalb des Ständers. Diese durch einen Luftspalt voneinander getrennten Teile tragen Wicklungen. In der jeweils auf dem anderen Maschinenteil befindl. Ankerwicklung induziert das Hauptfeld eine Spannung, so daß bei Generatorbetrieb Wechsel- bzw. Drehstrom ins Netz geliefert, bei Motorbetrieb Strom aufgenommen wird, der den Läufer in Drehung versetzt.

Die gebräuchlichsten Wechselstromgeneratoren sind

- Synchrongeneratoren:  
eine gleichstromerregte Polradwicklung (Stromzuführung über Schleifringe) rotiert an einer feststehenden, stromliefernden Ständerwicklung vorbei. Ordnet man 3 um 120° versetzte Ständerspulen an, wird Drehstrom erzeugt (Drehstromgenerator).
- Der Drehstromsynchronmotor ist wie der Synchrongenerator aufgebaut. Bei sehr kleinen Leistungen dient er zum Antrieb z.B. von Uhren und Plattenspielern.
- Der Asynchronmotor (Induktionsmotor) hat die gleiche dreh- felderzeugende Ständerwicklung wie der Synchronmotor. Das Drehfeld (Drehzahl  $n_1$ ) induziert in die Läuferwicklung Spannungen, die Kraftwirkung der daraus resultierenden Ströme treibt den Läufer bis zur Drehzahl  $n_2$  an, die unter der Drehzahl des Ständerfeldes liegt, da bei gleicher Drehzahl keine Spannung mehr in den Läufer induziert wird. Das Verhältnis  $n_2/n_1$  heißt Schlupf.
- Der Käfigläufermotor hat eine direkt kurzgeschlossene käfigartige Läuferwicklung und ist wegen seiner Einfachheit und Betriebssicherheit weit verbreitet.



## Wechselwirkung

die gegenseitige Beeinflussung zweier oder mehrerer Objekte oder Größen.

Physik: die gleichzeitige, gegenseitige Einwirkung zweier physikalischer Systeme, gekennzeichnet durch Austausch von Energie u.a. physikalischen Größen.

Die Wechselwirkung wird in der nichtrelativistischen Mechanik durch die entgegengesetzt gleichen Kräfte (actio = reactio) der Systeme aufeinander beschrieben, die augenblicklich über beliebige Entfernungen wirken (Fernwirkung); nach der relativistischen Physik wird die Wechselwirkung lokal in jedem Raum-Zeit-Punkt durch reale Felder vermittelt (Nahewirkung).

Alle in der Natur vorkommenden Kräfte lassen sich nach dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik auf vier fundamentale Wechselwirkungen (Kopplungen) zwischen den Grundbausteinen der Materie, den Leptonen und den Quarks, zurückführen, die durch den Austausch von Teilchen (Feldquanten, Wechselwirkungsquanten) vermittelt werden.

Ursache der Verschiedenartigkeit dieser Kräfte sind ihre unterschiedliche Reichweite (dieser Unterschied wird bei kleineren Abständen beziehungsweise höheren Energien immer unbedeutender) sowie die der Theorie zugrunde liegende innere Symmetriegruppe, die die Art der Wechselwirkung und die Zahl der ausgetauschten Teilchen festlegt.

Die in (sub-)nuklearen Bereichen wirksame starke Wechselwirkung (einschließlich der Kernkräfte) ist sehr kurzreichweitig (10cm) und die stärkste der vier Kopplungen. Träger dieser Wechselwirkung, der die Hadronen unterliegen und die den Aufbau der Hadronen aus Quarks bewirkt, sind die Gluonen.

Zweitstärkste Wechselwirkung ist die durch Photonen vermittelte elektromagnetische Wechselwirkung unendlich großer Reichweite. Ihr unterliegen das Photon sowie alle geladenen und solche ungeladenen Elementarteilchen, die ein magnetisches Moment oder elektrische und/oder magnetische Multipolmomente höherer Ordnung aufweisen. Der Aufbau der Atome aus Elektronen und Atomkernen beruht auf der elektromagnetischen Wechselwirkung, die auch bestimmend für die chemischen Verbindungen ist.

Die zwischen allen Elementarteilchen mit Ausnahme des Photons wirksame sehr kurzreichweitige (rund 10cm) schwache Wechselwirkung wird durch die intermediären Bosonen (Eichbosonen) W, W und Z vermittelt. Sie bewirkt z.B. den Betazerfall instabiler Atomkerne und die Kräfte, die Neutrinos auf Quarks ausüben.

Schwächste Kraft ist die Gravitationswechselwirkung (Gravitation) unendlicher Reichweite, die zwischen allen Elementarteilchen wirkt und v.a. in makroskopischen (astronomischen) Systemen von Bedeutung ist; ihr Feldquant ist das (hypothetische) Graviton.

Die Stärken der Wechselwirkung, die durch energieabhängige Kopplungskonstanten charakterisiert werden, verhalten sich in der Reihenfolge starke, elektromagnetische, schwache und Gravitationswechselwirkung etwa wie 1:10:10.

Nachdem es gelungen ist, innerhalb des Standardmodells die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung bei Energien über rund 100 GeV zur elektroschwachen Wechselwirkung zusammenzufassen und diese sowie die starke Wechselwirkung durch strukturell der Quantenelektrodynamik ähnliche Theorien (Glashow-Salam-Weinberg-Theorie, Quantenchromodynamik) zu beschreiben, liegt die Zusammenfassung zu einer einheitlichen Theorie nahe.

Für diese Große Vereinheitlichte Theorie wurden verschiedene Ansätze mit Modellen von Eichfeldtheorien gemacht (z.B. die Georgi-Glashow-Theorie), um die starke und elektroschwache Wechselwirkung in einer durch eine einzige (kompakte) Symmetriegruppe charakterisierten Wechselwirkung zu vereinen; die ausgetauschten Teilchen treten als Feldquanten von Eichfeldern auf.

Die Vereinigung der starken mit der elektroschwachen Wechselwirkung erfordert die Einführung einer neuen superschwachen Wechselwirkung, die wahrscheinlich noch 10-mal schwächer als die normale schwache Wechselwirkung ist und durch die Quarks (Teilchen mit Farbladung) in Leptonen (Teilchen ohne Farbladung) beziehungsweise umgekehrt ineinander umgewandelt werden können, was auch einen Zerfall des Protons bewirkt.

Eine Vereinigung der Gravitations- mit den drei anderen Wechselwirkungen wird für Energien oberhalb 10 GeV erwartet, bei denen die Gravitationskräfte zwischen Elementarteilchen stärker als die starke und die elektroschwache Kraft werden (Supergravitation). Derartig hohe Energien waren in der Frühphase der Entwicklung des Kosmos von Bedeutung (Kosmologie).

## Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie

Materialkonstanten zur Beschreibung der Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie beziehen sich erstens auf die atomaren Prozesse (Wirkungsquerschnitte), zweitens auf die durch die Wechselwirkung bewirkte, makroskopisch beobachtbare Veränderung der Strahlung selbst (z. B. Streuung, Schwächung, Energieumwandlung, Abbremsung oder Absorption der Strahlung) und drittens auf Faktoren, welche die Ausbeute je eingestrahelter Energiemenge für einen bestimmten Effekt wiedergeben (z. B. chemische Veränderungen, Erwärmung, Ionisation oder Fluoreszenz).

## Wechselwirkungskoeffizienten

Schwächungskoeffizient (Photonen)

Die Schwächung eines unendlich schmalen, parallelen Photonenstrahlbündels mit der spektralen Energieflußdichteverteilung  $E$ , das eine Materieschicht der Dicke  $dz$  durchquert, wird beschrieben durch

$\mu$  ist der lineare Schwächungskoeffizient für das betreffende Material. Er kann auch durch die Zahl  $dN$  der Wechselwirkungen in der Schicht  $dz$  bei  $N$  auftreffenden Photonen beschrieben werden

$$\mu = (1/N)dN/dz \quad \text{Einheit : m}^{-1}$$

Der Schwächungskoeffizient  $\mu$  kann in drei Teil-Schwächungskoeffizienten zerlegt werden, die verschiedenen Prozessen zugeordnet sind. Sie werden mit  $\mu_{\text{pe}}$  für den photoelektrischen Effekt,  $\mu_{\text{s}}$  für die Streuung und  $\mu_{\text{x}}$  für die Paarerzeugung bezeichnet.

Als Schwächungslänge wird der Kehrwert  $1/\mu$  bezeichnet.

Der Massen-Schwächungskoeffizient für einen Stoff der Dichte  $\rho$  ist die Größe  $\mu/\rho$  Einheit:  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$

## Weglänge, freie

Der Weg, den Teilchen beim Durchgang durch Materie zwischen 2 Stößen zurücklegen.

Zwischen mittlerer f. W. ( $\lambda$ ) von Neutronen und dem makroskopischen Wirkungsquerschnitt  $\Sigma$  besteht die Beziehung  $\lambda=1/\Sigma$ . Betrachtet man nur Streuung oder Absorption, erhält man die Streuweglänge  $\lambda_{\text{s}}$  oder die Absorptionsweglänge ( $\lambda_{\text{a}}$ ), aus denen sich die f. W. insgesamt berechnet nach:

Für thermische Neutronen und Graphit (Dichte 1,6) ist

und die Zahl der Atome /  $\text{cm}^3$

$\rho$  Dichte  
 $N_A$  Avogadro-Konstante

Es folgt  $\lambda = 2,6 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 3.700 \text{ cm}$

## Wehnelt

Arthur Rudolph, \* Rio de Janeiro 4.4.1871, † Berlin 15.2.1944, dt. Physiker.

Nachdem Arthur Wehnelt am Luisenstädtischen Gymnasium in Berlin in der Tertia zweimal sitzengeblieben war, schickte man ihn auf das Realgymnasium in Landsberg an der Warthe, wo er 1892 die Reifeprüfung bestand. Seinen Militärdienst leistete er in Brandenburg.[2]

Er studierte Physik an der Technischen Hochschule Charlottenburg und von 1893 bis 1897 an der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin. Er promovierte 1898 in Erlangen, wo Eilhard Wiedemann sein Lehrer war. Nach seiner Habilitation im Jahre 1901 unterrichtete er als Privatdozent und ab 1904 als außerordentlicher Professor der Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 1906 wechselte Wehnelt als Professor an die Universität Berlin zurück, 1934 wurde er zum Direktor des Physikalischen Instituts ernannt, 1937 emeritiert. Im Jahr 1940 erhielt er die Goethe-Medaille für Kunst und Wissenschaft. Seine letzten Lebensjahre verbrachte er in Berlin-Frohnau.

1899 erfand Wehnelt den Wehnelt-Unterbrecher auf Elektrolytbasis, der das schnelle rhythmische Unterbrechen eines Gleichstroms ermöglicht.

Seine Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektronenemission, der Wehneltzylinder (1902/03) und die Oxidkathode / Wehnelt-Kathode (1905), verbesserten die von Ferdinand Braun erfundene Kathodenstrahlröhre, die später u. a. für Fernsehgeräte und Computermonitore wesentlich wurde.

1926 gelang Wehnelt als Erstem der experimentelle Nachweis der Raumladung in Elektronenröhren.

### Wehneltzylinder

Der Wehneltzylinder ist eine zylinderförmige Steuerelektrode zum Regeln der Helligkeit in Kathodenstrahlröhren und zum Fokussieren von Elektronenstrahlen. Er wurde in den Jahren 1902/03 von Arthur Wehnelt entwickelt.

Der Wehneltzylinder wird in unmittelbarer Nähe einer Glühkathode angebracht und ihr gegenüber mit einem negativen elektrischen Potential versehen.

Durch Einstellen dieser Spannung verändert sich die Anzahl der Elektronen, die das Potential überwinden können, und somit die Intensität des Elektronenstrahles.

Elektronen, deren Flugrichtung sehr weit von der Strahlachse abweicht, werden durch das negative Potential der Zylinderwand gleichmäßig von dieser abgestoßen und somit wieder zur Strahlachse hin gelenkt. Der Elektronenstrahl wird gebündelt und es ist nun leichter, Versuche mit ihm durchzuführen, z. B. in der Fadenstrahlröhre.

Durch den Wehneltzylinder konnte die vorher notwendige sehr hohe Anodenspannung deutlich reduziert werden.

### Weichstrahlröhre

Röntgenröhre für die Oberflächentherapie, die mit einem Beryllium-Strahl Austrittsfenster (0,8–1 mm Dicke) ausgerüstet ist.

Durch die geringe Eigenfilterung des Berylliums können die in der Röntgenröhre mit entstehenden sehr weichen Strahlenanteile Grenzstrahlung für bestimmte Oberflächentherapie-Behandlungen ausgenutzt werden.

Durch Einstellung unterschiedlicher Röhrensparnungen in Verbindung mit Zusatzfiltern kann Röntgenstrahlung mit unterschiedlicher Tiefenwirkung zur Anwendung kommen.

Mit Einführung der W. konnte auf vorher übliche Grenzstrahlröhren verzichtet werden.

W. kommen an Oberflächentherapieeinrichtungen oder in Kombination mit Nahbestrahlungsröhren in Nahbestrahlungs-Therapieeinrichtungen zum Einsatz.

### Weichstrahltechnik

Nicht scharf abzugrenzender Begriff der Röntgendiagnostik. Wird benutzt, wenn man die Wahl einer niedrigen Spannung betonen will, z.B. bei der Mammographie.

## Weiss'sche Bezirke

Kleine Bereiche innerhalb der ferromagnetischen Stoffe in denen die spontane Magnetisierung eine einheitliche Richtung hat. Die spontane Magnetisierung liegt stets in einer bestimmten Richtung gegenüber dem Kristallgitter, beim Eisen zum Beispiel in Richtung der Kristallachsen, beim Nickel in Richtung der Raumdiagonalen des Gitterwürfels. In einem entmagnetisierten ferromagnetischen Stoff kommen nun alle diese 'Vorzugsrichtungen' gleich häufig vor, jeweils ein Sechstel der Weiss'schen Bezirke im Eisen zum Beispiel ist in einer der sechs Achsenrichtungen des Eisen-Kristallgitters spontan magnetisiert. Die Form der Weiss'schen Bezirke ist verschieden, sie sind quader- oder lamellenförmig, jedenfalls aber von ebenen Flächen begrenzt.

Diese Grenzflächen heißen Blochwände und sind ein Hundertstel bis ein Tausendstel Millimeter dicke Zonen, in denen die spontane Magnetisierung ihre Richtung ändert. Sichtbar machen kann man die Blochwände und damit auch die Weiss'schen Bezirke an polierten Metalloberflächen mit Hilfe der sogenannten Bitterstreifen:

Bringt man einen Flüssigkeitstropfen, der magnetische Teilchen in Suspension enthält, auf die Oberfläche, so halten die magnetischen Teilchen an den Stellen, an denen eine Blochwand an die Oberfläche tritt. Im Mikroskop sieht man dann ein scharfes Linienmuster, das die Form der Weiss'schen Bezirke deutlich erkennen läßt.

## Welle

### Physik:

räumlich und zeitlich period. Vorgang, bei dem Energie transportiert wird, ohne daß gleichzeitig auch ein Massetransport stattfindet. Die transportierte Energie wechselt dabei periodisch ihre Form. Wellenvorgänge spielen in vielen Gebieten der Physik eine bed. Rolle (z.B. Schall-Welle., elektromagnet. W., Erdbeben-W. u.a.)

Erregt man z.B. in einem elast. Medium eine Stelle (Wellenzentrum) zu harmon. Schwingungen, so breitet sich der Schwingungszustand des Wellenzentrums nach allen Seiten aus.

Die so entstandene W. wird als Kugelwelle bezeichnet. Kann sich die W. nur in einer Ebene ausbreiten, so entsteht eine Kreiswelle.

Erfolgt die Wellenausbreitung nur in einer Richtung, dann spricht man von einer linearen Welle.

Je nach der Schwingungsrichtung der schwingenden Teilchen des Ausbreitungsmediums unterscheidet man zwei Wellenarten: Longitudinalwellen (Längswellen), bei denen Schwingungsrichtung und Ausbreitungsrichtung parallel sind, und Transversalwellen (Querwellen), bei denen Schwingungsrichtung und Ausbreitungsrichtung senkrecht aufeinander stehen.

Laufen 2 Wellen gleicher Amplitude und Frequenz aufeinander zu, so kommt es bei ihrer Überlagerung zur Ausbildung einer stehenden Welle; dabei gibt es Stellen des Ausbreitungsmediums, die ständig in Ruhe sind (Schwingungsknoten), und solche, an denen ständig Schwingungen mit maximaler Amplitude stattfinden (Schwingungsbäuche).

Zur Bestimmung einer Welle verwendet man folgende Größen:

- Wellenlänge
- Wellenzahl, Formelzeichen  $n$ : reziproker Wert der Wellenlänge. Die Wellenzahl gibt an, wie viele Wellen in der Längeneinheit enthalten sind
- Frequenz, Formelzeichen  $f$ : Frequenz der schwingenden Teilchen des Ausbreitungsmediums
- Fortpflanzungsgeschwindigkeit, Formelzeichen  $c$ : die Geschwindigkeit, mit der sich die vom Wellenzentrum ausgehende Erregung im Ausbreitungsmedium fortpflanzt.

Zw. Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $c$ , Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $f$  besteht die Beziehung

$$c = f \cdot \lambda$$

- Amplitude, Formelzeichen  $A$ : Amplitude der schwingenden Teilchen des Ausbreitungsmediums.

Um den Begriff von Welle und Wellenlänge zu verstehen, denken wir an den Effekt, der in einem ruhigen Wasser hervorgerufen wird, wenn man eine Angelleine hineinwirft.

Wenn das Senkblei an der Leine auf das Wasser schlägt, verursacht ein Teil seiner Energie Wellen, die in immer größer werdenden Kreisen sich nach außen fortsetzen.

Obgleich das Wasser in Bewegung ist, bewegt es sich doch nicht fort, wie man an dem Verhalten eines schwimmenden Blattes beobachten kann, das mit den Wellen steigt und fällt, aber nur an seinem ursprünglichen Platz auf und ab schwingt. Die Wellenenergie jedoch pflanzt sich von der Mitte aus fort. Die Wellenlänge von Wasserwellen ist die Entfernung von Wellenkamm zu Wellenkamm oder von Wellental zu Wellental.

Bei jeder Art von Wellen ist die Wellenlänge die Entfernung zweier aufeinanderfolgender, übereinstimmender Punkte. Licht, Radiowellen, Röntgenstrahlen usw. sind Energiewellen mit elektrischer und magnetischer Wirkung. Sie werden elektromagnetische Wellen genannt und setzen sich mit einer ungeheuren Geschwindigkeit von ungefähr 300 000 km pro Sekunde fort. Alle diese Arten elektromagnetischer Ausstrahlungen werden entsprechend ihrer Wellenlängen in das elektromagnetische Wellenspektrum eingereiht.

### **Maschinenbau:**

Maschinenelement zur Übertragung von Drehmomenten; glatte Wellen werden z.B. für Transmissionen verwendet, Kurbel-Wellen v.a. für Kolbenmotoren.

### **Wellenlänge**

Die Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt den Abstand zweier aufeinander folgender Wellentäler oder Wellenberge bzw. zweier Punkte eines schwingenden Mediums, welche sich im gleichen Schwingungszustand befinden. Der Phasenunterschied beträgt  $2\pi$ .

Der zwischen 2 Nulldurchgängen gelegene Teil einer Welle heißt Halbwelle. Bei Wechselspannungen und -strömen spricht man von positiven bzw. negativen Halbwellen.

## Wellenspektrum

Das Schema zeigt Reihenfolge und Anwendungsmöglichkeiten einiger Wellenarten.

Die Länge einer elektromagnetischen Welle, die durch 60 Hertz Wechselstrom erzeugt wird, hat ungefähr die Entfernung von Küste zu Küste der USA.

Kurze Funkwellen sind ungefähr gleich der Größe eines Menschen.

Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts im Zentrum des sichtbaren Spektrums ist ungefähr 550 nm, während die Röntgenstrahlen, die in der medizinischen Radiographie verwendet werden (Hauptanteil im Röntgenstrahlspektrum), eine Wellenlänge von ungefähr 55 pm besitzen.

Daher ist die Wellenlänge von Röntgenstrahlen nur ungefähr  $1/10000$  ( $0,55 \text{ \AA}$ ) der des sichtbaren Lichts.

### Welle-Teilchen-Dualismus

Teilchen-Welle-Dualismus

Bez. für die an Gesamtheiten von mikrophysikal. Objekten zu beobachtende Erscheinung, daß sie sich je nach Art des Experiments entweder wie eine Gesamtheit von Teilchen oder wie eine Welle verhalten. So lassen sich z.B. die Beugungs- und Interferenzversuche an Licht zwanglos mit Hilfe eines ausgedehnten Wellenfeldes beschreiben, während die inelast. mikrophysikal. Wechselwirkung des Lichts mit Materie (z.B. Photoeffekt) nur als Absorption bzw. Emission von Photonen gedeutet werden kann.

## Welligkeit

Pulsation einer Gleichspannung

Verhältnis aus Differenz von Maximal- und Minimalwert zum Maximalwert (Scheitelwert); meist in Prozent angegeben.

Die P. hängt von der gewählten Gleichrichterschaltung ab.

Bei gleicher Scheitelspannung ist die Halbwertsschicht um so kleiner, je größer die P. ist.

Die P. von Röntgeneratoren hängt auch vom Röhrenstrom ab und beträgt 100% für 1- u. 2-Puls-Generatoren, 13–20% für 6-Puls- und etwa 10% für 12-Puls-Generatoren.

Nach einer zweiten Definition wird die P. als Verhältnis des Effektivwertes des Wechselstromanteils zum Mittelwert der Gleichspannung angegeben.

## Wendelabbrand

Um die für Röntgenaufnahmen benötigten Röhrenströme zu erhalten, werden Emittertemperaturen bis zu 2.900 K benötigt.

Bei diesen Temperaturen ist auch bei dem hochschmelzenden Wolfram der Heizwendel schon eine merkliche Metallabdampfung zu beobachten, die einerseits über Metallbelagbildung auf dem Röhrenkolben und damit Beeinträchtigung der Isolation, andererseits aber auch direkt zur Beendigung der Lebensdauer des Emitters infolge Durchschmelzen führt.

Aus diesem Grund wird die Wendel immer nur für die kurze Aufnahmezeit auf Emissionstemperatur geheizt. Um die Zeit bis zum Erreichen der Emissionstemperatur unter einer Sekunde zu halten, wird der Emitter auf etwa 1.500 K vorgeheizt. Bei dieser Temperatur ist die Metallabdampfung so gering, daß noch keine negativen Einflüsse auf die Lebensdauer der Röntgenröhre festgestellt werden können.

## Wertigkeit

Die Wertigkeit gibt an, wieviel Wasserstoffatome ein Atom eines Elements binden oder ersetzen kann.

## Whisker-Drähte

Drähte für elektrische Leitungen, die durch einen sogenannten Selbstheilungseffekt gekennzeichnet sind. Sie besitzen eine 'Seele' aus einer Aluminium-Magnesium-Zinn-Legierung. Bei einer Beschädigung des Drahtes durch Bruch oder Zerreißen wachsen an den Bruchflächen Büschel feinsten Kristallhaare - die sogenannten Whiskers - heraus. Die Büschel vereinigen sich nach kurzer Zeit, überbrücken die Bruchstelle und stellen die Leitfähigkeit wieder her. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist stark temperaturabhängig. Am schnellsten wachsen die Whiskers bei 50 Grad Celsius, doch ist auch bei 20 Grad der Effekt noch technisch brauchbar.

## Wichtungsfaktoren

$W_T$

W. berücksichtigen bei der Bestimmung der effektiven Äquivalentdosis den unterschiedlichen Beitrag der einzelnen Organe oder Gewebe zum Strahlenrisiko bezüglich stochastischer und sind durch Vereinbarungen festgelegt.

Zur Bestimmung des Beitrages der anderen Organe oder Gewebes bei der Berechnung der effektiven Dosis ist die mittlere Teilkörperdosis für jedes der 5 am stärksten strahlenexponierten anderen Organe oder Gewebe zu ermitteln (mit Ausnahme von Augenlinse, Haut, Händen, Unterarmen, Füßen, Unterschenkeln und Knöcheln). Für jedes dieser Organe oder Gewebe wird ein Wichtungsfaktor von 0,06 verwendet.

## Widerstand

1. Mechanik: der Bewegung eines Körpers bzw. physikal. Systems entgegengerichtete Kraft, z.B. der Luftwiderstand.
2. Elektrizitätslehre: (elektr. Widerstand) Formelzeichen  $R$ , die unterschiedlich stark ausgeprägte Eigenschaft von Stoffen (allg. von Materie), den elektr. Stromfluß zu hemmen; definiert als Quotient aus der zw. den Enden eines Leiters bestehenden elektr. Gleichspannung  $U$  und der Stromstärke  $I$  des in ihm fließenden Gleichstroms:  $R = U/I$ . In Wechselstromkreisen treten neben diesem als Ohmscher  $W$ . bezeichneten Gleichstrom- $W$ . zusätzlich induktive und kapazitive [Blind]widerstände auf. SI-Einheit des elektr.  $W$ . ist das Ohm ( $\Omega$ ).

Der Kehrwert von  $R$ ,  $1/R$ , heißt Leitwert. Der Widerstand eines Leiters ist proportional seiner Länge  $l$  und umgekehrt proportional seinem Querschnitt  $q$ . Es gilt  $R = \rho \cdot l/q$ , wobei  $\rho$  eine für das Material, aus dem der Leiter besteht, spezifische Konstante mit der Einheit  $W \cdot cm$ .  $\rho$  heißt spezifischer, sein Kehrwert  $1/\rho$  heißt Leitvermögen.

3. Ein Schaltungselement u.a. zur Verminderung der Stromstärke in einem Leiter, zur Spannungsteilung. Wichtige  $W$ .daten sind  $W$ .wert (in Ohm) und Belastbarkeit (in Watt).  $W$ . sind häufig als Schicht- oder Draht- $W$ . ausgeführt. Veränderbare  $W$ . sind Schiebe- $W$ ., Potentiometer und Trimmer. Magnetfeldabhängige  $W$ . sind Feldplatten Fluxistoren, spannungsabhängig sind Varistoren, strahlungsabhängig sind Photo- $W$ ., temperaturabhängig sind NTC- $W$ . bzw. PTC- $W$ . (Heiß- bzw. Kaltleiter).

## Ableitwiderstand

Bleeder

--	--	--

Ableitwiderstände werden verwendet, um Kondensatoren auf sichere Spannungspegel zu entladen, nachdem die Stromversorgung unterbrochen wurde. Ein Ableitwiderstand kann entweder über den Kondensator geschaltet werden, um eine schnelle Entladung ohne Ruhestromverlust zu erreichen oder dauerhaft angeschlossen sein, um eine hohe Zuverlässigkeit und geringe Kosten zu erreichen. (Im letzteren Fall gibt es einen Kompromiss zwischen der Zeit bis zum Erreichen der sicheren Entladung und der Ruhestromverlustleistung.

Die Auswahl eines maximal geeigneten Ohmwertes ergibt sich aus einer exponentiellen Entladungsberechnung:

wobei  $T_d$  die Entladezeit,  $C$  der Kapazitätswert unter Annahme einer maximalen positiven Toleranz,  $V_t$  die Sicherheitsschwellenspannung und  $V_0$  die Anfangsspannung ist.

Es sollte der nächstgelegene Standardwert unter  $R_{max}$  verwendet werden.



Für einen gewählten Wert  $R$  ist die Anfangsleistung gegeben durch:  $P_0 = V_0^2/R$

Für einen geschalteten Ableiter ist dies die Spitzenleistung. Für einen fest angeschlossenen Ableiter ist es die Dauerleistung, und der gewählte Widerstand muss entsprechend ausgelegt sein.

Bei Bleeder-Anwendungen ist die Präzision im Allgemeinen unwichtig und eine Toleranz von 5 % kann verwendet werden. Allerdings ist die Sicherheit oft kritisch, und bei netzgekoppelten Anwendungen sollte eine geeignete Sicherheitszulassung wie EN60065 abgerufen werden. Diese Norm stellt sicher, dass die Komponente den blitz- oder schaltinduzierten Überspannungen standhält, die auf Stromleitungen auftreten.

## Spannungsausgleichs-Widerstände

Alle Aluminium-Elektrolytkondensatoren weisen einen Ableitstrom auf, wenn eine Gleichspannung an sie angelegt wird. Dieser kann durch einen parallel zum Kondensator geschalteten Ableitwiderstand modelliert werden. Dieser Widerstand ist nichtlinear, d. h. sein Wert ist eine Funktion der angelegten Spannung. Außerdem ist der Wert schlecht definiert, da er von einem Kondensator zum anderen stark variiert.

Beim Aufbau eines kapazitiven Speichers für einen Hochspannungs-Zwischenkreis ist es üblich, eine Reihenschaltung von zwei Kondensatoren zu verwenden, die jeweils auf die halbe Busspannung ausgelegt sind, wie in Abbildung 4 dargestellt. Wenn die Kondensatoren identisch sind, wird die Busspannung zu gleichen Teilen auf sie verteilt. In der Praxis werden sich jedoch die Ableitwiderstände unterscheiden, was zu einer ungleichen Aufteilung und einer potenziellen Spannungsüberlastung des Kondensators mit dem höheren Ableitwiderstand führt. Mit anderen Worten: Wenn  $R_{1a}(V_a) < R_{1b}(V_b)$  ist, dann ist das Ergebnis  $V_b > V_a$  und ein möglicher Ausfall von  $C_b$ .

Die Lösung ist die Verwendung von Abgleichwiderständen. Dabei handelt es sich um hochwertige Widerstände, die für die entsprechende Spannung ausgelegt und im Wert bis auf wenige Prozent genau angepasst sind. Der Wert muss so hoch wie möglich sein, um die Verlustleistung zu minimieren, wird aber im Allgemeinen so gewählt, dass er nicht mehr als 10 % des niedrigsten Werts des Leakage-Widerstands bei der Nennspannung des Kondensators,  $V$ , beträgt, d. h.  $R_{1b} \geq R_{1a}$ . Auf diese Weise wird die Wirkung der unsymmetrischen internen Kondensatorableitwiderstände durch die der Abgleichwiderstände unterdrückt und die Spannungen werden annähernd ausgeglichen, also:

$$V_a \approx V_b.$$

Um den Gesamtkapazitätswert zu erhöhen, können zwei oder mehr Kondensatorpaare parallel geschaltet werden. Es gibt zwei Konfigurationen, die verwendet werden können; entweder kann eine Bank von parallel geschalteten Kondensatoren durch ein einzelnes Paar Abgleichwiderstände abgeglichen werden (Abbildung 6), oder jedes Kondensatorpaar kann mit einem eigenen Paar Abgleichwiderstände versehen werden (Abbildung 7).

Parallele Kondensatoren

Hohe Zuverlässigkeit beim Abgleich von Parallelkondensatoren

Obwohl die erste Option eine deutlich geringere Anzahl von Bauteilen bietet, leidet sie unter einer deutlich geringeren Zuverlässigkeit. Dies liegt daran, dass ein Kurzschlussausfall eines beliebigen Kondensators

sators in der Bank dazu führt, dass die volle Busspannung an den Kondensatoren in der gegenüberliegenden Hälfte der Schaltung auftritt. Die Ausfallrate der Schaltung für  $n$  Kondensatoren mit einer FIT von  $F$  ist daher  $n \cdot F$ . Die zweite Option bietet eine höhere Zuverlässigkeit, da ein Kurzschlussausfall eines Kondensators nur den Ausfall seines Zwillings verursacht. Je nach dem akzeptablen Grad der Verschlechterung der Glättung kann die FIT-Rate daher  $<F$  sein.

*FIT* (Failure In Time) ist eine Ausfallrate mit der Einheit „Ausfälle pro  $10^9$  Stunden“.

## Spannungsteiler

Eine häufige Anwendung für Widerstände ist der Einsatz in Spannungsteilern zur Messung oder Regelung von Hochspannungsschienen. Abbildung 8 zeigt eine typische Anwendung, bei der der Ausgang eines Hochspannungsnetzteils herunterskaliert und zu Regelungszwecken rückgekoppelt wird. Unter der Annahme, dass die Eingangsimpedanz des Puffers viel größer als  $R_1$  ist, ist die Belastung des Teilers vernachlässigbar, so dass das Spannungsverhältnis einfach gegeben ist durch:

Es ist zu beachten, dass das Spannungsverhältnis nicht gleich dem Widerstandsverhältnis  $R_2 / R_1$  ist, sondern um eins versetzt ist. Daher ist es z. B. für ein Spannungsverhältnis von 1000:1 notwendig, ein Widerstandsverhältnis von 999:1 zu definieren. Für einen diskreten Widerstandsentswurf ist es vorzuziehen, Standardwerte zu wählen.

### Dekadenspannungsverhältnisse mit Standardwerten

Voltage Ratio	R2/R1	R1 (E24/96)	R2 (E12)	Actual Voltage Ratio	Nominal Error
10:1	9	9k1	82k	10,01	0,1%
100:1	99	4k75	470K	99.95	-0,05%
1000:1	999	1K0	1M0	1001	+0,1%
1000:1	999	6k81	6M8	999.5	-0,05%
10000:1	9999	1K0	10M	10001	+0,01%

Besser ist ein Spannungsteiler von  $1,11 \sim 10$ .

Voltage Ratio	R2/R1	R1 (E24/96)	R2 (E12)	Actual Voltage Ratio	Nominal Error
10:1	9	$X = 1,2$ parallel 15	10	10	0,0
100:1	99	$X + 10$	100	100	0,0
1 000:1	999	$X + 100$	1 000	1 000	0,0
1 000:1	999	$X + 1000$	10 000	10 000	0,0
10 000:1	9999	$X + 10 000$	100 000	100 000	0,0

Nachstehend ist das Prinzip eines Spannungsteilers mit einem nominellen Fehler von 0%.

Der wirkliche Fehler hängt ab von der Toleranz der verwendeten Widerstände.

## Widerstandsdrähte

Die Lebensdauer von Widerstandsdrähten ist abhängig von der Erwärmung. Möglichst geringe Oberflächenleistung verlängert sie. Man kann aus der Stromstärke und dem Drahtwiderstand zwar die erzeugte Wärmemenge in Kalorien berechnen, nicht jedoch die entstehende Drahttemperatur, weil diese von den in der Rechnung nicht zu erfassenden Abkühlungsverhältnissen abhängt.

Den für eine bestimmte Leistung und Spannung errechneten Ohmwert soll man nicht durch einen kurzen dünnen, sondern durch einen langen dicken Draht herstellen.

Die für eine annehmbare Lebensdauer zulässigen Dauer-Grenztemperaturen liegen für eisenhaltigen Chromnickeldraht bei 800 ° C, für Konstantandraht bei 500 ° C.

Ein Anhalt für Berechnungen, der auch die Belastbarkeit verschieden dicker Drähte untereinander vergleichen läßt, liegt in den durch Versuche ermittelten Temperaturen von frei in ruhiger Luft von 20 ° C ausgedehnten Drähten bei bestimmten Stromstärken.

Die praktischen Verhältnisse lassen den Draht bei den angegebenen Belastungen erheblich wärmer werden, denn die Wärmeleitung von frei ausgedehnten Drähten ist sehr groß; eng aneinanderliegende Drähte erwärmen sich gegenseitig. So wird z. B. die Chromnickeldrahtspirale in elektrischen Strahlöfen um etwa 300 ° C wärmer als ein gleich hoch belasteter, frei ausgedehnter Draht. Wickelt man Heizdraht auf ein feuerfestes keramisches Rohr und umgibt die Wicklung mit einer wärmeisolierenden Packung, so wird der Draht um 500 ° C wärmer, als den Tabellenwerten entspricht. Bei vielen anderen Einbauarten kann nur durch praktischen Versuch die Drahtstärke richtig bemessen werden.

<b>Eisenhaltiger Chromnickeldraht</b>		<b>WM110 DIN VDE 6460</b>							
Strombelastung von frei ausgedehnten Drähten in ruhiger Luft von etwa 20 ° C									
Belastung in Ampere bei einer Drahttemperatur von ° C									
	200°	300°	400°	500°	600°	700°	800°	900°	1000°
0,03	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	—	—	—
0,035	0,08	0,10	0,12	0,15	0,18	0,21	—	—	—
0,04	0,09	0,11	0,14	0,17	0,21	0,24	—	—	—
0,045	0,10	0,13	0,16	0,20	0,24	0,28	—	—	—
0,05	0,11	0,14	0,18	0,22	0,27	0,31	0,36	—	—
0,055	0,12	0,16	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	—	—
0,06	0,13	0,17	0,22	0,27	0,33	0,39	0,45	—	—
0,065	0,14	0,19	0,24	0,30	0,36	0,43	0,49	—	—
0,07	0,15	0,21	0,27	0,33	0,40	0,47	0,54	0,61	—
0,075	0,16	0,23	0,29	0,36	0,43	0,51	0,58	0,66	—
0,08	0,17	0,24	0,32	0,39	0,47	0,55	0,63	0,71	—
0,09	0,19	0,28	0,37	0,45	0,54	0,63	0,72	0,82	—
0,1	0,21	0,31	0,42	0,52	0,62	0,72	0,82	0,92	1,02
0,11	0,23	0,35	0,47	0,58	0,70	0,81	0,92	1,03	1,14
0,12	0,25	0,38	0,52	0,65	0,77	0,89	1,01	1,13	1,26
0,13	0,28	0,42	0,57	0,71	0,84	0,98	1,11	1,24	1,38
0,14	0,30	0,46	0,62	0,78	0,92	1,07	1,21	1,35	1,50
0,15	0,33	0,50	0,67	0,84	1,00	1,15	1,30	1,46	1,63
0,16	0,35	0,54	0,72	0,91	1,08	1,24	1,40	1,58	1,76
0,17	0,38	0,58	0,78	0,98	1,16	1,34	1,51	1,70	1,90
0,18	0,40	0,62	0,83	1,04	1,23	1,43	1,63	1,83	2,04
0,2	0,45	0,70	0,94	1,17	1,40	1,63	1,85	2,10	2,35
0,22	0,50	0,78	1,04	1,30	1,57	1,83	2,08	2,35	2,65
0,25	0,57	0,90	1,21	1,52	1,83	2,15	2,45	2,80	3,15

## Lex W

0,28	0,65	1,02	1,38	1,74	2,10	2,45	2,85	3,25	3,65
0,3	0,70	1,10	1,50	1,90	2,30	2,70	3,10	3,55	4,00
0,32	0,76	1,19	1,62	2,06	2,60	2,95	3,40	3,85	4,35
0,35	0,85	1,35	1,80	2,30	2,80	3,30	3,80	4,35	4,90
0,38	0,94	1,46	1,98	2,55	3,10	3,65	4,20	4,80	5,45
0,4	1,00	1,55	2,10	2,70	3,30	3,90	4,50	5,15	5,85
0,45	1,15	1,77	2,40	3,10	3,80	4,50	5,25	6,00	6,85
0,5	1,30	2,00	2,70	3,50	4,30	5,15	6,00	6,90	7,85
0,55	1,45	2,22	3,05	3,95	4,85	5,80	6,80	7,80	8,85
0,6	1,60	2,45	3,40	4,40	5,45	6,50*	7,60	8,70	9,90
0,65	1,75	2,70	3,80	4,90	6,05	7,20	8,45	9,70	11,0
0,7	1,90	2,95	4,15	5,40	6,65	7,95	9,30	10,7	12,1
0,8	2,25	3,50	4,90	6,40	7,90	9,50	11,1	12,7	14,4
0,9	2,60	4,10	5,70	7,40	9,20	11,1	13,0	15,0	17,1
1	3,00	4,70	6,60	8,50	10,6	12,7	15,0	17,4	19,8
1,1	3,40	5,40	7,50	9,70	12,0	14,5	17,0	20,0	22,5
1,2	3,80	6,10	8,40	10,9	13,5	16,5	19,2	22,5	25,5
1,3	4,20	6,80	9,40	12,2	15,2	18,5	21,5	25,0	28,5
1,4	4,60	7,50	10,4	13,5	16,9	20,5	24,0	27,5	31,5
1,5	5,00	8,20	11,4	14,8	18,5	22,5	26,5	30,5	34,5
1,6	5,50	8,90	12,4	16,2	20,2	24,5	29,0	33,5	38,0
1,7	6,00	9,60	13,5	17,6	22,0	26,5	31,5	36,5	41,5
1,8	6,50	10,4	14,6	19,0	24,0	29,0	34,0	39,5	45,0
1,9	7,00	11,2	15,7	20,5	26,0	31,5	37,0	42,5	48,5
2	7,50	12,0	16,9	22,0	28,0	34,0	40,0	46,0	52,5
2,2	8,50	13,7	19,2	25,0	32,0	39,0	46,0	53,5	61,0
2,5	10,2	16,5	23,0	30,0	38,5	47,0	56,0	65,0	74,0
2,8	12,2	19,7	27,5	36,0	46,0	56,0	66,0	77,0	88,0
3	13,7	22,0	30,5	40,5	51,0	62,0	73,0	85,5	98,0
3,3	16,2	26,0	36,0	47,0	58,5	71,0	84,5	98,5	113
3,5	17,8	28,5	39,5	51,5	64,0	77,5	92,0	107	123
4	22,2	35,0	49,0	63,0	78	93,5	111	129	147
4,5	27,0	42,5	58,5	75,0	92,0	109,5	130	151	172
5	32,0	50,0	68,0	87,0	106	126	149	173	197

## Widerstand, elektrischer

### Elektrischer Widerstand

Der elektrische Widerstand ist in der Elektrotechnik ein Maß dafür, welche elektrische Spannung erforderlich ist, um einen bestimmten elektrischen Strom durch einen elektrischen Leiter fließen zu lassen. Als Formelzeichen für den elektrischen Widerstand wird in der Regel  $R$  – wahrscheinlich abgeleitet vom Lateinischen *resistere* für „widerstehen“ (evtl. auch von den französischen oder englischen Entsprechungen, genaue Herkunft unbekannt) verwendet. Der Widerstand hat die SI-Einheit Ohm, sein Einheitenzeichen ist das große Omega ( $\Omega$ ).

Verwandt mit dem Widerstand ist der spezifische elektrische Widerstand (Formelzeichen  $\rho$ ). Bei diesem Wert handelt es sich um eine temperaturabhängige Materialkonstante, die eine von der geometrischen Form des ausgeführten Leiters unabhängige Beschreibung der Widerstandseigenschaft ermöglicht.

Georg Simon Ohm kannte die Kraftwirkung der elektrischen Spannung, deshalb konnte er Spannungen durch Kraftmessungen bestimmen. Die Stärke von Strömen konnte er anhand chemischer Prozesse

quantitativ bestimmen. Man wusste, dass elektrische Ströme etwas mit der Bewegung der coulombschen Ladungen zu tun haben. Die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen Spannung und Stromstärke waren unbekannt.

Erst als Ohm begann, einen langen und sehr dünnen stromdurchflossenen Draht auf möglichst konstanter Temperatur zu halten, erkannte er die Proportionalität zwischen Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  :

Diese Proportionalität zwischen Spannung und Stromstärke wird durch das von ihm formulierte und nach ihm benannte ohmsche Gesetz beschrieben:

Der von  $U$  und  $I$  unabhängige Proportionalitätsfaktor  $R$  ist der elektrische Widerstand. Dieses einfach erscheinende Gesetz wurde zu einer Zeit gefunden, als es noch keine „richtigen“ Spannungsquellen gab, geschweige denn Spannungs- oder Strommesser. Zudem waren die Messungen von anderen physikalischen Effekten überlagert. Auch waren die Begriffe Spannung, Stromstärke und Widerstand noch nicht allgemein etabliert.

Ohm war in Deutschland kein angesehener Wissenschaftler, Professuren wurden ihm zunächst verweigert. Das änderte sich erst, als ihm zahlreiche Würdigungen aus dem Ausland zuteil wurden.

### Ohmscher Widerstand

Ein ohmscher Widerstand ist ein elektrischer Widerstand, dessen Widerstandswert im Idealfall unabhängig von der Spannung, der Stromstärke und der Frequenz ist. An einem solchen ohmschen Widerstand gilt das ohmsche Gesetz für beliebige Spannungen, Ströme und Frequenzen. Wenn man die Stromstärke  $I$  über der Spannung  $U$  in Form eines  $U$ - $I$ -Diagramms aufträgt, erhält man eine Ursprungsgerade, der Zusammenhang also ist direkt proportional :

Näherungsweise und mit Einschränkungen kann ein ohmscher Widerstand durch ein Bauelement, im einfachsten Fall einen Metalldraht, realisiert werden, das üblicherweise ebenfalls einfach Widerstand genannt wird.

Wenn Strom durch einen Widerstand fließt und Spannung daran abfällt, wird elektrische Leistung gemäß

in Wärmeleistung umgesetzt.

Der ohmsche Widerstand wird auch als Gleichstromwiderstand bezeichnet. Sein Kehrwert, also der Proportionalitätsfaktor zwischen Stromstärke und Spannung, heißt elektrischer Leitwert  $G$  des Leiters. Es gilt:

Der ohmsche Widerstand eines Körpers lässt sich aus seinen geometrischen Abmessungen und einer materialspezifischen Konstante, dem spezifischen Widerstand  $\rho$ , berechnen.

Für einen in Längsrichtung durchflossenen geraden Leiter mit konstanter Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l$  gilt:

Die Querschnittsfläche  $A$  berechnet sich für runde Drähte mit dem Durchmesser  $d$  nach der Formel:

Der elektrische Widerstand eines Leiters ist im Wesentlichen von seiner Temperatur und der Frequenz der Spannung abhängig.

Die Frequenzabhängigkeit kann man leicht umgehen, wenn man Gleichstrom verwendet. Dafür wird auch der Begriff Gleichstromwiderstand verwendet.

Der Gleichstromwiderstand eines geraden Leiters berechnet sich durch:

Dieses gilt aber nur für die Temperatur, für die der angegebene spezifische Widerstand gilt. Wenn nicht anders angegeben, gilt dieses für eine Ausgangstemperatur von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Darauf weist auch die 20 im Index von  $R$  hin.

Grundsätzlich ist der Widerstand temperaturabhängig. Dieses gilt für alle Materialien.

## Lex W

Dieses Verhalten ist materialabhängig und wird mit dem Linear-Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  und der Bestimmung des Temperaturunterschieds ( $\Delta T = T - T_0$ ) berechenbar. Im allgemeinen beschreibt man diese Änderung durch eine Linearisierung

bei  $T_0 = 20 \text{ °C}$

Für die meisten Materialien und Anwendungen mit nicht zu großen Temperaturbereichen reicht diese lineare Näherung aus, da die Temperaturkoeffizienten höherer Ordnungen dann vernachlässigbar klein sind.

Je nachdem, ob der Widerstandswert mit steigender Temperatur größer oder kleiner wird, unterscheidet man zwischen Kaltleitern oder PTC (Widerstandswert steigt, prinzipiell bei allen Metallen;

PTC: positive temperature coefficient) und Heißeleitern oder

NTC (Widerstandswert sinkt; NTC: negative temperature coefficient).

In der Technik wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes ausgenutzt, zum Beispiel beim Thermostaten und Widerstandsthermometer (Beispiel: Thermometer mit Pt100-Fühlern) oder bei Thermo-Anemometern (Windmessgeräten).

Es gibt auch verschiedene spezielle Metall-Legierungen, die sich durch einen über weite Temperaturbereiche annähernd konstanten spezifischen elektrischen Widerstand auszeichnen,

## Wechselstromwiderstand

Impedanz als Zeiger in der komplexen Ebene mit ihren Komponenten

An einem linearen, rein ohmschen Widerstand  $R$ , der von Wechselstrom durchflossen wird, sind Spannung und Strom in Phase. Wenn allerdings eine frequenzabhängige Phasenverschiebung und Widerstandsänderung auftritt, kommt als Anteil am Widerstand eine Komponente  $X$  hinzu, die auf Spannungs- bzw. Stromänderungen verzögernd reagiert. Bei sinusförmigem Verlauf von Spannung und Strom wird der Quotient aus den Amplituden oder Effektivwerten als Scheinwiderstand  $Z$  bezeichnet. In der komplexen Wechselstromrechnung wird der Scheinwiderstand mit dem Phasenverschiebungswinkel als

Impedanz oder komplexer Widerstand zusammengefasst.

In einer anderen Darstellung werden die zwei Komponenten zueinander rechtwinklig zu zusammengefasst,

Darin werden  $R$  als Wirkwiderstand und  $X$  als Blindwiderstand bezeichnet. Der Wirkwiderstand, welcher nicht phasenverschiebend arbeitet, wird auch als ohmscher Anteil der Impedanz bezeichnet.

Werden die Spannung  $u(t)$  und der Strom  $i(t)$  als sinusförmige Größen mit der Frequenz  $f$  bzw. der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  in der komplexen Ebene durch Zeiger  $u(\omega t)$  und  $i(\omega t)$  dargestellt, so erhält man

mit

Durch Vergleich der beiden Darstellungen von  $Z$  erhält man

(Wirkwiderstand)

(Blindwiderstand)

Es ergeben sich der Scheinwiderstand:

oder

und der Phasenverschiebungswinkel zwischen  $u$  und  $i$ :

Man bezeichnet auch

= kapazitiver Blindwiderstand

oder

= induktiver Blindwiderstand

Dabei ist

und

**Sonderfälle**

Für  $R = 0$  ergibt sich:

Für  $X > 0$  ist

für  $X < 0$  ist und

Für  $X = 0$  ergibt sich:

Bei einer Spule mit der Induktivität  $L$  gilt

Aufgrund einer Spannung wächst der Strom mit der Zeit an. Bei Wechselstrom folgt dieser verzögert. Mit dem Ansatz in komplexer Schreibweise  $u$  und  $i$  erhält man nach der Differenziation

Das bedeutet, dass eine Induktivität für sinusförmige Wechselgrößen wie ein phasendrehender Blindwiderstand wirkt.

Mit ergibt sich

Entsprechend gilt bei einem Kondensator mit der Kapazität  $C$

Aufgrund eines Stromes wächst die Spannung mit der Zeit an. Bei Wechselspannung folgt diese verzögert.

Man erhält in komplexer Schreibweise und nach der Integration

Eine Kapazität wirkt für sinusförmige Wechselgrößen wie ein phasendrehender Blindwiderstand. Hier ist.

Tatsächlich auftretende Wechselstromwiderstände beschreibt man durch Ersatzschaltbilder in Reihenschaltung oder Parallelschaltung aus einem ohmschen Widerstand mit einer Induktivität oder mit einer Kapazität. Welches der Bilder verwendet wird, ist eine Frage der besseren Annäherung an die Wirklichkeit mit möglichst frequenzunabhängigen Größen und der Zweckmäßigkeit für die mathematische Behandlung.

Bei genauer Betrachtung hat aber auch jeder Kondensator einen kleinen induktiven Anteil, so wie eine Spule auch einen kapazitiven Anteil hat. Selbst ein Stück Draht muss exakt mit  $R$ ,  $C$  und  $L$  beschrieben werden. Dies zeigt sich dann im Besonderen, wenn die Bauteile mit ihren geometrischen Abmessungen in den Bereich der Wellenlänge der angelegten Wechselspannung kommen, dann besitzen sie einen nicht zu vernachlässigenden sowohl induktiven, als auch einen kapazitiven Anteil. Sie werden gegebenenfalls zum Schwingkreis, als Beispiel sei hier die Antenne genannt. Die Enden dürfen als Kondensatorplatten gesehen werden, der „Draht“ dazwischen als Spule.

Ersatzschaltbilder für Wechselstromwiderstände

links: Parallelschaltung  
rechts: Reihenschaltung

**Zusammenschaltung**

Werden ein ohmscher Widerstand und eine Impedanz zusammenschaltet, so können in komplexer Schreibweise die Regeln für Reihen- und Parallelschaltung angewendet werden.

Werden eine kapazitive und eine induktive Impedanz zusammenschaltet, so entsteht ein Schwingkreis; die Reihen- und Parallelschaltung und die weiteren Konsequenzen werden unter diesem Stichwort behandelt.

**Ersatzwiderstand**

Als Ersatzwiderstand wird der komplexe elektrische Widerstand bezeichnet, der den gleichen Widerstand besitzt wie eine elektrische Schaltung oder der Teil einer elektrischen Schaltung, den er ersetzt. Ersatzwiderstände können zur Vereinfachung der Berechnung komplexer elektrischer Anordnungen verwendet werden.

Ortskurve

Ein Hilfsmittel zur Analyse und Beschreibung von Schaltungen mit Wechselstromwiderständen ist die Ortskurve.

Komplexe Größen lassen sich durch Zeiger in der komplexen Ebene darstellen.

Ortskurve eines RL-Gliedes

Ortskurve eines RC-Gliedes

Wenn die komplexe Größe eine Funktion eines (reellen) Parameters ist und wenn dieser Parameter variiert wird, verschiebt sich die Spitze des Zeigers. Eine Linie durch alle denkbaren Zeigerspitzen bezeichnet man als Ortskurve. Die Bilder zeigen Ortskurven der Impedanz als Funktion der Frequenz für die angegebenen Schaltungen

### Der elektrische Widerstand im Teilchenmodell

Die physikalische Beschreibung benutzt die Vorstellung, dass sich die Valenzelektronen im Metall wie ein Gas (Elektronengas) verhalten. Im einfachsten Modell bildet das Metall ein positiv homogen geladenes Volumen, in denen sich die Elektronen frei bewegen können. In dieses Volumen sind die Atomrümpfe eingebettet, die aus dem Atomkern und den stärker gebundenen Elektronen auf den tieferen, vollbesetzten Schalen bestehen.

Ohne äußere elektrische Spannung bewegen sich die Elektronen ungeordnet im Metall (siehe: brownische Bewegung). Legt man nun eine Spannung an die zwei Seiten an, so werden die freien Elektronen durch das elektrische Feld in Richtung der Feldlinien beschleunigt. Es fließt ein elektrischer Strom.

Auf ihrem Weg durch das Metall kommt es zu elastischen Stößen der Elektronen mit anderen Elektronen, den Atomrümpfen und Phononen. Dabei geben die Elektronen Energie an ihre Stoßpartner ab, werden gestreut und wieder durch das elektrische Feld beschleunigt. Die Elektronen werden durch diese Wechselwirkung dauernd abgebremst und es stellt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit ein.

Die bei diesen Stößen an die Atomrümpfe beziehungsweise Phononen übertragene Energie führt zu einer größeren Eigenschwingung um ihre Gleichgewichtslage, ihre Temperatur erhöht sich. Durch die stärkeren Schwingungen erhöht sich die Querschnittsfläche für mögliche Stöße, deren Anzahl mit steigender Temperatur zunimmt und den Widerstand steigen lässt (Kaltleiter). Der Leitungsvorgang in Heißleitern kann mit diesem Modell nicht vollständig erklärt werden, da es hier mit steigender Temperatur zu einer deutlichen Ladungsträgergeneration kommt, die den eben beschriebenen Vorgang überlagern.

Bei sehr hohen Temperaturen, bei denen die Atome des Materials ionisiert werden (Plasma), ist jeder Stoff elektrisch leitend, da die vorher gebundenen Elektronen nun für den Ladungstransport zur Verfügung stehen. Umgekehrt sind Metalle und Oxide bekannt, für die der elektrische Widerstand bei sehr niedrigen Temperaturen unterhalb der so genannten Sprungtemperatur verschwindet: Supraleiter.

Durch die thermische Bewegung der Elektronen entsteht ein temperaturabhängiger Rauschstrom, der als Widerstandsrauschen bezeichnet wird.

### Reihenschaltung

Werden  $n$  Widerstände in Reihe geschaltet, so addieren sich die Widerstände:

Veranschaulichen kann man sich dieses an zwei Widerständen, die sich nur in der Länge unterscheiden.

Die Reihenschaltung ergibt einen Widerstandskörper der Länge  $l_1 + l_2$ . Dann gilt:



**Parallelschaltung**

Bei der Parallelschaltung von  $n$  Widerständen addieren sich die Leitwerte beziehungsweise die reziproken Widerstände:

alternative Schreibweise:

Formel für zwei parallele Widerstände:

Schreibweise als Leitwerte:

Der Leitwert ist der Kehrwert des Widerstandes, seine SI-Einheit ist das reziproke Ohm, das auch den besonderen Namen Siemens führt.

Man veranschaulicht sich diesen Zusammenhang an der Parallelschaltung zweier Widerstände, die sich nur in ihrer Querschnittsfläche  $A$  unterscheiden.

Man erhält einen Widerstand vom Gesamtquerschnitt  $A_1 + A_2$ , also gilt:

und daher

Sind in einer Parallelschaltung nur Widerstände eines gleichen Wertes vorhanden, ( ) so kann der Gesamtwiderstand errechnet werden, indem man den Einzelwiderstand durch die Anzahl der Widerstände in der Schaltung dividiert:

Dabei bezeichnet  $R_n$  die Werte der Einzelwiderstände und  $n$  deren Anzahl.

**Differentieller Widerstand**

Bei nichtlinearen Strom-Spannungs-Kennlinien ist der Quotient für jedes Strom-Spannungspaar unterschiedlich. In diesem Fall gilt das ohmsche Gesetz nicht und man kann nicht von einem ohmschen Widerstand  $R$  sprechen. Kleine Spannungsänderungen sind jedoch näherungsweise proportional zu kleinen Stromänderungen. Der Quotient aus kleiner Spannungsänderung und zugehöriger Stromänderung bei einer bestimmten Spannung wird als differentieller Widerstand  $r$  bezeichnet.

In einem Diagramm, in dem  $U$  über  $I$  aufgetragen wird, entspricht er der Steigung der Tangente am betrachteten Punkt der Kennlinie.

## Negativer differentieller Widerstand

Der differentielle Widerstand kann in einem Teil der Kennlinie negativ sein, so dass die Stromstärke bei steigender Spannung sinkt beziehungsweise die Stromstärke bei sinkender Spannung steigt. Im Bild ist das im Bereich  $V_P < V < V_V$  der Fall. Ein negativer differentieller Widerstand kann zum Anregen (Entdämpfen) von Schwingkreisen oder zur Erzeugung von Kippschwingungen verwendet werden (Oszillator). Der negative differentielle Widerstand tritt zum Beispiel bei Gasentladungen, Bauteilen wie Avalanche- oder Tunneldioden auf, in einfachen elektronischen Schaltungen wie der Lambda-Diode, aber auch bei komplexeren Modulen wie z. B. Schaltnetzteilen auf der Eingangsseite.

Strom- Spannungscharakteristik einer Tunneldiode

## Positiver differentieller Widerstand

Bei positiven differentiellen Widerständen nimmt der Widerstand mit zunehmender Spannung zu. Alle real existierenden Schaltungselemente besitzen in einem Teil ihrer Kennlinie, jedoch stets für sehr große Werte, einen positiven differentiellen Widerstand. Die meisten Elemente in der Schaltungstechnik besitzen einen ausschließlich positiven differentiellen Widerstand.

Beispiele: realer Widerstand, Diode, Zener-Diode, alle halbleitenden Keramiken.

## Supraleitung

Unterhalb einer spezifischen Sprungtemperatur besitzt ein supraleitungsfähiges Material praktisch keinen ohmschen Widerstand. Ein solches Material wird als Supraleiter bezeichnet, weil der Strom in ihm bei dieser tiefen Temperatur ohne Verluste fließt.

## Widerstand, spezifischer

$\rho$

Eine für das Material, aus dem ein elektrischer Leiter besteht, spezifische Konstante mit der Einheit  $\text{W}\cdot\text{cm}$ .

\*) spez. Widerstand bei 0 °C, sonst bei 20 °C

## Wien, Wilhelm

Wilhelm Wien wurde am 13. Januar 1864 in Fischhausen in Ostpreußen geboren. Er war der Sohn des Gutsbesitzers Carl Wien und schien für das Leben eines Gutsbesitzers bestimmt zu sein, aber eine wirtschaftliche Krise und sein eigenes heimliches Gefühl der Berufung führten ihn zum Universitätsstudium. Als seine Eltern 1866 nach Drachstein im Kreis Rastenburg in Ostpreußen zogen, ging Wien 1879 zunächst in Rastenburg und später, von 1880 bis 1882, an der Stadtschule in Heidelberg zur Schule. Nach dem Abitur ging er 1882 zum Studium der Mathematik und der Naturwissenschaften an die Universität Göttingen und im selben Jahr auch an die Universität Berlin. Von 1883 bis 1885 arbeitete er im Laboratorium von Hermann von Helmholtz und promovierte 1886 mit einer Arbeit über seine Experimente zur Beugung des Lichts an Schnitten von Metallen und über den Einfluss der Materialien auf die Farbe des gebrochenen Lichts.

Sein Studium wurde dann durch die Krankheit seines Vaters unterbrochen und bis 1890 half er bei der Bewirtschaftung der väterlichen Ländereien. Er konnte jedoch in dieser Zeit ein Semester bei Helmholtz verbringen und führte 1887 Experimente über die Durchlässigkeit von Metallen für Licht- und Wärmestrahlen durch. Als das Land seines Vaters verkauft wurde, kehrte er in das Laboratorium von Helmholtz zurück, der an die Physikalisch-Technische Reichsanstalt, die zur Erforschung industrieller Probleme gegründet worden war, versetzt worden war und deren Präsident geworden war. Hier blieb er bis 1896, als er zum Professor für Physik in Aachen in der Nachfolge von Philipp Lenard ernannt wurde. Im Jahr 1899 wurde er zum Professor für Physik an der Universität Gießen ernannt. Im Jahr 1900 wurde er Professor für das gleiche Fach in Würzburg, in der Nachfolge von W.C. Röntgen, und in diesem Jahr veröffentlichte er sein Lehrbuch der Hydrodynamik (Lehrbuch der Hydrodynamik).

1902 wurde er eingeladen, als Nachfolger von Ludwig Boltzmann als Professor für Physik an der Universität Leipzig und im Jahr 1906 als Nachfolger von Drude als Professor für Physik an der Universität Berlin; aber er lehnte beide diese Einladungen. 1920 wurde er zum Professor für Physik in München ernannt, wo er bis zu seinem Lebensende blieb.

Neben den frühen Arbeiten arbeitete Wien an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zusammen mit Holborn an Methoden zur Messung hoher Temperaturen mit den Le Chatelier-Thermoelementen und leistete gleichzeitig theoretische Arbeiten zur Thermodynamik, insbesondere zu den Gesetzen über die Wärmestrahlung.

1893 verkündete er das Gesetz, das besagt, dass sich die Wellenlänge mit der Temperatur ändert, ein Gesetz, das später zum Gesetz der Verschiebung wurde.

1894 veröffentlichte er eine Arbeit über die Temperatur und die Entropie der Strahlung, in der die Begriffe Temperatur und Entropie auf die Strahlung im leeren Raum ausgedehnt wurden. In dieser Arbeit wurde er dazu gebracht, einen idealen Körper zu definieren, den er den schwarzen Körper nannte, der alle Strahlungen vollständig absorbiert. 1896 veröffentlichte er die Formel von Wien, die das Ergebnis der Arbeit war, um eine Formel für die Zusammensetzung der Strahlung eines solchen schwarzen Körpers zu finden. Später wurde bewiesen, dass diese Formel nur für die kurzen Wellen gültig ist, aber Wiens Arbeit ermöglichte es Max Planck, das Problem der Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit Hilfe der Quantenphysik zu lösen. Für diese Arbeit wurde Wien 1911 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Interessant daran ist, dass diese theoretische Arbeit aus einem Institut kam, das sich technischen Problemen widmete, und sie führte zu neuen Techniken der Beleuchtung und der Messung hoher Temperaturen.

Als Wien 1896 als Nachfolger von Lenard nach Aachen wechselte, fand er dort ein Laboratorium vor, das für das Studium elektrischer Entladungen im Vakuum ausgestattet war, und 1897 begann er, die Natur der Kathodenstrahlen zu erforschen. Mit Hilfe einer Hochvakuumröhre mit Lenard-Fenster bestätigte er die Entdeckung, die Dekan Perrin zwei Jahre zuvor gemacht hatte, dass Kathodenstrahlen aus sich schnell bewegenden, negativ geladenen Teilchen (Elektronen) bestehen. Und dann, fast zur gleichen Zeit wie Sir J.J. Thomson in Cambridge, aber mit einer anderen Methode, maß er das Verhältnis der elektrischen Ladung dieser Teilchen zu ihrer Masse und fand, wie Thomson, dass sie etwa zweitausendmal leichter sind als die Atome von Wasserstoff.

1898 untersuchte Wien die von Goldstein entdeckten Kanalstrahlen und kam zu dem Schluss, dass sie das positive Äquivalent der negativ geladenen Kathodenstrahlen sind. Er maß ihre Ablenkung durch magnetische und elektrische Felder und kam zu dem Schluss, dass sie aus positiv geladenen Teilchen bestehen, die niemals schwerer sind als Elektronen.

Die von Wien angewandte Methode führte etwa 20 Jahre später zur Massenspektrografie, die die genaue Messung der Massen verschiedener Atome und ihrer Isotope ermöglichte, was für die Berechnung der bei Kernreaktionen freigesetzten Energien notwendig ist. 1900 veröffentlichte Wien eine theoretische Arbeit über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Grundlage für die Mechanik. Anschließend machte er weitere Arbeiten über die Kanalstrahlen und zeigte 1912, dass diese Strahlen, wenn der Druck nicht extrem schwach ist, durch Kollision mit Atomen des Restgases ihre elektrische Ladung auf ihrem Weg verlieren und wiedergewinnen. 1918 veröffentlichte er weitere Arbeiten über diese Strahlen zur Messung der fortschreitenden Abnahme ihrer Leuchtkraft, nachdem sie die Kathode verlassen haben, und aus diesen Experimenten leitete er das ab, was die klassische Physik den Zerfall der leuchtenden Schwingungen in den Atomen nennt, was in der Quantenphysik der begrenzten Dauer der angeregten Zustände der Atome entspricht.

Wien war Mitglied der Akademien der Wissenschaften in Berlin, Göttingen, Wien, Stockholm, Christiania und Washington sowie Ehrenmitglied der Physikalischen Gesellschaft in Frankfurt am Main.

1898 heiratete er Luise Mehler aus Aachen. Sie hatten vier Kinder. Er starb am 30. August 1928 in München.

## Wiener Medizinische Wochenschrift

Die Wiener Medizinische Wochenschrift erschien als „offizielles Organ des Wissenschaftlichen Vereines der Ärzte in Steiermark, der Medizinischen Gesellschaft für Oberösterreich, der Gesellschaft der Gutachter-Ärzte Österreichs [u. a.]“ von 1851 bis Oktober 1944. Ab Februar 1945 erschien dessen Nachfolger die Medizinische Wochenschrift. Die Zeitschrift ist im Springer Verlag erschienen. Zu Beginn wurde sie von Leopold Wittelshöfer, später von Adolf Kronfeld herausgegeben.

## Wiener-Spektrum

Leistungsspektrum

Mißt man an einer gleichmäßig belichteten und entwickelten fotogr. Schicht mit einem Photometer mit hinreichend kleiner Meßblendenfläche die Schwärzung, so zeigt die Registrierkurve örtliche Schwärzungsschwankungen. Führt man eine Fourieranalyse dieser Kurve durch, erhält man ein Amplitudenspektrum Ortsfrequenzspektrum dessen Quadrat  $W(v)$  als  $W$ . oder  $L$ . bezeichnet wird. Überträgt ein System mit der MÜF  $a(v)$  Bilder auf photographischen Film mit dem mittleren Gradienten  $\gamma$ , so ergibt sich das  $W$ . des Gesamtsystems näherungsweise zu

$W_{Fi}, W_0 : W$  für Filmkörnigkeit u. Quantenrauschen, das näherungsweise gleich  $1/q$  ist ( $q =$  Quanten / Fläche)

Bei Film-Folien-Systemen tritt ein Körnigkeitsrauschen  $W_{Fo}$  der Verstärkerfolien auf, so daß

⇒ Unschärferelation, Rauschleistung

## Wiggler

Magnetstruktur zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung.

Bei einem Wiggler handelt es sich um eine Anordnung von Magneten, die in abwechselnder Nord-Süd-Ausrichtung hintereinander geschaltet sind. In ihnen werden Elektronen auf einen Slalomkurs gebracht, wodurch intensive Synchrotronstrahlung entsteht.

Neben Wiggler werden auch Undulatoren zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung eingesetzt.

Bei Wigglern ist das Magnetfeld jedoch stärker als bei Undulatoren. Dies führt zu einem weiter ausgedehnten Slalomkurs und damit zu Synchrotronstrahlung, die weniger zielgerichtet ist und mehr Farben enthält.

## Wigner-Effekt

Bei Bestrahlung eines Stoffes mit schnellen Neutronen kann es vorkommen, daß einzelne Atome des Stoffes aus dem getroffenen Molekül 'herausgeschossen' werden. Dadurch kann ein Molekül mit ganz anderen Eigenschaften in chemischer und biologischer Hinsicht entstehen. Man hat guten Grund zur Annahme, daß ein einziger derartiger Vorgang genügt, um schwere Strahlenschäden im lebenden Organismus auszulösen.

## Wigner Energie

Setzt man Graphit der Einwirkung von Neutronenstrahlen aus, so wird die Strahlungsenergie im Graphit gespeichert. Die Kohlenstoffatome des Graphits werden durch die Neutronen von ihrem Platz im Kristallgitter weggestoßen. Es entstehen Lücken im Kristallgitter (Leerstellen oder Gitterlücken), und die herausgestoßenen Atome nehmen neue Plätze ein (Zwischengitteratome).

Eine derartig veränderte Kristallstruktur ist instabil: der Graphitkristall ist bestrebt, seine ursprüngliche stabile Struktur wieder einzunehmen. Bei diesem Prozeß wird die gesamte gespeicherte Energie in Form von Wärme frei, was zu einer Entzündung des Graphits und damit zu schweren Reaktorunfällen bei solchen Atomreaktoren führen kann, die mit Graphit als Moderator arbeiten.

Um die Betriebssicherheit der Reaktoren zu gewährleisten wird deshalb der Graphitmoderator laufend überwacht und in regelmäßigen Abständen unter genau festgelegten Bedingungen ausgeglüht.

## Wilson

1. Charles Thomson Rees, \*Glencorse bei Edinburgh 14.2.1869, †Carlops bei Edinburgh 15.11.1959, brit. Physiker. Konstruierte die Nebelkammer, mit der er 1911 erstmals Spuren von Alphateilchen sichtbar machen konnte. Nobelpreis für Physik 1927 (zus. mit A.H. Compton).
2. Kenneth G., \*Waltham (Mass.) 8.6.1936, amerikan. Physiker. Er entwickelte 1971 die heute häufig nach ihm ben. Theorie der Renormierungsgruppe, die u.a. die Gleichartigkeit des Verhaltens von Systemen erklärt, die so unterschiedl. Phasenumwandlungen wie das Einsetzen von Schmelz- und Siedevorgängen, von Magnetismus, Supraleitung u.a. erleiden. Er erhielt dafür den Nobelpreis für Physik 1982.
3. Robert W., \*Houston (Tex.) 10.1.1936, amerikan. Physiker. Entdeckte 1964/1965 zus. mit A.Penzias bei Rauschpegelmessungen an einem Radioteleskop die kosmische Hintergrundstrahlung, wofür beide 1978 den Nobelpreis für Physik erhielten (zus. mit P. L. Kapiza).

## Winkel der Anode

DIN 6814

## Winkelfrequenz

Kreisfrequenz,  $\omega$

Das  $2\pi$ -fache der Frequenz  $\nu$ . Einheit: 1/s

## Winkelgeschwindigkeit

Die Winkelgeschwindigkeit ist das Verhältnis des Drehwinkels  $d\omega$ , den eine durch die Drehachse gehende Ebene im Zeitabschnitt  $dt$  durchläuft:

Der Winkel  $\varphi$  wird im Bogenmaß angegeben.

## Wirbelsäule

### Rückgrat

Knorpelige oder (meist) knöcherner dorsale Achse des Skeletts der Wirbeltiere, die den Schädel trägt und (soweit ausgebildet) mit einem Schultergürtel (indirekt) und einem Beckengürtel in Verbindung steht. Die W. setzt sich zusammen aus gelenkig und durch Bänder und Muskeln miteinander verbundenen Wirbeln (beim Menschen 33–34, wovon 5 Wirbel zum einheitl. Kreuzbein verschmolzen sind) sowie aus (zwischen geschalteten) knorpeligen Bandscheiben.

Bei den höheren Wirbeltieren kann die W. in verschiedene Abschnitte gegliedert werden

- Hals-Wirbelsäule
- Brust-Wirbelsäule
- Lenden-Wirbelsäule
- Kreuzbein
- Schwanz-Wirbelsäule

Die W. des Menschen ist in der Seitenansicht doppelt S-förmig gekrümmt und besteht aus 7 Hals-, 12 Brust-, 5 Lenden-, 5 Kreuzbein- und 4–5 Steißbeinwirbeln.

Zwischen jedem Wirbelkörper sitzt eine elastische Zwischenwirbelscheibe, die Bandscheibe. Von der Seite aus betrachtet, hat unsere Wirbelsäule eine doppelt S-förmige Krümmung.

Auf diese Weise werden senkrechte Stoßbewegungen doppelt abgefedert. Einmal durch die elastischen Bandscheiben, zum zweiten durch die Krümmungen.

So wirkt die Wirbelsäule wie ein "mechanischer Stoßdämpfer".

Die Bandscheibe bedingt unsere Bewegungsfähigkeit und macht die Wirbelsäule biegsam und flexibel. Diese Stärke ist zugleich ihre Schwäche. Neben dem normalen, altersbedingten Verschleiß werden die Bandscheiben bei extremer Belastung enorm strapaziert.

Bei einer Beschädigung der Bandscheibe verlagert sich der weiche Bandscheibenkern in Richtung Wirbelkanal und drückt so auf die im Wirbelkanal verlaufenden Nervenwurzeln. Diese können gereizt oder gar eingeklemmt werden, was wiederum heftige Schmerzen oder auch Empfindungsstörungen in den Beinen (Ischiassyndrom) hervorruft.

### Wirbelsäulenaufnahmegerät

Vertikalkassettenhalter mit Streustrahlenraster für Aufnahmen von größeren Abschnitten oder der ganzen Wirbelsäule bei stehendem Patienten

### Wirbelsäulenverkrümmung

Rückgratverkrümmung

fixierte (starre) oder nicht fixierte Verformung der Wirbelsäule entlang ihrer Längsrichtung.

Man unterscheidet Skoliose (seitl. Verbiegung), Kyphose (flachbogige konvexe Verbiegung), Lordose (Krümmung nach vorn) sowie Mischformen Kyphoskoliose.

### Wirbelstrom

Wirbelströme entstehen in einem metallischen Leiter an jeder Stelle, an der sich der magnetische Fluß ändert.

Das kann zum Beispiel so geschehen, daß man den Leiter durch ein inhomogenes Magnetfeld bewegt. Dabei ändert sich an jeder Stelle des Leiters fortwährend der magnetische Fluß. Durch die Flußänderung werden elektrische Spannungen induziert, und es fließen Ströme - die Wirbelströme.

Da sie Energie verbrauchen, hemmen sie die Bewegung des Leiters. Diese Eigenschaft nützt man bei der Wirbelstrombremse aus.

Wirbelströme entstehen auch im Innern eines magnetischen metallischen Werkstoffes, der ummagnetisiert wird. Dabei ändert sich ja fortwährend an jeder Stelle der magnetische Fluß. Sie erzeugen selbst wieder Magnetfelder, die der Ummagnetisierung entgegenwirken, und nehmen mit wachsenden Frequenzen so stark zu, daß sie den Einsatz von metallischen Magnetkernen in der Höchstfrequenztechnik ganz unmöglich machen. In den Transformatoren der Starkstromtechnik erzeugen sie solche Mengen an überflüssiger Stromwärme und hohe Energieverluste auftreten.

Durch Aufbau der Transformatoren aus dünnen Blechen und Verminderung der Leitfähigkeit lassen sich Wirbelströme beträchtlich herabzusetzen.

An jedem Punkt des Rades werden beim Eintritt in das Feld des Elektromagneten Wirbelströme erzeugt und ebenso beim Wiederaustritt. Dadurch wird laufend kinetische Energie in Stromwärme umgesetzt und das Rad abgebremst.

In der Elektronik ist man daher zu oxidischen Magnetwerkstoffen übergegangen (Ferrite). Sie haben keine elektrische Leitfähigkeit und es können keine Wirbelströme entstehen.

### Wirbelstromkupplung

Im Gegensatz zu konventionellen Kupplungen nach dem Reibungs- oder Magnetpulverprinzip haben Wirbelstromkupplungen keine mechanische Berührung zwischen Antrieb und Abtrieb.

Sie sind ähnlich gebaut wie Wechselstrommotoren mit Kurzschlußstator, werden aber mit Gleichstrom betrieben. Der rotierende 'Stator' bildet den Antrieb, Abtrieb ist der bewickelte Anker. Fließt kein Strom durch die Wicklungen, so dreht sich der Antrieb mit vollen Touren, der Abtrieb aber bleibt in Ruhe. Wird jedoch in die Ankerwicklung ein Strom eingespeist, so steigert sich die Drehzahl des Abtriebs mit zunehmendem Erregerstrom, bis er mit dem Antrieb umläuft.

Solange der Anker noch langsamer läuft, werden in der Kurzschlußwicklung des Antriebs Ströme induziert, die durch ihr Magnetfeld den Anker beschleunigen. Der Schlupf ist sehr gering. Zur Übertragung von 100 PS benötigt man nur 450 Watt Erregerleistung. Mit Hilfe dieser Kupplungen kann man konstante Drehzahlen bei wechselnder Belastung oder eine Umwandlung konstanter Drehzahlen in stufenlos regelbare Drehzahlen erzielen.

### Wirksamkeit

Efficacy, Effectiveness

Maß für die Eignung eines diagnostischen Verfahrens

1. das diagnostische Denken des Arztes zu beeinflussen (W)
2. die beabsichtigte Versorgung und Behandlung des Patienten zu beeinflussen (W)
3. den Gesundheitszustand eines Patienten zu beeinflussen (W)
4. die Gesundheit der Bevölkerung zu beeinflussen (W)

Die Größen W-W sind voneinander und von technischen und ökonomischen Faktoren abhängig, und das gesundheitspolitische Endziel ist W

In der Physik das Produkt aus Arbeit (Energie) und Zeit. Das Wort wird häufig ohne diese spezielle Bedeutung benutzt.

### Wirkungsgrad

Ausbeute, Nutzeffekt

Bei Energieumwandlungen ist der Wirkungsgrad das Verhältnis der gewonnenen Energie (oder Leistung) zur gleichzeitig zugeführten Energie.

Das Verhältnis ist stets kleiner als 1, da ein Teil der zugeführten Energie durch VerRöntgenluste verlorengeht.

Der Wirkungsgrad ist definiert als

$$P_N = \text{Nutzleistung} \quad P_Z = \text{zugeführte Leistung}$$

Für die Röntgenstrahlungserzeugung gilt: 
$$W = \frac{\text{Röntgenstrahlungsenergie}}{\text{Kathodenstrahlungsenergie}} = a \cdot Z \cdot V$$

$Z$  = Ordnungszahl des Anodenmaterials,  $V$  = Röhrenspannung in Volt

$a$  = Konstante, deren Wert in der Größenordnung 10 liegt

Für Wolfram bei 100 kV liegt der  $W$ . unter 1%. Da von der erzeugten Röntgenstrahlung nur ein sehr kleiner Bruchteil als Nutzstrahlenkegel die Röhre verläßt, reduziert sich der effektive  $W$ . nochmals um mindestens den Faktor 10.  $\Rightarrow$  Quantenausbeute

## 2. Efficiency

Leistungsfähigkeit eines Systems (z.B. einer medizinischen Einrichtung, einschl. Personal, Ausrüstung, Inneneinrichtung usw.) eine zweckentsprechende Gesundheitsversorgung im Hinblick auf Qualität und Quantität sicherzustellen.

## Wirkungsquerschnitt

wirksamer Querschnitt, Streuquerschnitt, Absorptionsquerschnitt

Dieser Begriff tritt bei der Beschreibung von Stoßprozessen auf, bei denen beliebige Teilchen der Sorte A auf Teilchen der Sorte B treffen.

Man versteht darunter den rechnerisch ermittelten Querschnitt, den ein Atomkern besitzen müßte, wenn bei einem Beschuß mit Elementarteilchen jeder Treffer zu einer Kernumwandlung führen würde.

$W$ . ist diejenige Kreisfläche, welche die Teilchen B im Querschnitt senkrecht zur Richtung der Teilchen A haben müßten, wenn jedes diese Fläche treffende Teilchen A die betrachtete Reaktion auslösen soll. Anschaulich bilden die Teilchen B Hindernisse für die Teilchen A. Die Größe der wirksamen Fläche dieser Hindernisse heißt  $W$ .

Diese Größe stimmt nicht mit den geometrischen Dimensionen des Atomkerns überein. Sie ist abhängig von der Natur der beiden Stoßpartner, von der Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen in den Kern eindringt und von der Wechselbeziehung zwischen den Kernbestandteilen und dem Geschoß.

Im Fall aufeinandertreffender Kugeln ist  $W$ . mit dem größten Querschnitt identisch, nicht jedoch bei Stoßprozessen in der Kernphysik, wo der  $W$ . stark von der Geschwindigkeit der auftreffenden Teilchen abhängig ist. Wenn  $I$  die Zahl der Neutronen bedeutet, die je Sekunde durch  $1 \text{ cm}^2$  senkrecht zur Strahlrichtung hindurchtreten, und dieser Strahl auf Materie trifft, die  $N$  Atome/ $\text{cm}^3$  enthält, dann ist bei hinreichend dünnen Schichten die Zahl der Absorptionen und Streuungen von Neutronen an Atomen des bestrahlten Stoffes:

Die Proportionalitätskonstante  $\rho$  hat die Einheit einer Fläche und heißt atomarer, totaler  $W$ .

Es gilt:

$\sigma_{\text{abs}}$  Absorptionsquerschnitt

$\sigma_{\text{Streu}}$  Streuquerschnitt

Die Größe  $\sigma \cdot N$  heißt makroskopischer  $W$ .; sie gibt die Summe aller  $W$ . je Kubikzentimeter an. Als Einheit des Wirkungsquerschnittes wurde das Barn eingeführt.  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$  In der Radiologie spielt dieser Begriff bei der Strahlentherapie mit Neutronen und der Neutronen-radiographie eine Rolle.

## Wirkungsquerschnitt und Reaktionsrate

Ist  $\Phi$  die Fluenz der Strahlung und  $N_R$  die mittlere Anzahl (der Erwartungswert) der Prozesse, den die Strahlung an den „Targetteilchen“ (Atomen, Atomkernen) auslöst, so gilt für den Wirkungsquerschnitt der Targetteilchen:

$$\Phi / N = \text{Einheit : m}^2 \text{ (früher auch barn (b), } 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 \text{)}$$

Die Größe  $R$  bezeichnet man als Reaktionsrate,  $R = \int n \cdot dV$  als Reaktionsratendichte.

Der totale (atomare) Wirkungsquerschnitt  $\sigma_T$  ist die Summe der Wirkungsquerschnitte für alle möglichen Wechselwirkungen einer Strahlung an einem Targetteilchen. Bei Neutronen unterscheidet man Streuquerschnitte  $\sigma_s$  (elastische und unelastische Streuung) und Absorptionsquerschnitte  $\sigma_{\text{ab}}$  (z. B. Neutroneneinfang, Kernumwandlung, Spaltung und Spallation).

Es gilt: 
$$\sigma_T = \sigma_s + \sigma_{\text{ab}}$$

Die Wirkungsquerschnittsdichte ist das Produkt  $\sigma \cdot n$  Einheit:  $\text{m}^{-1}$



aus der Anzahldichte  $n_a$  der Atome und  $\lambda$  :

Bei Photonen wird die Wirkungsquerschnittsdichte als Schwächungskoeffizient bezeichnet.

Symbole:  $\mu$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_{en}$

Die mittlere freie Weglänge eines Teilchens in einem Stoff ist der mittlere Abstand zwischen zwei Atomen, mit denen das Teilchen nacheinander in Wechselwirkung tritt. Sie ist gleich dem Kehrwert der totalen

$\lambda = \frac{1}{\mu}$  Einheit : m.

Wirkungsquerschnittsdichte  $\mu = n_a \cdot \sigma$  :

## Wirsungographie

⇒ Pankreatoduktographie, ERCP

## Wischtest

Orientierende Untersuchung über etwa vorhandene Kontaminationen von Arbeitsplätzen, Geräten und geschlossenen radioaktiven Präparaten und darüber, wie weit sich die radioaktiven Verseuchungen abwischen lassen. Zur Durchführung der Probe wischt man eine Fläche von etwa 200 cm<sup>2</sup> mit Filterpapier o.ä. ab und bestimmt anschließend die Aktivität des Papiers mit einem Monitor.

## Wismut

Bismutum ist eine Lateinisierung des alten Namens Wismut, der im Erzgebirge seit dem 13. Jahrhundert für das Erz verwendet wurde. (engl.: bismuth)

Chem. Zeichen	<b>Bi</b>			
Ordnungszahl	83			
Atomgewicht	208,98037			
Massenzahl	209 [187-208, 210-216]			
Radioisotope		$T_{1/2}$	Energie [MeV]	$\Gamma_H$
	210	$3 \cdot 10^6$ a	-	-
Dichte	9,747			
Schmelzpunkt	271,3 °C			
Siedepunkt	1 560 ± 5 °C			
Spezif. Wärme	0,124 J(g·K) bei 25 °C			
Schmelzwärme	50,232 kJ/kg			
Nukleonenzahl				
Elektronegativität	1,7 [Oxidationsstufe]			
Häufigstes Isotop	$2 \cdot 10^{-5}$ Gew.-% in der Erdrinde			
Oxidationszahlen	5, 3			
1. Ionisierungsenergie	kJ/mol bei 25°C			
Ionisierungsspannung	7,289 eV			
Ionenradius (Ladung)	96 pm (+3); 74 pm (+5)			
Atomradius	155 pm			
Elektr. Leitfähigkeit	1 MS/s bei 0 °C			
Elektronenkonfiguration	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>			
Periodensystem	Stickstoffgruppe V. Hauptgruppe, 6. Periode			

Bismutum ist eine Lateinisierung des alten Namens Wismut, der im Erzgebirge seit dem 13. Jahrhundert für das Erz verwendet wurde. (engl.: bismuth)

radioaktiv, mit einer Halbwertszeit, die zwanzigmillionenmal größer ist als die des Thoriums (oder fünfzigmillionenmal größer als die des Urans).

## Wochendosis, höchstzulässige

Nicht mehr gebräuchlicher Begriff im Strahlenschutz.

⇒ Grenzwerte d. Körperdosen

## Wolfram

### Tungsten

Chem. Zeichen	<b>W</b>			
Ordnungszahl	74			
Atomgewicht	183,85			
Massenzahl	184 [180, 182, 183, 186]			
Radioisotope		$T_{1/2}$	Energie [MeV]	$\Gamma_H$
	185	75 d	$\beta = 0,43$	-
	187	25 h	$\beta = 1,31$ $\gamma = 0,69$	73
Dichte	19,3			
Schmelzpunkt	3.350 °C			
Siedepunkt	5.660 °C			
Nukleonenzahl				
Elektronegativität	[Oxidationsstufe ]			
Häufigstes Isotop	%			
1. Ionisierungsenergie	kJ/mol bei 25 °C			
Ionenradius (Oxidationszahl)	pm ()			
Atomradius	pm			
Elektr. Leitfähigkeit	20 MS/s bei 0 °C			
Elektronenkonfiguration	2-8-18-32-12-2			
Periodensystem	IV. Nebengruppe			
spezifische Wärme	0,032 cal / Grad·g			
Wärmeleitvermögen	1,7 Watt / Grad · cm bei 0°C 1,1 Watt / Grad · cm bei 1.000 °C			

Das silberweiße Schwermetall ist chemisch sehr beständig; tritt in Verbindungen meist sechs-, seltener zwei- bis fünfwertig auf.

Verwendung:

Zur Herstellung von Glühfäden für Glühlampen und Elektronenröhren, zu thermisch und mechanisch äußerst beständigen Legierungen;

W.carbide sind sehr harte Werkstoffe, z.B. die Wolframcarbid-Kobalt-Legierungen (Widia®)

Wegen seines hohen Schmelzpunktes als Anodenmaterial in Röntgenröhren (häufig rhenium-legiert) und für Heizdrähte bei Glühkathoden, wegen seines hohen Massenschwächungskoeffizienten im Leuchtstoff  $\text{CaWO}_4$  in Röntgenverstärkerfolien

## Wolframcarbid

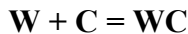
Mono-Wolframcarbid (meist kurz Wolframcarbid) ist eine nichtoxidische Keramik bzw. eine intermediäre Kristallphase und ein Carbid. Wolframcarbid ist aufgrund seiner Härte Hauptbestandteil vieler Hartmetalle, die als verschleißarme Materialien für Werkzeuge eingesetzt werden.

Graue, metallisch glänzende, sehr harte, geruchlose Kristalle

Molare Masse	195,86 g·mol <sup>-1</sup>
Dichte	15,63 g·cm <sup>-3</sup> (20 °C)
Schmelzpunkt	2785 °C
Siedepunkt	6000 °C
Zugfestigkeit	> 3500 MPa
Druckfestigkeit	bis 6000 MPa
Mohshärte	9,5
Löslichkeit	praktisch unlöslich in Wasser (0,1 mg·l <sup>-1</sup> bei 20 °C) löslich in Salpetersäure und Fluorwasserstoff

Als natürliche Bildung ist Wolframcarbid seit 1986 bekannt und seit 2007 als eigenständiges Mineral unter dem Namen Qusongit anerkannt.

Wolframcarbidpulver wird durch direkte Aufkohlung von Wolfram mit Kohlenstoff hergestellt. Dazu werden Gemische aus dem Metall und Ruß oder Graphit bei einer Temperatur von 1400 bis 2000 °C im Vakuum oder unter Wasserstoff erhitzt.



Beim Erhitzen eines Wolfram-Kohlenstoff-Gemisches in einem Kohlenstoffrohr oder Hochfrequenzofen auf ca. 2800 °C erhält man Wolframcarbidblöcke.

Die Produktion beginnt typischerweise mit Wolframerz, Wolframschrott, Scheelit, Wolframsäure oder Ammoniumparawolframat. Für die Herstellung der technischen Wolframcarbidpulver gibt es mehrere Verfahren. Zum Beispiel wird Wolframsäurepulver bei 750 °C durch Wasserstoff zu Wolfram reduziert. Die Metallpartikel werden bei 1400 °C aufgekohlt. Diese Methode wird bei feinen Pulvern mit einer mittleren Korngröße von 1 µm angewendet.

Wolframoxide, Wolframsäure, Ammoniumparawolframat und Scheelit können auch direkt aufgekohlt werden:

Wolfram oder Wolframoxid kann durch Gase wie Kohlenstoffmonoxid oder Methan aufgekohlt werden.

Sehr feines Wolframcarbid kann durch Reaktion von Wolframerz oder Wolframschrott mit Chlor und anschließender Gasphasenreduktion mit Wasserstoff und Aufkohlung gewonnen werden:

Bei Wolframcarbid handelt es sich um Einlagerungsmischkristalle. Dabei lagern sich durch Aufkohlen Kohlenstoffatome zwischen die Gitterplätze des Wolframs ein. Die Reaktion verläuft über W<sub>2</sub>C dem Diwolframcarbid zu WC. Wolframcarbid entsteht auch durch Reduktion von Wolframoxiden mit Kohlenstoff. Deshalb wird zur Herstellung von Wolfram Wasserstoff als Reduktionsmittel angewandt.

Wolframcarbid ist Hauptbestandteil vieler Hartmetallsorten die für Zerspanungswerkzeuge und als Werkstoff für hochbelastete Bauteile wie Druckstöcke oder Umformwerkzeuge benutzt werden. Hugo Lohmann entdeckte beginnend im Jahr 1914 die vielfältigen Möglichkeiten, die sich durch das Abbinden von Wolframcarbid mit Metallen der Eisengruppe unter Verwendung pulvermetallurgischer Arbeitsmethoden ergaben. Wolframcarbid zeichnet sich durch besondere Härte aus, die beinahe so hoch ist wie die von Diamant. Daher stammt der Markenname Widia (Wie Diamant) für Hartmetallwerkzeug der Firma Krupp. 1929 wurde Pobedit in der UdSSR von der gleichnamigen Firma entwickelt. Spikes von Winterreifen für Fahrräder oder Automobile sind häufig aus Hartmetall. Kugelschreiber sind eine weitere verbreitete Anwendung. Die Kugeln werden aus Hartmetall gefertigt, um einen möglichst geringen Verschleiß garantieren zu können.

Es kann als Neutronenreflektor in Kernwaffen eingesetzt werden, um die kritische Masse herabzusetzen.

Seit dem Zweiten Weltkrieg wird Wolframcarbid wegen seiner Härte und gegenüber Stahl gut doppelten Dichte als Kernmaterial in panzerbrechenden Geschossen (Wuchtgeschossen) verwendet, wo es gehärteten Stahl verdrängte. Ab den 1960er Jahren wurde für diesen Zweck vor allem von den USA deutlich weiches abgereichertes Uran eingesetzt, dessen Verwendung jedoch umstritten ist (Giftigkeit, Reststrahlung). Daher ist Wolframcarbid weiterhin für panzerbrechende Munition weit verbreitet.

Für den Einsatz als WC-Hartmetall werden ca. 6 Massenprozent Cobalt als Bindephase zugesetzt. Die Korngröße von WC-Hartmetallen mit 6 bis 10 % Cobalt als Bindemittel beträgt ungefähr 0,5 bis 1,2 Mikrometer. Die Verarbeitung von WC-Hartmetall erfolgt durch Mischen, Mahlen, Grünsintern, Brennen oder Heißisostatisches Pressen (HIPen) bei 1600 bar und 1600 °C. Das Bearbeiten von WC-Hartmetallen ist durch Schleifen sowie mittels Draht- bzw. Funkenerosion möglich. In Spezialfällen werden Kugeln aus Hartmetall mittels Laser durchbohrt (Bohrungsdurchmesser kleiner als 0,25 mm).

Als Wolframschmelzcarbid (WSC) in einem Matrixmetall als Stab oder in einem Eisenröhrchen kann es durch Flammenschmelzschweissen („autogen“) etwa auf Bohrwerkzeuge für den Bergbau aufgetragen werden.

Der Umgang mit Hartmetall erfordert besondere Arbeitsschutzmaßnahmen, denn lungengängige Wolframcarbid-Cobalt-Stäube können Lungenfibrose verursachen und es liegen Anzeichen für eine krebserzeugende Wirkung vor. Diese ist auf das enthaltene Cobalt zurückzuführen. Die akute Toxizität von Wolframcarbid ist sehr gering.

### Wolframdiselid

Trockenschmiermittel, das auch im Höchstvakuum und in der Nähe des absoluten Nullpunktes seine Schmiereigenschaften behält. Es wurde von zunächst für die Gleitlager von Weltraumsimulatoren entwickelt. Hier kann man konventionelle Schmierfette nicht verwenden, da sie sofort einfrieren würden.

### Wommelsdorfsche Kondensatormaschine

Berliner Elektros-Ges.m.b.H. (Wommella, BEG); Berlin-Schöneberg  
Influenzmaschine nach Wehrsen 1902–1910

Gemäss Hersteller hat die betriebssichere Wommelsdorfsche Kondensator-maschine die zehnfache Leistung einer Influenzmaschine gleicher Grösse.

Aus einzelnen isolierenden Platten mit zwischenliegenden Sektoren bestehende Scheibe für Kondensatormaschinen,

Für Hochfrequenz-, Radio-, Röntgen- und Gleichstromversuche. Deutsches Reichspatent

### Working Level Month

Working Level Month (WLM) ist eine historische speziell für den Arbeitsschutz im Uranbergbau eingeführte Einheit. Sie erfasst die Strahlenexposition, die durch Radon und seine Zerfallsprodukte in der Atemluft entsteht. Ein Working Level (WL) ist definiert als beliebige Kombination von kurzlebigen Radon-Folgeprodukten in einem Liter Luft, deren Zerfall zu einer Emission von 130.000 Megaelektronenvolt ( $1,3 \cdot 10^5$  MeV) potentieller Alphaenergie pro Liter Luft führt. Ist eine Person 170 Stunden (einen Arbeitsmonat) lang einem WL ausgesetzt, resultiert eine Exposition von einem WLM.

### XOIMEKH6WUDKOHQDSSDUDW

Theodor Wulfs Anliegen war es, ein Messgerät zu konstruieren, mit dem er die radiogene Ionisation der Luft messen konnte, die sich in seiner Zeit noch am Rande der Messbarkeit befand. Ihm war klar, dass die Ionisation der Luft durch die Wechselwirkung der ionisierenden, radioaktiven Strahlung mit den Molekülen der Luft verursacht war. Je größer das aktive Volumen des Ionisationsgefäßes seines Messgerätes war, umso größer musste die Wahrscheinlichkeit sein, dass Ionisationsprozesse darin stattfänden, und umso größer musste daher der messbare Effekt ausfallen. Mit der Größe einer Ionisationskammer steigt aber auch die Kapazität, was das Messergebnis, die Spannungsdifferenz nach Ablauf einer bestimmten Zeit, aber wieder verkleinert und ungenauer macht.

Die schwierige Aufgabe für Theodor Wulf bestand also darin, das Volumen der Ionisationskammer möglichst groß zu machen, dabei aber die Kapazität der Messanordnung möglichst gering zu halten.

Zur Bestimmung von elektrischen Ladungen wurden damals unter Ermangelung anderer Technologien durchwegs Elektrometer verwendet. Dabei handelt es sich um eine Anordnung, die bewegliche Teile meist in Form von metallischen Blättchen oder Fäden aufweist. Sobald diese beweglichen Teile eine elektrische Ladung erhalten, bilden sie gleichnamige elektrische Felder und üben so eine abstoßende Kraft aufeinander aus. Je höher die elektrische Ladung ist, umso größer ist die abstoßende elektrische Kraft, und umso weiter drücken sich die Teile voneinander weg. So kann der Forscher vom Abstand der Blättchen voneinander auf die elektrische Ladung der Blättchen rückschließen. Unter Anwesenheit ionisierender Strahlung wird die Leitfähigkeit der umgebenden Luft erhöht, was sich in einer Abnahme der Ladung und einer entsprechenden Bewegung der beweglichen Teile widerspiegelt.

Theodor Wulf hatte bereits sein Zweifadenelektrometer entwickelt, das als Messgerät zum Bestimmen elektrischer Ladungen wegen seiner geringen Kapazität, seines weiten Messbereiches und seiner großen Empfindlichkeit eine weltweit einzigartige Qualität aufwies.

Elster und Geitel verwendeten das Elektrometer, um damit den Ladungszustand eines zylinderförmigen Entladungskörpers zu bestimmen, was eine große Gesamtkapazität ergab.

Die entscheidende Idee von Theodor Wulf bestand darin, die Fäden seines Elektrometers selbst als Entladungskörper zu verwenden, und das Gehäuse des Elektrometers, um das Ionisationsvolumen abzugrenzen. Die so erzielte, sehr kompakte Bauart führte zu sensationell geringen Werten der Kapazität.

Als Elektrometergefäß, das gleichzeitig das Ionisationsvolumen definierte, wählte Theodor Wulf eine liegende Metalltrommel. Im Zylindermantel ist eine kreisrunde Öffnung ausgespart, durch die ein Mikroskop ragt, das zum Beobachten der Fäden dient. Ihm gegenüber ist eine Öffnung, durch die die Fäden vermittels eines Spiegels beleuchtet werden können.

Der Wulf'sche Strahlenapparat stellt eine Kombination aus Ionisationskammer und Wulf'schen Zweifadenelektrometer dar.

Mit Hilfe der Stellschraube A lassen sich die Fäden des Elektrometers um die Längsachse des Strahlenapparats drehen, um eine für die Ablesung günstige Position einstellen zu können. Natrium wird verwendet, um die Luft im Inneren des Ionisationsvolumen von Feuchtigkeit frei zu halten.

Der innere, kleinere Zylinder dient der Überprüfung der Isolation des Gerätes. Wird er über die Fäden gesenkt, so verringert sich das aktive Ionisationsvolumen auf den Innenraum des kleineren Zylinders. Wenn die Entladung pro Zeiteinheit dann entsprechend der Volumsänderung abnimmt, so kann man davon ausgehen, dass die Verlustströme durch mangelhafte Isolierung vernachlässigbar gering sind.

Das Wulf'sche Elektrometer wurde in den nächsten Jahrzehnten vielfach verwendet, verbessert und weiterentwickelt, um die Intensität der Radioaktiven Strahlung zu messen, unter anderen von Albert Gockel, einem Schweizer Physiker, und Viktor Franz Hess, dem Österreichischen Nobelpreisträger für Physik des Jahres 1936.