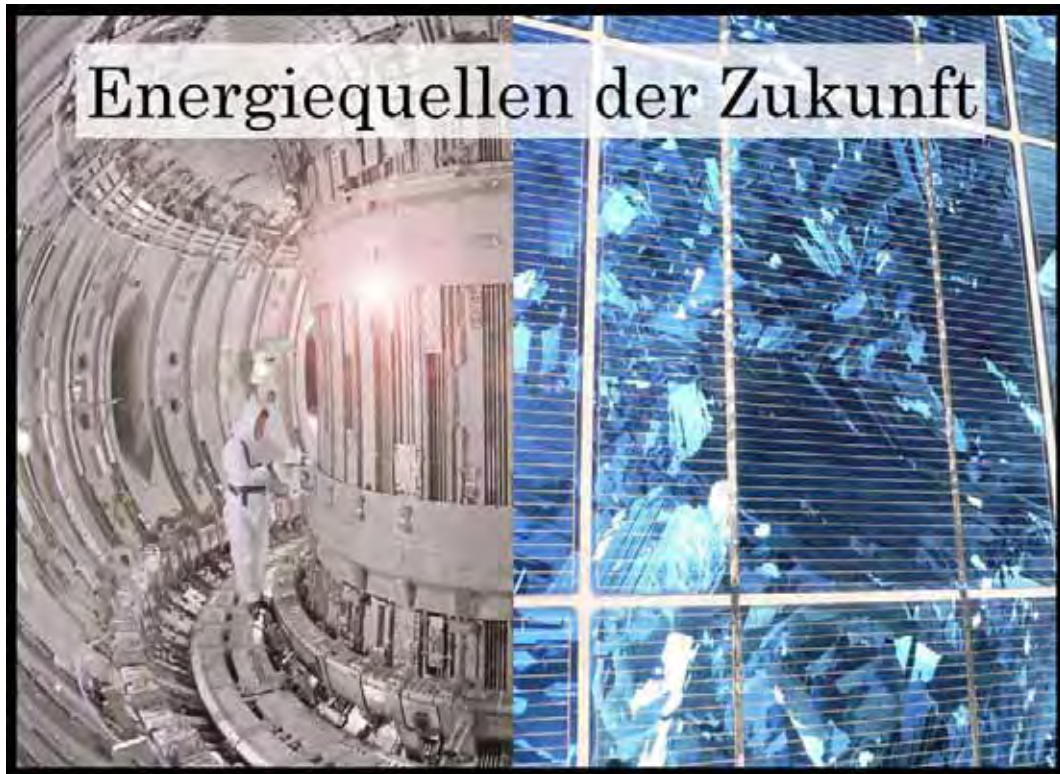


Heinrich-Heine-Gymnasium

Facharbeit
aus dem Fach
Physik

Thema:



Verfasser: Fabio De Marco

Kursleiterin: Fr. Ingrid Dost

Erzielte Note: in Worten:

Erzielte Punkte: in Worten:

abgegeben bei der Kollegstufenbetreuung:

.....

Unterschrift der Kursleiterin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Photovoltaik	4
2.1	Was ist Photovoltaik?	4
2.2	Halbleiter-Photovoltaik	4
2.2.1	Der Aufbau des Silizium-Kristalls	4
2.2.2	Das Bändermodell	4
2.2.3	Die Dotierung	6
2.2.4	Ladungstrennung am p-n-Übergang	6
2.3	Der photoelektrische Effekt	8
2.4	Der Aufbau einer typischen Silizium-Solarzelle	8
2.5	Das solare Spektrum und die Photonenenergien	10
2.6	Rentabilität der Photovoltaik	12
2.7	Der Betrieb einer privaten Solaranlage	13
3	Kernfusion	14
3.1	Geschichte	14
3.2	Physikalische Einführung	14
3.3	Bedingungen für die Deuterium-Tritium-Fusion	16
3.3.1	Die Überwindung der Abstoßung	16
3.3.2	Der Tunneleffekt	17
3.3.3	Die Kernreaktionsrate	17
3.3.4	Die Alphateilchen-induzierte Plasmazündung	19
3.4	Der Brennstoffkreislauf	21
3.4.1	Deuterium und Tritium	21
3.4.2	Das Blanket	21
3.4.3	Der Divertor	22
3.5	Methoden der Plasmaheizung	23
3.6	Der Plasmaeinschluss	24
3.6.1	Der Trägheitseinschluss	25
3.6.2	Der Stellarator	25
3.6.3	Der Tokamak	26
3.6.4	Schwächen des magnetischen Einschlusses	27
3.7	Das ITER-Experiment	27
3.8	Zukunftsfähigkeit der Kernfusion	28
4	Schlussatz und Ausblick	29
5	Bildanhang: ITER im Querschnitt	30

1 Einleitung

Unsere heutige, technisierte Welt ist ohne eine stabile Energieversorgung nicht mehr vorstellbar: Insbesondere elektrische Energie hält den Wirtschaftskreislauf am Leben und ein plötzlicher Ausfall derselben würde weltweit zum Zusammenbruch der modernen Gesellschaft führen. Dies ist umso erstaunlicher, da der elektrische Strom erst vor knapp 100 Jahren in Wohnungen und Fabriken Einzug hielt. Die längste Zeit waren seitdem fossile Brennstoffe Hauptquellen dieses Stroms.

Diese Stoffe (wie etwa Erdöl, Erdgas und Kohle) sind nicht zukunftssicher. Da sie bei der Verbrennung verbraucht werden, reduziert sich ihre verfügbare Menge unwiederbringlich. Sobald also alle Lagerstätten geleert sind – oder sich deren Abbau nicht mehr lohnt – endet das Zeitalter der fossilen Brennstoffe. Sie stellen also knappe Güter dar, deren Verfügbarkeit kontinuierlich abnimmt und in näherer Zukunft gar nicht mehr gegeben sein wird. Von einer „Energiequelle der Zukunft“ kann hier also nicht die Rede sein.

Erneuerbare Energiequellen wie Erdwärme, Wind- und Wasserkraft besitzen dieses Problem nicht: Die von der Sonne auf die Erde treffende Strahlungsleistung reicht leicht aus, um den gesamten Energiebedarf der Erde zu decken. Man muss hierbei bedenken, dass letztlich fast alle so genannten „erneuerbaren Energien“ indirekte Nutzungen der Sonnenenergie sind, so auch Wind- und Wasserkraft. Durch Nutzung dieser Energie – sei es nun indirekt oder direkt per Photovoltaik – könnten theoretisch alle Energieprobleme der Gegenwart und näheren Zukunft gelöst werden.

Die Photovoltaik nutzt die Energie der Sonnenstrahlung und wandelt diese ohne Umwege in Strom um. Ihr besonderer Vorteil ist, dass sie quasi überall genutzt werden kann, beispielsweise auf Hausdächern in dicht bebauten Gebieten. Allerdings besteht bei der Herstellung photovoltaischer Module heute noch ein großer Entwicklungsbedarf, weshalb die Photovoltaik mit Recht „Energiequelle der Zukunft“ genannt werden darf. Theorie und Technik der Photovoltaik sollen daher den ersten Teil der Arbeit umfassen.

Neben den fossilen Rohstoffen und den regenerativen Energien gibt es noch einen dritten Weg der Energiegewinnung: die Freisetzung der Bindungsenergie von Atomkernen. Hier lässt sich grundsätzlich zwischen der Kernfission (der Kernspaltung) und dem Gegenteil, der Kernfusion (der Verschmelzung mehrerer Atomkerne) unterscheiden. Die Kernspaltung ist seit einiger Zeit wieder als – vorgeblich kohlendioxidfreie – Alternative zu Stein- und Braunkohle ins Gespräch gekommen. Unberücksichtigt bleiben dabei jedoch die zahlreichen ökologischen Gefahren, die die Kernspaltung bekanntlich mit sich bringt.

Die Kernfusion besitzt diese Probleme nicht: Außer Kontrolle geratende Reaktionen sind nicht möglich und die Menge an freigesetzter Strahlung ist äußerst gering. Die Probleme bei ihrer Umsetzung sind vielmehr technischer (und damit finanzieller) Natur. Als Energierohstoffe werden zudem nur zwei der am häufigsten auf der Erde vorkommenden Elemente benötigt: Lithium und Wasserstoff. Die Kernfusion besitzt also ebenfalls Potential zur „Energiequelle der Zukunft“, weshalb ihr der zweite Teil der Arbeit gewidmet ist.

2 Photovoltaik

2.1 Was ist Photovoltaik?

Mit dem Begriff „Photovoltaik“ werden alle Technologien beschrieben, die ohne weitere Umwandlungsprozesse Sonnenlicht in Strom umwandeln. Die „Maschine“ der Photovoltaik ist die Solarzelle. Davon abzugrenzen sind vor allem solarthermische Systeme, die Sonnenlicht zur Erhitzung eines Stoffes nutzen, dessen gespeicherte thermische Energie dann in elektrische Energie umgesetzt wird.

2.2 Halbleiter-Photovoltaik

Nahezu alle Photovoltaik-Systeme basieren auf Halbleitertechnik. Um die Arbeitsweise einer Solarzelle zu verstehen, sind daher grundsätzliche Kenntnisse der Halbleiterphysik notwendig. Zwar eignen sich viele Halbleitermaterialien theoretisch für den Einsatz in der Photovoltaik, die meisten Solarmodule werden jedoch aus Silizium hergestellt.

2.2.1 Der Aufbau des Silizium-Kristalls

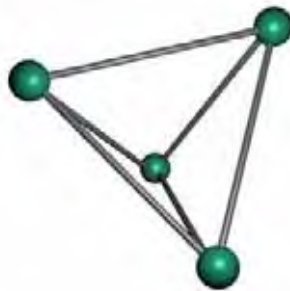


Abbildung 1: Der tetraedische Silizium-Kristall

Aus Silizium lassen sich künstliche Kristalle mit einheitlicher Kristallstruktur, sogenannte Einkristalle herstellen. Diese finden vorwiegend in der Mikroelektronik, aber auch in der Photovoltaik Anwendung. Silizium ist ein vierwertiges Element, was bedeutet, dass jedes Atom im Kristall insgesamt vier Bindungen zu seinen vier Nachbaratomen ausbildet. Aus diesem Grund ist der Siliziumkristall tetraedisch aufgebaut.

2.2.2 Das Bändermodell

Im einzelnen Atom kann ein Elektron jeweils nur eine von wenigen „zulässigen“ Energiestufen annehmen und entsprechend nur bestimmte Energiebeträge aufnehmen oder abgeben. Im Bohrschen Atommodell werden die Energiestufen durch verschiedene Umlaufbahnradien der Elektronen dargestellt (s. Abb. 2a).

Kommen sich zwei Atome nahe genug, beeinflussen beide Atome die Energiestufe des Orbitals (2b). Im Siliziumkristall (2c) befinden sich jedoch sehr viele

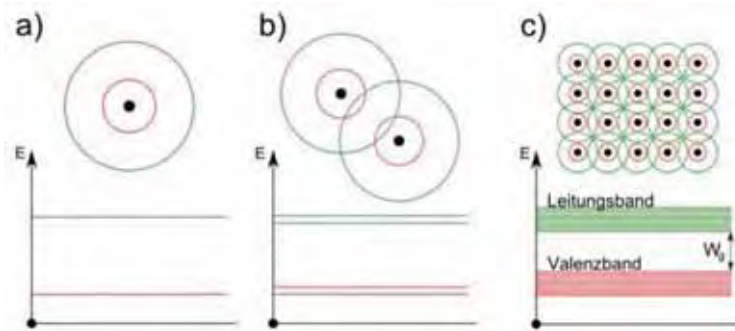


Abbildung 2: Die Entstehung der Energiebänder

Atome in unmittelbarer Nähe. Da die Energie des Elektrons von ihnen allen beeinflusst wird, entstehen sehr viele mögliche Energiestufen, die nahe beieinanderliegen, weshalb sie zu sogenannten „Bändern“ zusammengefasst werden. Die zwei wichtigsten Bänder sind das Valenz- und das Leitungsband: in Ersterem befinden sich die Elektronen, die die Bindungen zwischen den Atomen ausbilden. In Nichtleitern halten sich alle Elektronen dort oder in energetisch tiefer liegenden Bändern auf. Befinden sich Elektronen hingegen im Leitungsband, haben sie die Bindung zum Atom verlassen und können sich frei im Material bewegen. Zwischen diesen Bändern existieren zum Teil „Bandlücken“, also Energiezustände, die die Elektronen nicht annehmen können. Die minimale Energie, die ein Elektron benötigt, um einen solchen Bereich zu überwinden, wird Bandabstand (abgekürzt W_g) genannt (Göbel 2008).

Die dem Atomkern näheren Elektronen – wie etwa in der K-Schale – sind enger an diesen gebunden und befinden sich unter dem Valenzband. Die Valenzelektronen, die sich beim Silizium in der M-Schale befinden, haben hingegen eine höhere Energie und können bei leitenden Materialien mit geringem Energieaufwand das Atom verlassen (in Leitern ist $W_g = 0$), wobei sie das energetisch höher gelegene Leitungsband erreichen. Bei Isolatoren hingegen ist $W_g > 3 \text{ eV}$ und somit für die Elektronen kaum zu überwinden. Eine Sonder-



Abbildung 3: Bandstruktur von Leitern, Halbleitern und Isolatoren

stellung nehmen hier die Halbleiter ein: Dort liegt der Bandabstand zwischen denen der Leiter und der Nichtleiter. Silizium etwa besitzt bei $T=300\text{K}$ eine Bandlücke von $1,12 \text{ eV}$ (Würfel 2000). Bei Zimmertemperatur können die Elektronen das Leitungsband nicht erreichen – der Halbleiter ist ein Isolator. Erst durch äußere Energiezufuhr (beispielsweise Temperaturerhöhung oder Beleuchtung) kann ein Stromfluss auftreten.

2.2.3 Die Dotierung

Prinzipiell sind photovoltaische Zellen spezielle, besonders großflächige Dioden, da sie wie diese einen sogenannten „p-n-Übergang“ benötigen. Es handelt sich dabei um die Kontaktfläche zwischen positiv (p) und negativ (n) dotiertem Silizium.

Bei dem Prozess der Dotierung wird der vierwertige Silizium-Einkristall mit drei- oder fünfwertigen Atomen (oft Aluminium, bzw. Phosphor) verunreinigt. Dadurch werden einige Atome des Kristalls durch die anderen Atome ersetzt, die statt den vier Valenzelektronen drei oder fünf besitzen. Die Teilchendichte der Dotierungsatome im Kristall beträgt nur 10^{15} bis 10^{19} cm^{-3} , während die Gitteratome eine Teilchendichte von 10^{23} cm^{-3} aufweisen. Aufgrund dieses geringen Anteils an Dotierungsatomen muss das Halbleitermaterial äußerst rein sein (Würfel 2000, S. 47).

Im n-dotierten Kristall können aufgrund der Kristallstruktur nur vier der fünf Valenzelektronen des Phosphors eine Bindung mit anderen Elektronen eingehen. Das verbleibende Elektron ist ungebunden und kann daher mit geringem Energieaufwand ins Leitungsband gehoben werden. Der p-dotierte Kristall

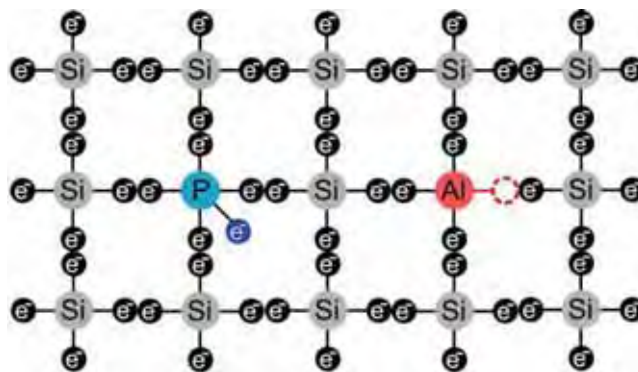


Abbildung 4: Der n- und p-dotierte Si-Kristall

enthält hingegen Aluminiumatome, die nur drei Valenzelektronen besitzen. Ein benachbartes Siliziumatom besitzt also einen Bindungspartner zu wenig. Eines seiner vier Elektronen ist also ebenfalls nicht gebunden und kann bei Energiezufuhr an die Stelle des fehlenden Elektrons treten. Anstatt der Elektronen selbst wird in der Halbleiterphysik üblicherweise die Fehlstelle (das sogenannte „Loch“) als positiver, *scheinbarer* Ladungsträger betrachtet, der beweglich ist. In Wirklichkeit wird die Fehlstelle jedoch nur von einem Elektron besetzt, dessen ursprüngliche Position zur neuen Fehlstelle wird: Das Loch hat sich, wie in Abb. 5, also scheinbar bewegt (Göbel 2008, S. 17).

2.2.4 Ladungstrennung am p-n-Übergang

Beim p-n-Übergang berühren sich die beiden unterschiedlich dotierten Kristalle. Bei der Solarzelle wird der n-dotierte Teil auf die Seite aufgetragen, die dem Licht zugewandt ist (siehe auch 2.4).

Die Entstehung der Raumladungszone

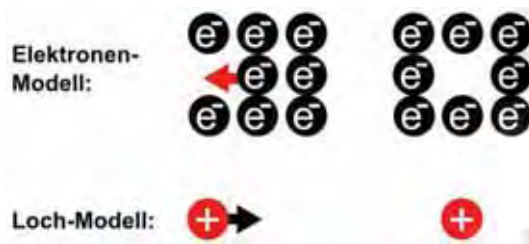


Abbildung 5: Das Modell des „Loches“

Da die überzähligen Elektronen im n-Silizium nur schwach an Atomkerne gebunden sind, können sie sich relativ frei bewegen und diffundieren (wegen der ungleichen Elektronendichte) zur p-dotierten Schicht. Erreichen diese Elektronen dort ein Atom mit drei Valenzelektronen, gehen sie eine Bindung mit ihm ein. Infolgedessen entsteht um die Berührungsfläche des n- und des p-dotierten Kristalls die sogenannte Raumladungszone, ein Bereich, in dem alle Atome vier Valenzelektronen besitzen und keine freien Ladungsträger vorhanden sind. Die fünfwertigen Atome haben also ein Elektron abgegeben, die dreiwertigen eines aufgenommenen.

Der n-Bereich dieser Zone ist also positiv, der p-Bereich negativ geladen. Das dadurch entstehende elektrische Feld beschränkt auch die Größe dieser Zone, da es weiterer Diffusion freier Elektronen entgegenwirkt (Abb. 6).



Abbildung 6: Bildung von Raumladungszone und Elektron-Loch-Paaren

Ladungstrennung durch Einstrahlung

Das Vorliegen der Raumladungszone stellt die Grundlage für die Stromerzeugung dar. Fällt ein Photon ausreichender Energie auf ein Atom in der Zone, wird es von einem Elektron absorbiert, das dadurch ins Leitungsband gelangt – zurück bleibt eine Fehlstelle. Ein „Elektron-Loch-Paar“ ist entstanden.

Das innere elektrische Feld verhindert nun, dass sich das freigewordene Elektron wieder mit dem Loch vereinigt. Vielmehr wird es zur n-dotierten Schicht gezogen, während sich das korrespondierende Loch in die entgegengesetzte Richtung bewegt. Die so resultierende Potentialdifferenz zwischen n- und p-dotiertem Bereich kann dann den gewünschten Strom bewirken (Abb. 6).

2.3 Der photoelektrische Effekt

Der photoelektrische Effekt tritt bei der Bestrahlung von Metall- oder Halbleiterflächen mit Licht auf und bezeichnet die Energieübertragung von Lichtteilchen an Elektronen, wodurch letztere entweder das Material vollständig verlassen, oder in ihm eine Potentialdifferenz bewirken. Der Begriff bezeichnet also unterschiedliche Effekte, wobei für die Photovoltaik nur der letztgenannte, der sogenannte *innere* photoelektrische Effekt, von Interesse ist.

Der Effekt wurde 1839 von Alexandre Becquerel bei Elektrolyseversuchen mit Platinelektroden und verdünnter Säure entdeckt: Zwischen den Elektroden konnte er einen geringen Stromfluss messen. Setzte er eine Elektrode dem Licht aus, erhöhte sich der gemessene Strom jedoch (Blum 1996).

Dieser Effekt stellte die Physiker vor ein Rätsel, da er sich nicht hinreichend mit der bis dahin akzeptierten Wellentheorie des Lichts erklären ließ. Albert Einstein löste das Problem 1905 mit einer neuen Theorie, nach welcher Licht nicht kontinuierlich als Welle im Raum verteilt sei, sondern aus Teilchen, den sogenannten Photonen bestehe (vgl. Einstein, A.: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik 1905, S. 132–148).

Trotzdem behielt die Wellentheorie noch eine eingeschränkte Gültigkeit, da auch Einsteins Theorie keineswegs alle Phänomene erklären konnte. In der erst später begründeten Quantenphysik sollte diese Doppelnatur des Lichts, der sogenannte „Welle-Teilchen-Dualismus“ zum Prinzip erhoben werden.

Bei der Solarzelle wird der *photovoltaische* Effekt, ein Spezialfall des inneren photoelektrischen Effekts, genutzt, der den oben erläuterten p-n-Übergang erfordert. Es handelt sich dabei um die Absorption eines Photons durch ein Elektron, wodurch letzteres in das Leitungsband des Metalls gehoben wird.

2.4 Der Aufbau einer typischen Silizium-Solarzelle

Der p-n-Übergang ist das hauptsächliche Element einer jeden Solarzelle. Da die Photonen die n-dotierte Schicht der Solarzelle durchqueren müssen, um bis zur Raumladungszone zu gelangen, beträgt die Dicke des n-dotierten Kristalls nur etwa $1\ \mu\text{m}$, da so eine vorzeitige Photonenabsorption größtenteils verhindert wird.

Der positiv dotierte Teil der Solarzelle muss jedoch dicker sein, um möglichst viele Photonen absorbieren zu können. Eingerahmt wird der Kristall durch zwei Anschlüsse, an der Unterseite üblicherweise in Form einer Metallplatte. An der

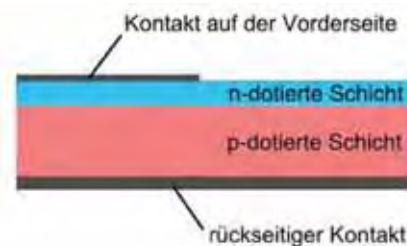


Abbildung 7: Querschnitt durch eine gewöhnliche Solarzelle

Oberseite hingegen werden sehr dünne „Metallfinger“ benutzt, um möglichst wenig Einstrahlungsfläche zu verdecken (Abb. 7).

Elektronische Eigenschaften der Solarzelle

Die Stromstärke der Solarzelle ist direkt von der aufgenommenen Strahlungsleistung und, wie bei jeder Diode, von der Spannung abhängig. Somit lässt sich also auch eine Kennlinie zeichnen. Es fällt auf, dass der Strom in einem weiten Bereich (unabhängig von der Spannung) konstant bleibt, dann jedoch steil abfällt und schnell 0 erreicht. Anders ausgedrückt, steigt die Spannung an der

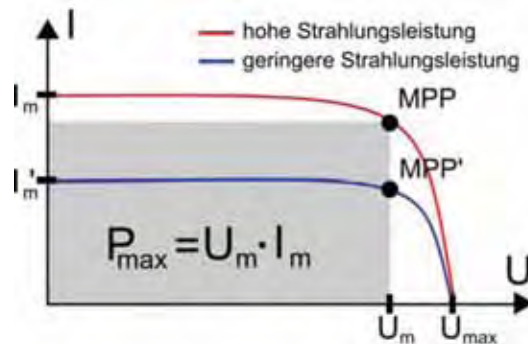


Abbildung 8: Kennlinie einer Si-Solarzelle

Solarzelle auch bei großen angelegten Widerständen nie über einen bestimmten Wert (bei Silizium-Solarzellen ca. 0,5 V) hinaus an. Dieser Sachverhalt lässt sich einfach dadurch begründen, dass sich nur eine beschränkte Zahl an Elektronen und Löchern an den Elektroden ansammeln kann, da das innere elektrische Feld der Raumladungszone mit zunehmender Ladungstrennung abnimmt und sich bei Erreichen der Maximalspannung ebenso viele Elektronen-Loch-Paare wiedervereinigen wie neu entstehen.

Die Leistung der Solarzelle berechnet sich nach $P = U \cdot I$. Somit wird für eine bestimmte Spannung U (mit $0 < U < U_{max}$) maximale Leistung erreicht. Dieser Punkt wird „Maximum Power Point“ (MPP) genannt. Die typische Einheit, in der die Leistung einer Solarzelle angegeben wird, ist „ kW_p “: Es handelt sich dabei um die erzielte Leistung der Solarzelle unter sogenannten Standard-Testbedingungen: Es muss sich beim einstrahlenden Licht um ein AM-1,5-Spektrum handeln (siehe 2.5) und eine Leistungsdichte von exakt 1000 W/m^2 vorliegen.

In der Praxis werden Solarzellen in Reihen- und Parallelschaltungen zu größeren Solarpaneelen verbaut, sodass sich deren – meist geringe – Einzelstromstärken, bzw. -spannungen addieren.

Der Wirkungsgrad

Eine wichtige Kenngröße jeder Solarzelle ist der Wirkungsgrad, der oft mit η (Eta) abgekürzt wird. Er ist der Quotient von erzeugter elektrischer Leistung und einfallender Strahlungsleistung: $\eta = E_{ph}/E_{el}$. Die Tatsache, dass die meisten Solarzellen nur Wirkungsgrade von 15 bis 20 % erreichen, ist ein zentraler Grund für ihren anfänglich eher verhaltenen Erfolg.

Das verwendete Halbleitermaterial

Prinzipiell lassen sich zahlreiche Halbleitertypen für die Verarbeitung in photovoltaischen Zellen einsetzen, beschränkt wird diese Vielfalt jedoch durch die aufwändigen Herstellungskosten und den damit verbundenen hohen Preis einiger Materialien. Am häufigsten wird kristallines Silizium verwendet, das sich wegen seines relativ hohen Wirkungsgrades, sowie der moderaten Herstellungskosten gut eignet.

Monokristallines Silizium besteht, wie der Name sagt, aus einem einzigen Kristall (auch „Einkristall“ genannt), was bedeutet, dass alle Atome Teil der gleichen mikroskopischen Kristallstruktur sind. Wie Mikrochips werden monokristalline Solarzellen aus sogenannten Wafern, Scheiben eines Silizium-Einkristalls, hergestellt. Dieser wird meist nach dem sogenannten „Czochralski-Verfahren“ hergestellt, bei dem aus einem Tiegel mit Siliziumschmelze ein zylinderförmiger Kristall gezogen wird. Dieser Prozess ist sehr energieaufwändig und teuer, allerdings haben die monokristallinen Zellen meist einen höheren Wirkungsgrad (über 20 %) als die anderen Bauarten. Eine monokristalline Solaranlage kann also pro m^2 Solarzellenfläche über 200 W elektrische Leistung generieren.

Die *polykristalline* Zelle hat einen etwas anderen Aufbau: sie besteht aus mehreren, ungleichmäßig ausgerichteten Kristallstrukturen, die für ihr charakteristisches, unregelmäßiges Aussehen verantwortlich sind. Das dafür notwendige „Solarsilizium“ wird durch verschiedene chemische Prozesse unter der Beteiligung von Silizium-Chlor-Verbindungen (sogenanntem Tetrachlorsilan) aus Rohsilizium hergestellt und hat schließlich eine Reinheit von über 99,9 %. Die Struktur entsteht durch Erhitzung und anschließender Abkühlung des Reinstoffs. Der Wirkungsgrad liegt unter 16 %.

Eine weitere Form, in der Silizium für Solarzellen verwendet wird, ist *amorph* (also nicht-kristallin). Das sogenannte a-Silizium wird dabei einfach auf ein „Substrat“ wie etwa Glas aufgedampft. Die Dicke der gesamten Si-Schicht beträgt dabei weniger als $1 \mu m$, weshalb diese Herstellungsmethode relativ preiswert ist. Der Nachteil ist der geringe Wirkungsgrad dieses Typs von nur etwa 5 % (IPE).

Daneben existieren auch Alternativen zum Silizium, wie etwa *Galliumarsenid* (GaAs). Derartige Zellen erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu $\eta = 30 \%$, sind aber sehr teuer in der Herstellung und werden daher nur für Spezialanwendungen wie die Raumfahrt eingesetzt.

2.5 Das solare Spektrum und die Photonenenergien

Die Strahlungsdichte der Sonne (auf der Erde) ist ein zentraler Wert für die photovoltaische Technik. Außerhalb der Atmosphäre beträgt sie:

$$j_s = 1367 \text{ W/m}^2$$

Dieser Wert j_s ist die sogenannte Solarkonstante. Sie kann durch Messungen und Spektralanalysen abgeschätzt werden und bezeichnet die Strahlungsleistung der Sonne pro Flächeneinheit.

Von großer Bedeutung für die Photovoltaik ist auch die spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts. Insbesondere die Intensitätsverteilung (also wel-

cher Anteil der Photonen welche Energie besitzt) ist entscheidend und erklärt unter Anderem, warum der Wirkungsgrad jeder Solarzelle selbst im Idealfall einen bestimmten Wert nicht übersteigen kann. Mithilfe des Planck-Strahlungsgesetzes lässt sich die Intensitätsverteilung des Sonnenlichtes annähern, wenn man annimmt, dass die Sonne ein sogenannter „Schwarzer Körper“ ist, also auftreffende Strahlung vollständig absorbiert, und die Temperatur $5525K$ besitzt (graue Linie in Abb. 9). Dieser Graph gibt, über ein Wellenlängenintervall

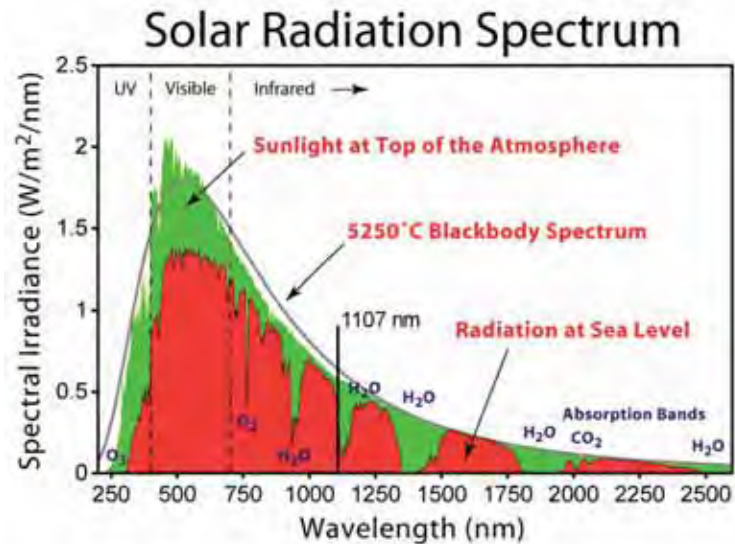


Abbildung 9: Intensitätsspektrum der Sonnenstrahlung

integriert, die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit im fraglichen Intervall an. Man erkennt, dass das Strahlungsmaximum der Sonne bei ca. 500 nm liegt, also im gelben Bereich des Spektrums. Der grüne Graph zeigt die tatsächliche Verteilung der Sonnenstrahlung im Weltraum, also außerhalb der Erdatmosphäre. Sie stimmt in weiten Teilen mit dem theoretischen Verlauf nach dem Planck-Gesetz überein.

Nicht berücksichtigt wird bei dieser Verteilung jedoch der oben bereits ange-deutete Einfluss der Atmosphäre. Daher wurden für Solarzellentests Standardbedingungen festgelegt, die die Verhältnisse auf der Erde adäquater darstellen. Diese sind wiederum im roten Graphen dargestellt: Er zeigt das Spektrum für AM=1,5. „AM“ steht für „air mass“, also Luftmasse, was bedeutet, dass das Licht dieses Spektrums das 1,5-fache des kürzesten Wegs (der im rechten Winkel zur Oberfläche verlaufen würde) durch die Atmosphäre zurückgelegt hat. Auf Abb. 10 ist der Sachverhalt dargestellt. Man sieht, dass diese Verteilung eine weit geringere spezifische Intensität aufweist. Dies ist auf Streuung und Reflexion in der Atmosphäre zurückzuführen. Zudem ist die Intensität einiger Wellenlängen beinahe Null, was auf Absorption durch atmosphärische Gase zurückzuführen ist (so filtert Ozon bekanntlich den größten Teil der UV-Strahlung heraus, während Wasserdampf eher langwellige Strahlung absorbiert). Daher erreichen von den ursprünglichen $1367 W/m^2$ von dieser Leistung an einem sonnigen Tag am Äquator höchstens $1200 W/m^2$ den Erdboden, in unseren Breiten im Sommer maximal $1000 W/m^2$ (Würfel 2000).

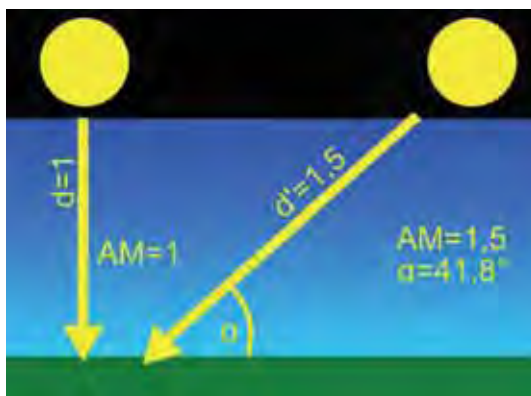


Abbildung 10: Die wichtigsten AM-Werte

Von Bedeutung für die Photovoltaik ist die solare spektrale Leistungsdichte wegen der Bandlücke des verwendeten Halbleiters. Bei Silizium beträgt sie beispielsweise $W_G(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$ bei $T = 300\text{K}$. Das bedeutet, dass Photonen mit geringerer Energie nicht absorbiert werden können und das Material für sie durchsichtig ist. Bei Silizium ist dies also der Fall für Photonen mit einer Wellenlänge über $\lambda = h \cdot c / W_G(\text{Si}) = 1107\text{nm}$. Daraus folgt, dass die Strahlungsleistung der Sonne von $\lambda_1 = 1107\text{nm}$ (im Bild 9 markiert) bis $\lambda_2 = \infty$ für die Si-Solarzelle nicht nutzbar ist, und deren Wirkungsgrad also nie bei 100% liegen kann.

2.6 Rentabilität der Photovoltaik

Abb. 11 zeigt die Verteilung der durchschnittlichen Sonnenstrahlungsleistung auf der Erde. Aufgrund des steileren Lichteinfallswinkels liegt die Strahlungs-

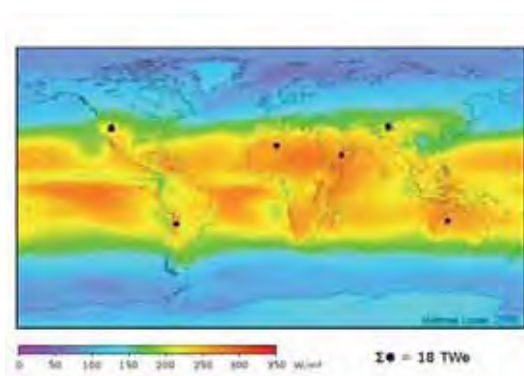


Abbildung 11: Weltweite Verteilung der durchschnittlichen Strahlungsleistung

leistung in den äquatornahen Gebieten am höchsten (gelb, orange). Diese Gebiete eignen sich also im Allgemeinen auch am besten für den Einsatz von photovoltaischen Anlagen. Allerdings ist hier eine Diskrepanz zwischen „Angebot“ und Nachfrage erkennbar: Der größte Energiebedarf besteht in den Industrieländern wie der USA und den EU-Mitgliedsstaaten, sowie demnächst auch China: Diese Staaten befinden sich in den eher nördlich gelegenen Gebieten, benötigen aber zusammen über 56% der weltweit generierten elektrischen

Energie, während in den optimalen Gewinnungsgebieten, wie etwa der Sahara, nahezu kein Strom verbraucht wird. Dies ermöglicht Spekulationen über riesige Solarparks in der Sahara, die den gesamten Energiebedarf Europas decken könnten. Zu berücksichtigen ist bei diesen Diskussionen aber auch die weltpolitische Lage, die solche übernationalen, ja, überkontinentalen Projekte wohl kaum ermöglicht. Die Tatsache, dass die Sonne in äquatorfernen Regionen besonders im Winter nicht sehr weit über den Horizont steigt, stellt die Ursache für zwei große Probleme dar: Zunächst einmal werden horizontal ausgerichtete Solarpaneele unzureichend beleuchtet, und selbst wenn dies durch vertikale Ausrichtung der Paneele zur Einstrahlrichtung gelöst wird (was nicht immer möglich ist), ist die Ausbeute immer noch geringer als im Sommer oder am Äquator, da das Licht bei einem so niedrigen Stand einen langen Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss und hohe AM-Werte vorliegen (s. a. 2.5). Beispielsweise liegt München auf $48^\circ 9'$ nördlicher Breite, weshalb am 23.12. die Sonne nicht höher als $24^\circ 39'$ steigt. Der AM-Faktor beträgt dementsprechend *mindestens* $1/\sin(24^\circ 39') = 2,40$. Bei solch großen Werten wird ein Großteil der Strahlungsleistung vor Erreichen der Erdoberfläche gestreut.

Platzbedarf und Massenproduktion

Der Platzbedarf für Solaranlagen ist, verglichen mit anderen Methoden der Energieumwandlung, bedeutend. Glücklicherweise können Photovoltaikanlagen auch auf Dächer montiert werden, wodurch keine Nutzfläche verloren geht. Dies ist insbesondere in stark urbanisierten Ländern, also Gegenden, in welchen ja auch der Haupt-Energiebedarf liegt, ein großer Vorteil. Theoretisch würde die Bedeckung von 1% der Landesfläche Deutschlands, also etwa 3500 km^2 , mit Photovoltaikanlagen genügen, um den gesamten deutschen Energiebedarf zu decken (Knaupp 2000, S. 56). Im großtechnischen Maßstab werden deshalb völlig neue und vor allem billigere Produktionstechniken nötig, um ähnliche Dimensionen zu erreichen. Insbesondere die oben erwähnte amorphe Solarzelle bietet für die Zukunft noch großes Wachstumspotential.

2.7 Der Betrieb einer privaten Solaranlage

Eine Hürde bei der Installation einer Photovoltaik-Anlage sind die erforderlichen hohen Investitionen. Andererseits können auch Privatpersonen mit Photovoltaik Geld verdienen, was nicht zuletzt an den unzähligen Büchern über Selbstbau-Anleitungen ersichtlich ist. Durch Installation einiger Solarpaneele auf dem Dach des eigenen Hauses kann einerseits der eigene Stromverbrauch zumindest zeitweise gedeckt werden und in Überschusszeiten mithilfe eines Wechselrichters in das öffentliche Netz eingespeist werden. Zwar ist die Errichtung einer solchen Anlage sehr teuer, doch da die Photovoltaik insbesondere in Deutschland stark subventioniert wird, amortisiert sie sich meist nach fünf bis sieben Jahren.

Entscheidend ist jedoch, dass insbesondere die Solarzellen selber eine positive Energiebilanz besitzen, also bei der Herstellung der Zelle nicht mehr Energie benötigt wurde, als diese während ihrer Lebensdauer in Strom umwandelt. Insbesondere bei monokristallinen Zellen stellt sich diese Frage, doch selbst hier kann inzwischen die Energiebilanz innerhalb von höchstens 4 Jahren ausgegli-

chen werden, was bei einer durchschnittlichen Lebensdauer eines PV-Panels von 20 Jahren vollauf genügt. Durch Wiederverwertung alter Module kann der Energieaufwand sogar auf ein Viertel reduziert werden (Knaupp 2000, S. 92f.).

Öffentliche Förderungen

Bereits 1990 wurde das sogenannte 1000-Dächer-Programm gestartet, das den Bau photovoltaischer Anlagen subventionierte. Damals konnten die staatlichen Zuschüsse jedoch noch nicht die hohen Kosten der Technik ausgleichen. Die Aktion wurde von 1999 bis 2003 mit dem 100'000-Dächer-Programm im Rahmen des „Erneuerbare-Energien-Gesetzes“ (EEG) fortgesetzt, das die Nutzung erneuerbarer Energiequellen fördern soll. Hier wurden den Bauenden in Abhängigkeit von der Anlagengröße Vorschüsse, sowie preiswerte, langfristige Darlehen für den Bau (oder die Erweiterung) photovoltaischer Anlagen ab einer Leistung von 1 kW_p gezahlt. Sowohl Privatpersonen, als auch kleinere bis mittlere Unternehmen konnten diese Förderung, die von der Kreditanstalt für Wiederaufbau bereitgestellt wurde, in Anspruch nehmen (Knaupp 2000, S. 116 ff.). Das Programm wurde 2003 eingestellt, nachdem insgesamt 300 MW_p an photovoltaischer Leistung installiert wurden.

Auch heute können private Solarstromerzeuger noch Subventionen erhalten, hauptsächlich im Rahmen des Stromeinspeisungsgesetzes, das dem Produzenten feste Tarife pro eingespeister Kilowattstunde zusichert.

3 Kernfusion

3.1 Geschichte

Auch in der Kernfusion spielt die Sonne eine zentrale Rolle: Obwohl den Menschen schon lange bekannt ist, dass die Sonne für sie lebenswichtig ist, blieb der Ursprung der von ihr ausgehenden Wärme unbekannt und wurde meist nur mythologisch anhand zahlreicher „Sonnengottheiten“ erklärt.

Die wahre Natur der Sonne wurde erst in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt: Durch die im Sonnenzentrum herrschenden hohen Temperaturen und Drücke reagieren kleinere zu größeren Atomkernen, wobei Bindungsenergie freigesetzt wird. Dieser Prozess wird „Kernfusion“ genannt.

3.2 Physikalische Einführung

Das Konzept des Fusionsreaktors ist bisher sicherlich der futuristischste Ansatz, die Abhängigkeit von herkömmlichen Energiequellen zu reduzieren: Es wird versucht, durch die kontrollierte Fusion von Wasserstoff-Atomkernen einen Teil der ihnen innewohnenden Kernbindungsenergie freizusetzen und zu nutzen. Die Kernspaltung stellt die Umkehrung der Kernfusion dar. Trotzdem wird auch bei ihr Bindungsenergie frei. In Abb. 12 wird der Zusammenhang deutlich: Der Quotient B/A bezeichnet die Energie, die pro Nukleon des jeweiligen Atomkerns nötig wäre, um alle Nukleonen des Kerns unendlich weit voneinander zu entfernen. Es fällt nun auf, dass die Bindungsenergie nicht stetig steigt oder sinkt, sondern bei ${}^{56}\text{Fe}$ ein Minimum erreicht, um dann wieder zu steigen. Sowohl die Reaktionsprodukte der Kernspaltung (${}^{235}\text{U}$), als auch der Kernfusion

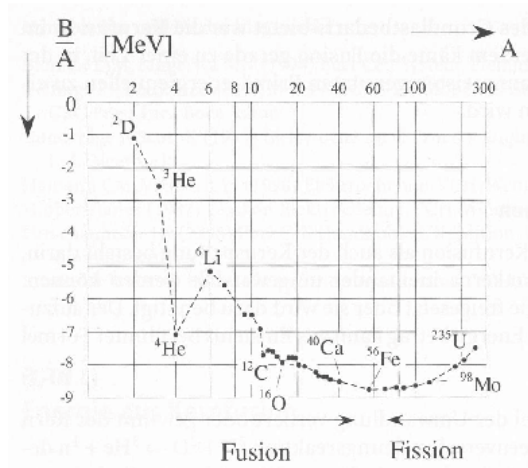


Abbildung 12: Bindungsenergien, nach Nukleonenzahl geordnet

(${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$) sind also energiereicher als die Produkte (z.B. ${}^{143}\text{Pm}$ u. ${}^{89}\text{Y}$, bzw. ${}^4\text{He}$), weshalb beide Reaktionen exotherm ablaufen. Wie in der Sonne werden beim Prozess der Kernfusion unter extremen Bedingungen jeweils zwei Atomkerne zu einem einzelnen, größeren Kern vereinigt. Für die Energiegewinnung kommen mehrere Reaktionen infrage, jedoch stellen meist Wasserstoffisotope das Ausgangsmaterial dar, da Reaktionen mit anderen Elementen bei den auf der Erde erreichbaren Temperaturen zu ineffektiv ablaufen. Nachfolgende Tabelle erläutert die drei existierenden Isotope (Hammer 2005, S. 94; Wikipedia: Tritium):

Name	chem. Symbol	Aufbau	Atomgewicht
Protium	${}^1\text{H}$ / H	1 Proton	1,007825 u
Deuterium	${}^2\text{H}$ / D	1 Proton, 1 Neutron	2,014102 u
Tritium	${}^3\text{H}$ / T	1 Proton, 2 Neutronen	3,01605 u

Die Fusion von Deuterium- und Tritiumkernen ist am besten für den praktischen Einsatz geeignet (vgl. hierzu auch Abb. 15)

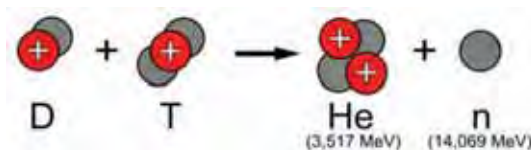
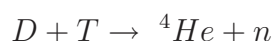


Abbildung 13: Die Deuterium-Tritium-Fusionsreaktion



Berechnet man nun für die Edukte und Produkte dieser Reaktion jeweils die Masse, ergibt sich eine Überraschung:

$$\Delta m = m_{\text{prod}} - m_{\text{ed}} = m_a(D) + m_a(T) - (m_a({}^4\text{He}) + m_a(n)) = \dots = -0,01888 \text{ u}$$

Es ist eine *Verringerung der Masse* festzustellen. Dies kann nur durch den sogenannten Massendefekt erklärt werden. Der speziellen Relativitätstheorie

von A. Einstein zufolge sind Masse und Energie nach der berühmten Formel $E = mc^2$ äquivalent. Es lässt sich also die pro Reaktion freiwerdende Energie berechnen:

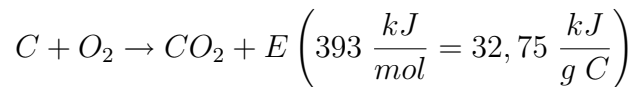
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = -0,01888u \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1})^2 = -2,82 \cdot 10^{-12} \text{J} = -17,586 \text{MeV}$$

Verringert sich also die Masse der Reaktionspartner, geht ein Teil der ihnen innewohnende Kernbindungsenergie verloren. Die hier wirkende Kraft ist die starke Wechselwirkung, die stets anziehend wirkt und somit der abstoßenden elektrostatischen Kraft der Protonen entgegenwirkt. Nach dem Energieerhaltungssatz kann Energie nicht vernichtet werden. Der Verlust an Bindungsenergie muss also kompensiert werden. Bei der D-T-Fusion wird kinetische Energie freigesetzt, die sich zu etwa vier Fünfteln (14,069 MeV) auf das entstehende Neutron und zu einem Fünftel auf den Heliumkern (3,517 MeV) verteilt (Raeder 1981, S. 12). Diese Energie soll dann in der Praxis eine Wärmekraftmaschine betreiben und so Strom erzeugen. Folgend ein Beispiel für die Effizienz der D-T-Fusionsreaktion: Bei ihr werden ein Deuterium- und ein Tritiumkern „verbraucht“, um 17,586 MeV freizusetzen.

Daher gilt:

$$\frac{\Delta E}{\Delta m} = \frac{17,586 \text{MeV}}{5,030u} = 337,3 \frac{\text{GJ}}{\text{g}}$$

Zum Vergleich die (chemische) Formel zur Verbrennung von Kohlenstoff:



Es liegen also etwa sieben Zehnerpotenzen zwischen der Effizienz der Deuterium-Tritium-Kernfusion und der Verbrennung von (reinem) Kohlenstoff.

3.3 Bedingungen für die Deuterium-Tritium-Fusion

3.3.1 Die Überwindung der Abstoßung

Die Fusion zweier leichter Atomkerne setzt also eine große Menge an Energie frei. Das Ziel eines zukünftigen Reaktors soll es daher sein, Atomkerne miteinander zu verschmelzen. Das grundsätzliche Problem besteht jedoch darin, dass Atomkerne positiv geladen sind und sich daher abstoßen. Dieses elektrostatische Potential zwischen zwei Atomkernen wird „Coulombwall“ genannt. Je näher sich die Atomkerne kommen, desto größer wird die abstoßende Kraft. Sie berechnet sich nach dem Gesetz von Coulomb bekanntlich zu:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Unterschreitet der Abstand zweier Kerne jedoch einen bestimmten Wert, bei Wasserstoff etwa 2,5 fm, beginnt die – stets *anziehend* wirkende – starke Kernkraft, die die Nukleonen im Atomkern zusammenhält, zu überwiegen (Rebhan 2002, S. 513). Kann sich also ein Deuteriumkern einem Tritiumkern auf 2,5 fm annähern, fusionieren beide miteinander. Unter „normalen“ Bedingungen tritt dies jedoch fast nie auf, weshalb künstliche Bedingungen geschaffen werden

müssen, unter welchen die Reaktionsrate (siehe auch 3.3.3) hoch genug ist. Der bisher erfolgreichste Ansatz ist die Erhöhung der Temperatur des Gasgemisches, sodass die Teilchen mithilfe der erworbenen kinetischen Energie den Coulombwall überwinden können. Ein auf diesem Prinzip aufbauender Reaktor wird „thermonuklearer Kernfusionsreaktor“ genannt. Bei den Temperaturen, ab welchen Fusionsreaktionen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ablaufen (mehrere hundert Millionen K), liegt der Wasserstoff als Plasma vor, also als eine Art Gas, in dem die Elektronen von den Atomkernen getrennt wurden, weshalb es nach außen nicht neutral ist. Es lässt sich also von elektrischen und magnetischen Feldern beeinflussen, was im thermonuklearen Reaktor auf mehrere Weisen ausgenutzt wird.

3.3.2 Der Tunneleffekt

Sowohl in der Sonne, als auch im Kernreaktor wird die Reaktionswahrscheinlichkeit zusätzlich durch diesen quantenmechanischen Effekt erhöht. In der Quantenphysik wird der Zustand eines Teilchens nicht durch eine definitive Position und Geschwindigkeit ausgedrückt, sondern mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten angegeben. Die sogenannte Schrödinger-Gleichung beschreibt Quantensysteme daher mithilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Für den Fall zweier Atomkerne existiert eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass diese miteinander fusionieren, obwohl sie dazu eigentlich noch zu weit voneinander entfernt sind. Die Potentialbarriere der elektrischen Felder wird sozusagen „durchtunnelt“ (Raeder 1981). Abb. 14 zeigt ein Potentialdiagramm und die zwei Möglichkeiten der Überwindung der elektrostatischen Barriere durch den Atomkern. Man sieht, dass der Kern vor und nach der Durchtunnelung den

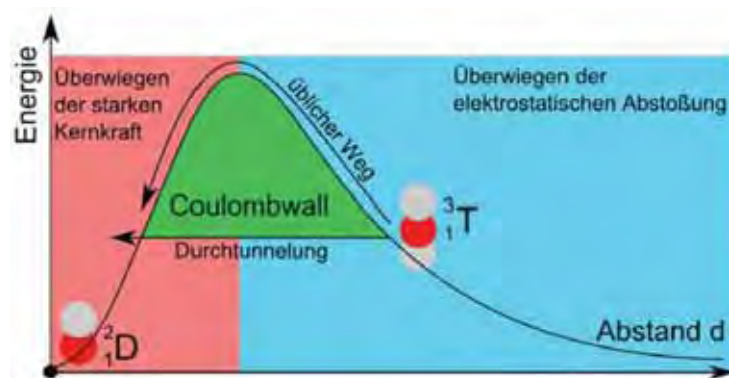


Abbildung 14: Die Coulombbarriere

gleichen potentiellen Energiebetrag besitzt. Dies muss aufgrund des Energieerhaltungssatzes gelten.

3.3.3 Die Kernreaktionsrate

Die pro D-T-Fusionsreaktion freiwerdende Energie von 17,6 MeV ist zwar beeindruckend, nützt in der Praxis der Energieumwandlung jedoch nur, wenn pro Zeiteinheit ausreichend viele Deuterium- und Tritiumkerne miteinander

verschmelzen, und damit die Gesamtfusionsleistung ausreichend groß ist. Diese Ableitung wird Reaktionsrate R genannt und berechnet sich wie folgt (Rebhan 2002, S. 516f.):

$$R = \frac{dn_i}{dt} = -\sigma n_i n_j v_r$$

Hierbei bezeichnet n_i die Teilchendichte des ersten Reaktionspartners (hier z.B. Deuterium), n_j die des zweiten (Tritium), v_r die Bewegungsgeschwindigkeit der Teilchen (diese wird als für alle Teilchen gleich angenommen) und σ den im Folgenden erläuterten Wirkungsquerschnitt.

Der Fusionswirkungsquerschnitt

Er ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Deuteriumkern auf einen Tritiumkern trifft und somit eine Fusion stattfindet. Der Wirkungsquerschnitt hat die Einheit m^2 und ist daher, anschaulich gesprochen, eine Fläche, die die Reichweite der Wechselwirkungen der Teilchen miteinander beschreibt: Durchquert ein Teilchen diese Fläche, die sich „um“ ein anderes Teilchen befindet, fusionieren die beiden Kerne. Dementsprechend bedeutet ein höherer Wirkungsquerschnitt σ eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass zwei Kerne fusionieren.

Hierin liegt auch der Grund, weshalb seltene Wasserstoffisotope anstatt Protonen und Neutronen zur Reaktion genutzt werden. Der Heliumkern als Produkt ist gewünscht, da er sehr stabil ist, also wenig Bindungsenergie besitzt (vgl. Abb. 12). Nun ist es aber sehr unwahrscheinlich, dass sich vier Teilchen gleichzeitig zur Fusion treffen, der Wirkungsquerschnitt für diese Reaktion ist also zu gering. Der Wert ist nicht konstant, sondern ist von der Geschwindigkeit der Teilchen abhängig. Allerdings bewegen sich Teilchen einer Temperatur nicht mit einer einzigen bestimmten Geschwindigkeit, sondern sie nehmen eine statistische Häufigkeitsverteilung, die sogenannte Maxwell-Boltzmann-Verteilung an, die von der Temperatur des Teilchengemisches abhängig ist.

Um diese Tatsache in der Rechnung zu berücksichtigen, wird der – geschwindigkeitsabhängige – Wirkungsquerschnitt über alle Teilchengeschwindigkeiten gemittelt. Dies wird folgendermaßen formuliert (Rebhan 2002, S. 518):

$$\frac{1}{i} \sum_i v_{r,i} \sigma_i = \langle v_r \sigma \rangle$$

Damit berechnet sich die Reaktionsrate R zu (siehe auch oben):

$$R = \frac{dn_i}{dt} = n_i n_j \langle v_r \sigma \rangle$$

Die Fusionsleistung ist direkt proportional zur Reaktionsrate:

$$P_\alpha = \frac{dE}{dt} = \frac{d(n_i \cdot E_\alpha)}{dt} = \frac{dn_i}{dt} \cdot E_\alpha$$

E_α ist die pro Reaktion freiwerdende Energie (bei der D-T-Reaktion 17,6 MeV, vgl. 3.2). Die Reaktionsrate ist abhängig von der Temperatur des Plasmas und erreicht für einen Wert T_M ein Maximum. Da die Werte reaktionsabhängig sind, ergeben sich verschiedene optimale Reaktionstemperaturen. Für die D-T-Reaktion liegt die spezifische Leistung, wie in Abb. 15 erkennbar, am höchsten, weshalb sie in allen bisherigen Fusionsexperimenten verwendet wird.

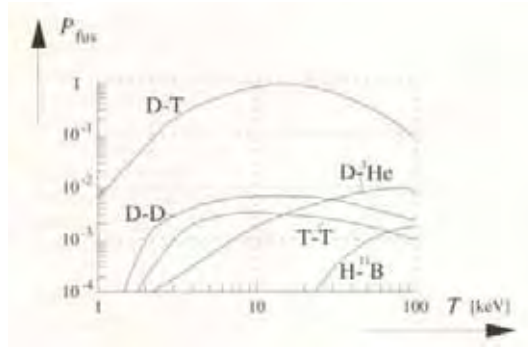


Abbildung 15: Relative Leistung verschiedener Fusionsreaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur

3.3.4 Die Alphateilchen-induzierte Plasmazündung

Von den 17,6 MeV, die bei der Kernfusion freiwerden, entfallen 3,5 MeV, also ein Fünftel, auf die kinetische Energie des entstehenden Heliumkerns (auch Alphateilchen genannt), der Rest auf die des Neutrons. Letzteres wechselwirkt jedoch kaum mit dem Plasma und wird erst außerhalb im sogenannten „Blanket“ abgebremst. Er besitzt zunächst mehr Energie als die ihn umgebenden Teilchen, gibt allerdings so lange Energie ab – und beheizt so das Plasma – bis sich ein Energiegleichgewicht mit der Umgebung eingestellt hat. Im Idealfall verliert das Plasma keine thermische Energie, sondern erwärmt sich durch die Alphateilchenheizung immer weiter. In der Praxis jedoch treten im Reaktor an vielen Stellen Verluste auf, die einer Kompensation durch Energiezufuhr bedürfen. Beispielsweise geht Energie durch elektromagnetische Strahlung, Teilchendiffusion (das Abdriften von Teilchen aus dem Plasmastrom) und Wärmeleitung verloren. Wird pro Zeiteinheit ebenso viel Energie zugeführt, wie verlorengeht, bleibt die Temperatur im Reaktor konstant. Kann dieses Gleichgewicht allein durch die Alphateilchenheizung aufrechterhalten werden, ist das Plasma „gezündet“. Für die Energiebilanz im Plasma gilt (Rebhan 2002, S. 518):

$$\frac{dE}{dt} = P_{\alpha} + P_H - P_V$$

E ist die im Plasma enthaltene Energie, P_{α} die Leistung der Alphateilchenheizung, P_H die Leistung einer zusätzlichen, externen Heizung und P_V die Verlustleistung, d.h. also die Wärmeleistung, die der Reaktor an die Umwelt abgibt. Im Fall der Zündung gilt: $P_H = 0$; $P_{\alpha} \geq P_V$ und damit: $dE/dt = P_{\alpha} - P_V \geq 0$. Man sollte aber beachten, dass die Zündung keineswegs eine Bedingung für den kommerziellen Betrieb eines Fusionsreaktors darstellt (Rebhan 2002, S. 519): Solange der Energieverbrauch der externen Plasmabeheizung nicht die Energiegewinne durch die Fusion übersteigt, liegt letztlich immer noch ein Energieüberschuss vor.

Der Energieverstärkungsfaktor Q

Der Faktor Q ist der Quotient aus Fusions- und externer Heizleistung (Rebhan 2002, S. 519):

$$Q = P_{Fus}/P_H$$

Wird der Faktor $Q=1$, ist der sogenannte „Breakeven“ erreicht, also das Gleichgewicht von Heiz- und Fusionsleistung. Das Erreichen dieses Punktes ist – anders als die Zündung – eine grundsätzliche Bedingung für die kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie, da erst ab diesem Wert überschüssige Energie frei wird. Das Diagramm zeigt einige bisherige Fusionsexperimente und deren erreichte Energieverstärkungsfaktoren Q . Die Bezeichnung F für die Abszisse bezeichnet das Fusionsprodukt, das im nächsten Abschnitt erklärt wird. Für die Zündung gilt: $P_H = 0$, $Q = \infty$ (vgl. Abb. 16)

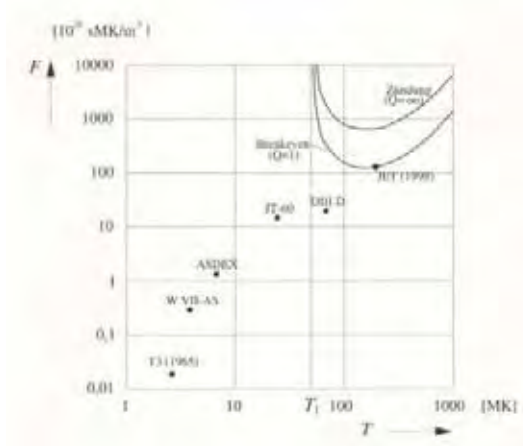


Abbildung 16: Der Faktor Q in Relation zum Fusionsprodukt

Das Lawson-Kriterium

Diese Formel wurde von J.D. Lawson 1955 aufgestellt und besagt, dass für die Zündung des Plasmas das Produkt aus Teilchendichte, Einschlusszeit und Temperatur (auch „Fusionsprodukt“ genannt) über einem bestimmten Wert liegen muss (vgl. J.D. Lawson: Some Criteria for a Useful Thermonuclear Reactor, 1955):

$$\frac{n}{V} \cdot \tau_e \cdot T > \frac{12kT^2}{\langle v_r \sigma \rangle E_\alpha}$$

k ist die sogenannte Boltzmann-Konstante und $\langle v_r \sigma \rangle$ die in 3.3.3 erläuterte Reaktionsrate.

Die Einschlusszeit τ_e gibt an, wie lange es dauert, bis die gesamte Energie des Plasmas durch Verluste verloren gegangen ist. Die Gesamtenergie wird also durch die Verlustleistung geteilt: $\tau_e = E/P_V$. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, dieses Kriterium zu erfüllen – zurzeit werden zwei Ansätze näher erforscht: Der magnetische Einschluss und der Trägheitseinschluss. Dies soll anhand einer Tabelle erläutert werden (Pelte 2002):

	Teilchendichte $n/V [m^{-3}]$	Einschlusszeit $\tau_e [s]$	Temperatur $T [K]$
Trägheitseinschluss	10^{30}	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^8$
Magnetischer Einschluss	10^{20}	3	$2 \cdot 10^8$

Der Term auf der rechten Seite der o.g. Gleichung ergibt für die D-T-Fusionsreaktion bei $T = 2 \cdot 10^8 K$ etwa $6 \cdot 10^{28} Ksm^{-3}$ und wird bei den Daten in der Tabelle erreicht.

Beim Trägheitseinschluss wird ein gänzlich anderes Verfahren angewandt als beim magnetischen Einschluss (Näheres siehe 3.6.1). Allerdings zeichnet sich seit einiger Zeit ab, dass der magnetische Einschluss besser für die kommerzielle Energiegewinnung geeignet ist, weshalb dort auch die größten Forschungstätigkeiten stattfinden.

3.4 Der Brennstoffkreislauf

3.4.1 Deuterium und Tritium

Das erste Problem, das bei der technischen Umsetzung zu lösen ist, ist die Gewinnung der Ausgangsstoffe für die Kernreaktion, also Deuterium und Tritium. Deuterium kann verhältnismäßig einfach angereichert werden, da es in der Natur in Form von halbschwerem und schwerem Wasser vorkommt. Moleküle halbschweren Wassers bestehen aus jeweils einem Deuterium-, Protium- und Sauerstoffatom. Da für Deuterium statt der korrekten Formel 2H oft auch einfach „D“ geschrieben wird, lautet die Formel für halbschweres Wasser HDO. Es kommt in der Natur zwar selten – etwa im Verhältnis 1:7000 zu gewöhnlichen Wassermolekülen – vor, wird aber vermutlich die Hauptquelle des benötigten Deuteriums darstellen.

Die Anreicherung des schweren und halbschweren Wassers ist mit dem sogenannten „Girdler-Sulfid-Prozess“ möglich: in diesem chemischen Verfahren wird mithilfe von Schwefelwasserstoff die Konzentration des (halb-)schweren Wassers auf etwa 15-20 % erhöht (Wikipedia: Girdler sulfide process). Höhere Konzentrationen sind durch Vakuumdestillation erreichbar (da normales und schweres Wasser unterschiedliche Siedetemperaturen besitzen). Die Gewinnung des Deuteriums aus dem nun angereicherten Wasser kann dann durch einfache Elektrolyse bewerkstelligt werden.

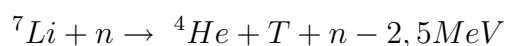
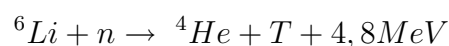
Tritium hingegen kommt aufgrund seiner Radioaktivität und der geringen Halbwertszeit von 12,32 Jahren (Wikipedia: Tritium) in der Natur noch seltener vor als Deuterium, weshalb es künstlich hergestellt werden muss. Hier bietet sich die Erbrütung aus Lithium im sogenannten „Blanket“ des Kernreaktors an.

3.4.2 Das Blanket

Beim Blanket (engl. für „Decke“) handelt es sich um einen die Brennkammer umschließenden Behälter, der vor allem mit Lithium gefüllt ist.

Tritiumerbrütung

Die bei der Fusion des Wasserstoffs freiwerdenden Neutronen werden im Blanket dazu verwendet, Tritium aus Lithium herzustellen. Dieser Vorgang nennt sich „Erbrütung“ und funktioniert sowohl mit Lithium-6, als auch Lithium-7 (Rebhan 2002, S. 521):



Die Reaktion mit Lithium-6 funktioniert am besten mit langsamen Neutronen und setzt zusätzlich Energie frei, die Reaktion mit dem (weit häufigeren) Lithium-7 benötigt zwar Energie, setzt neben Tritium aber auch ein weiteres Neutron frei. Bei der Verwendung eines Gemischs aus Lithium-6 und -7 könnte theoretisch die gesamte Menge an benötigtem Tritium erbrütet werden. Je nach Bauweise des Blankets wird der Anteil von Lithium-6 (der natürlicherweise bei etwa 7 % liegt) auf 30 bis 90 % angereichert (Bahm 2006, S. 29). Allerdings kann alleine mit Lithium der Kernfusionsprozess praktisch nicht beibehalten werden, da aufgrund von Verlusten bei der Fusion pro umgesetzten Tritiumkern im Schnitt weniger als ein Neutron entsteht. Daher würde sich bei dieser Methode die verfügbare Tritiummenge stetig verringern und die Reaktion schließlich abbrechen. Daher muss dem Lithium ein weiterer Stoff, wie beispielsweise Beryllium als „Neutronenmultiplikator“ beigemischt werden, der zwar kein Tritium erbrütet, aber die Zahl der freien Neutronen erhöht. Das entstehende Tritium wird mithilfe von Helium abtransportiert, mit Deuterium vermischt und schließlich in die Brennkammer eingeleitet. Bisher wurden zwei Blanket-Bauweisen entwickelt, die festes oder flüssiges Lithium enthalten. Beide arbeiten mit einer Heliumkühlung (Bahm 2006, S. 118 ff.).

Energiegewinnung

Der Hauptzweck des Blankets ist jedoch die Tatsache, dass das Lithium die bei der Fusion freiwerdenden schnellen Neutronen absorbiert, während diese das Plasma und die Gefäßwand nahezu ungehindert durchdringen. Ihre kinetische Energie macht rund 80 % der gesamten freiwerdenden Energie aus. Die anderen 20 % entfallen auf die entstehenden Alphateilchen, die in den Divertor geleitet werden (siehe 3.4.3). Durch die Kollision der Neutronen mit den Atomen des Blanketmaterials wird dieses erhitzt. Die freiwerdende Hitze wird dann mit einem Wärmetauscher über einen Heliumkreislauf auf einen Dampf-Wasser-Kreislauf übertragen und mit einer konventionellen Dampfturbine in elektrische Energie umgewandelt. Der blau markierte Bereich in Bild 17 zeigt den Blanketkreislauf.

3.4.3 Der Divertor

Da die Heliumkerne nach ihrer Entstehung zunächst noch heißer sind als das umgebende Plasma, geben sie ihre überschüssige Energie durch Stöße ab und müssen dann, ebenso wie Fremdatome (etwa aus der Gefäßwand) und nicht fusionierter Wasserstoff so schnell wie möglich aus der Kammer entfernt werden. Dies ist die Aufgabe des Divertors. Er besteht aus sogenannten „Prallplatten“ und einem Absaugsystem. Durch Diffusionsbewegungen im Plasma wird die „Asche“ zum Plasmarand transportiert und trifft dort schließlich auf die Prallplatten. Hier verlieren die Teilchen auf einen Schlag ihre gesamte kinetische Energie, wodurch die Prallplatten stark belastet werden. Da auf diese Weise immerhin 15-20 % der gesamten Strahlungsleistung in den Divertor gelangen, wird hier ein separates (Helium-)Kühlsystem verwendet. Die nun abgebremsten Teilchen werden schließlich aufgesaugt; Helium- und Fremdatome werden abgetrennt, der unverbrannte Wasserstoff erneut in die Brennkammer geleitet. Der gelbe Bereich im obigen Bild bezeichnet diesen Kreislauf. Die Prallplatten

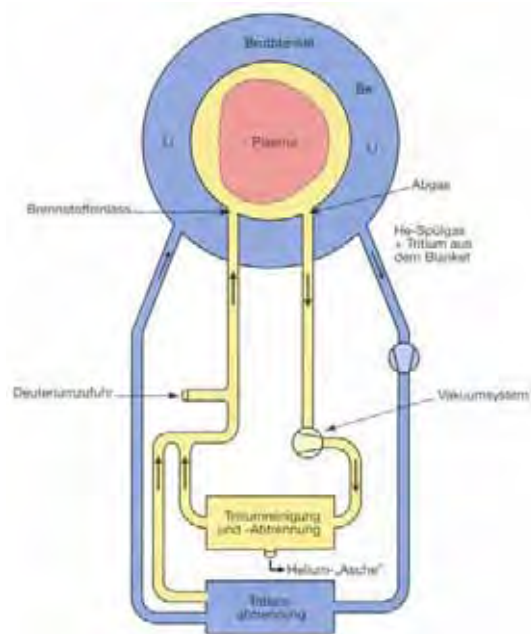


Abbildung 17: Der Materialkreislauf im Fusionsreaktor

sind sehr stark belastete Bauteile und werden deshalb mit hitzefesten Wolfram-Legierungen beschichtet, die regelmäßig erneuert werden müssen (Bahm 2006, S. 31)

3.5 Methoden der Plasmaheizung

Der zentrale Schritt beim Fusionsprozess ist die Erhitzung des Wasserstoffgemisches auf die Betriebstemperatur, die bei der Deuterium-Tritium-Reaktion idealerweise bei 100-200 Millionen K liegen sollte (Rebhan 2002, S. 528). Aktuell wird an drei Arten der Plasmaheizung gearbeitet, deren Funktion hier kurz erläutert werden soll. Abb. 18 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Heizmethoden.

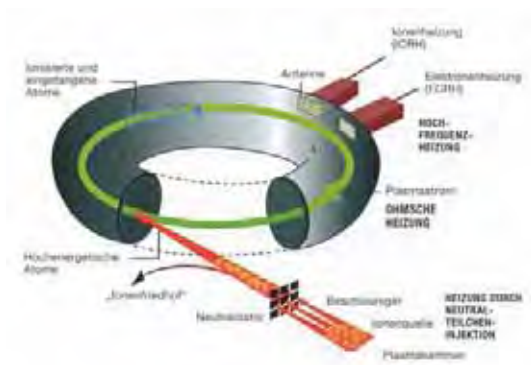


Abbildung 18: Übersicht über die Arten der Plasmaheizung

Die Stromheizung

Die Stromheizung funktioniert nach dem Prinzip des Transformators und wird

nur im Tokamak eingesetzt (siehe 3.6.3). An sogenannte Induktions- oder Transformatorspulen, die koaxial zum Torus der Tokamak-Brennkammer ausgerichtet sind (und sich üblicherweise im „Mittelloch“ des Torus befinden), wird Wechselstrom angelegt und so ein Strom im Plasma, das als Sekundärspule (mit einer „Wicklung“) betrachtet werden kann, induziert. Da das Plasma einen ohmschen Widerstand besitzt, bewirkt dieser Strom eine Erhitzung des Plasmas. Sie lässt sich gut für die Anfangsphase in der Aufheizung einsetzen, jedoch lassen sich mit ihr nur Temperaturen von etwa 10 Millionen K erreichen (Rebhan 2002, S. 527), da höhere Ströme im Plasma Instabilitäten bewirken können. Zudem sinkt der ohmsche Widerstand mit steigender Temperatur und verschwindet bei ca. 15 Millionen K völlig (Bahm 2006, S. 19). Neben der Aufheizung bewirkt der toroidale Plasmastrom ein zusätzliches Magnetfeld in poloidaler Richtung (s. a. Bild 19), was den magnetischen Einschluss vervollständigt.

Der Plasmastrom benötigt, um nicht zusammenzubrechen, eine stetig ansteigende Magnetfeldstärke, was nur für kurze Zeit (im Sekunden- bis Minutenbereich) möglich ist. Danach bricht die Reaktion ab. Ein Reaktor mit reiner Stromheizung kann also nur „gepulst“ betrieben werden. Da moderne Tokamaks jedoch mehrere Heizquellen nutzen, ist dieses Problem inzwischen von geringerer Bedeutung.

Die Hochfrequenzheizung

Hier wird das Plasma durch Bestrahlung mit elektromagnetischen Wellen mit Frequenzen von 20 MHz (Energieübertragung an Ionen) bis 170 GHz (Energieübertragung an Elektronen) erhitzt. Zwar kann sich der Sender auch in größerer Entfernung zum Reaktionsgefäß befinden, die Antenne jedoch muss insbesondere für geringere Frequenzen sehr genau auf den aktuellen Plasmazustand abgestimmt werden (Bahm 2006, S.21).

Die Neutralteilchenheizung

In der Neutralteilchenheizung werden Deuteriumatome mithilfe einer Ionenquelle und eines „Neutralisators“ mit hoher kinetischer Energie in das Plasma geschossen, wo sie ihre kinetische Energie durch Stöße abgeben und so die Temperatur erhöhen (Rebhan 2002, S. 529). Üblicherweise werden negative Ionen verwendet, die ihre Ladung dann am Neutralisator abgeben. Da selbst bei hohen Einstrahlraten die Plasmastabilität nicht gefährdet wird und der Wirkungsgrad selbst bei Ionenenergien von 200 KeV (1,5 Milliarden K) noch 60 % beträgt, können mit dieser Methode sehr hohe Temperaturen erreicht werden (Bahm 2006, S.20). Die Schwierigkeit der Plasmaheizung ist also prinzipiell überwunden.

3.6 Der Plasmaeinschluss

Beim Bau eines Fusionsreaktors stellt sich immer die Frage des Einschlusses. Mit anderen Worten: Was hält die hoch erhitzten Teilchen davon ab, einfach auseinanderzufliegen und abzukühlen, anstatt sich anzunähern und zu fusionieren? Beim natürlichen Beispiel der Sonne ist ihre gewaltige Gravitation die einschließende Kraft. Da dies auf der Erde so nicht machbar ist, müssen andere

Mittel gewählt werden.

3.6.1 Der Trägheitseinschluss

Eine Methode ist der sogenannte Trägheitseinschluss: hier wird eine Kapsel aus gefrorenem Deuterium und Tritium – zum Beispiel mit einem sehr starken Laser – erhitzt, wodurch die äußere Schicht verdampft, und ihr Inneres zusammenpresst, weshalb dort die Bedingungen des Lawson-Kriteriums erreicht werden, da die Einschlusszeit zwar niedrig, die Teilchendichte aber sehr hoch ist (Rebhan 2002, S. 536 ff.). Natürlich muss dies in einem sehr kurzen Zeitraum stattfinden. Allerdings finden zur Zeit die Hauptforschungstätigkeiten eher im Gebiet des magnetischen Einschlusses statt, in dem bisher auch die größeren Fortschritte zu verzeichnen waren.

Der magnetische Einschluss

Beim magnetischen Einschluss wird der Einfluss von Magnetfeldern auf das elektrisch geladene Plasma (Lorentzkraft) genutzt. Üblicherweise werden supraleitende Spulen verwendet, die das Plasma in einem Behälter mit niedrigem Druck auf regelmäßige Bahnen zwingen. Die Hauptentwicklungswege dieser Entwicklungsrichtung sind der Stellarator und der Tokamak. Die Richtungsangaben im Torus werden in Abb. 19 erklärt.

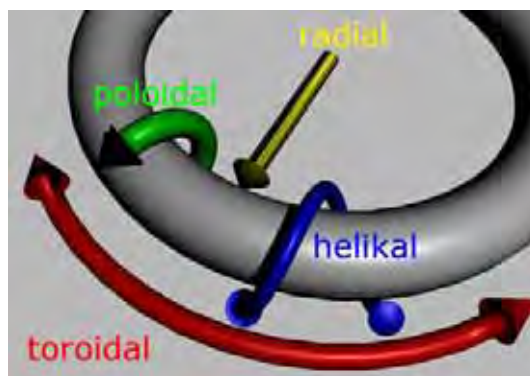


Abbildung 19: Richtungsangaben im Torus

3.6.2 Der Stellarator

Das Konzept des Stellarators (stella = lat. „Stern“, als Anspielung auf Fusionsprozesse in Sternen) wurde in den fünfziger Jahren von L. Spitzer entwickelt. Der Unterschied des Stellarators zum Tokamak besteht darin, dass für das gesamte System nur *eine* Spulenkonstruktion verwendet wird. Ein Vorteil davon ist, dass die Fusion nicht im Pulsbetrieb laufen muss, sondern dauerhaft betrieben werden kann. Eine große Schwierigkeit stellt jedoch die Berechnung der – im Vergleich zum Tokamak – äußerst komplizierten Spulenform dar. Die Spule besteht aus einer bestimmten Anzahl baugleicher Teilspulen (im Bild fünf) und ist so gebaut, dass sie ein helikales Magnetfeld aufbaut, d.h. ein Magnetfeld, das gewissermaßen „in sich verdrillt“ ist. Eine Stromheizung ist im Stellarator daher nicht möglich, Mikrowellenheizung und Neutralteilcheninjektion dagegen

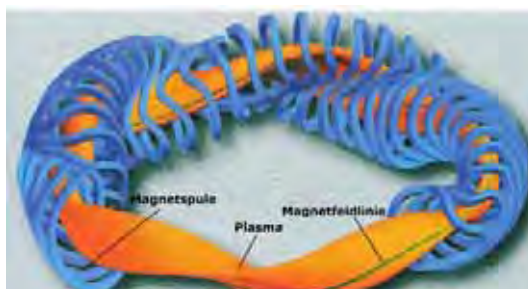


Abbildung 20: Die Spulenkonstruktion des Stellarators

schon. Der Vorteil davon ist jedoch, dass der Stellarator unterbrechungsfrei betrieben werden kann (siehe 3.5). Trotz der eigentlich höheren Komplexität wird in (Bahm 2006, S. 13) spekuliert, dass Stellaratoren aufgrund der größeren Gestaltungsfreiheiten „[für] ein Fusionskraftwerk (...) eventuell eine technisch einfachere Lösung (...) als Tokamaks [darstellen könnten]“ (Bahm 2006, S. 15). Nichtsdestotrotz bedarf der Stellarator sogar noch mehr Forschungstätigkeit als das konkurrierende Prinzip des Tokamaks. Das inzwischen beendete Fusionsexperiment Wendelstein-AS, das vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München durchgeführt wurde, arbeitete nach dem Prinzip des Stellarators. Zudem ist bereits ein Nachfolgeexperiment, Wendelstein-7X, geplant, das in Greifswald 2014 in Betrieb gehen soll (Bahm 2006, S. 15).

3.6.3 Der Tokamak

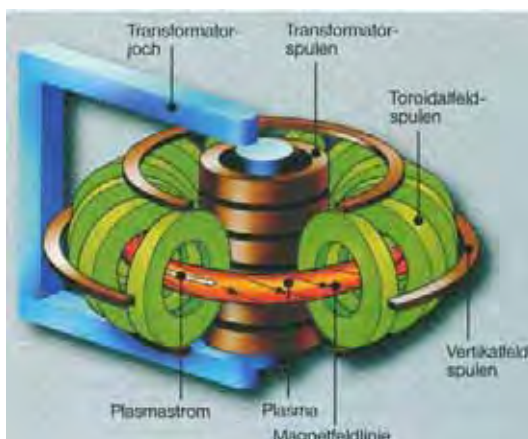


Abbildung 21: Das Tokamak-Spulensystem

Der Tokamak stellt ebenfalls ein Konzept auf der Basis des magnetischen Einschlusses für die Realisierung der Fusionsenergiegewinnung dar. Er wurde in der Sowjetunion der 50er und 60er Jahre von I.E. Tamm, A.D. Sacharow und L.A. Artsimowitsch entwickelt (Rebhan 2002, S. 524). Heute scheint der Tokamak den aussichtsreichsten Kandidaten für die großtechnische Realisierung des Fusionskraftwerks darzustellen. Das Kernstück dieser Konstruktion stellt eine torusförmige Brennkammer dar, die von poloidalen und toroidalen (üblicherweise supraleitenden) Spulen umgeben ist.

Die poloidalen Spulen generieren ein toroidales Magnetfeld – das sogenannte Hauptfeld – innerhalb der Brennkammer. Dazu kommt ein poloidales Feld, das wiederum durch toroidale Spulen – unter anderem die Transformatorspulen – aufrechterhalten wird. Das Resultat ist ein homogenes, helikales Magnetfeld. Treten geladene (Plasma-)Teilchen in dieses Feld ein, werden sie auf Spiralbahnen in Torusrichtung gezwungen und so von der Kammerwand ferngehalten. Beispiele für das Prinzip des Tokamak stellen beispielsweise das JET-Experiment in Culham (Großbritannien) und das – noch im Aufbau befindliche – „ITER“-Reaktor in Cadarache (Frankreich) dar (siehe 3.7).

3.6.4 Schwächen des magnetischen Einschlusses

Das zurzeit größte Problem bei der technischen Umsetzung stellt der sogenannte Einschluss (engl. *confinement*) des Plasmas im Reaktionsbehälter dar. Es darf während des gesamten Fusionsprozesses nicht die Wände des Reaktionsgefäßes berühren, da es sonst einerseits sofort abkühlen würde, was die Reaktion unterbräche und andererseits Fremdatome (aus dem Gefäßmaterial) in die Reaktionskammer gelangen würden. Solange sich die Struktur des Magnetfelds während des Fusionsvorganges nicht verändert, ist dies ausgeschlossen. Allerdings wechselwirkt das Plasma mit dem Magnetfeld, wodurch sogenannte „Plasmainstabilitäten“ entstehen, bei welchen „eine anfangs geringe Störung eine Kraft hervorruft, die diese Störung verstärkt“ (Bahm 2006, S. 16). Ihre Entstehung lässt bisher sich nicht verhindern, weil kein Modell existiert, das das Verhalten von Plasmen akkurat beschreibt. Daher wird an der Entwicklung eines „globalen Plasma-Modells“ geforscht (Bahm 2006, S. 140).

Da der Druck in der Brennkammer eines Tokamaks umso niedriger sein muss, je größer diese ist, ist bereits abzusehen, dass Plasmainstabilitäten eine zentrale Schwierigkeit in ITER, dem bisher größten Fusionsexperiment, darstellen werden. Jedoch hat das IPP, das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, in internationaler Zusammenarbeit eine Methode entwickelt, die Instabilitäten (vor allem die gefürchteten „Tearing-Moden“) unter Kontrolle zu bekommen: Durch gezielte Bestrahlung mit Mikrowellen können die Instabilitäten stabilisiert oder gar aufgelöst werden (Bahm 2006, S. 68). Trotzdem sind damit noch lange nicht alle diesbezüglichen Schwierigkeiten beseitigt, da immer verschiedenste Varianten von Instabilitäten auftreten.

3.7 Das ITER-Experiment

Das Projekt ITER (lat.: „der Weg“, eig. Abk. f. „International Thermonuclear Experimental Reactor“), dessen Betrieb im französischen Cadarache etwa im Jahr 2015 beginnen soll, ist ein Fusionsexperiment, das den *vor*letzten Schritt auf dem Weg zum kommerziellen Fusionsreaktor darstellen soll. Es ist ein internationales Gemeinschaftsunternehmen der EU, den Vereinigten Staaten, Russland, Indien, China, Korea und Japan (Bahm 2006, S. 16).

Das Experiment basiert auf dem magnetischen Einschluss und dem Tokamak-System. Ursprünglich war ein Plasmavolumen von 2000 m^3 und eine Fusionsleistung von 1500 MW eingeplant, nachdem die Vereinigten Staaten 1998 jedoch zwischenzeitlich aus dem Programm ausstiegen, musste kleiner geplant

werden: Ein Volumen von 840 m^3 und eine Leistung von 500 MW musste in der neuen Planung ausreichen. Der in Abschnitt 3.3.4 erläuterte Energieverstärkungsfaktor Q sollte zudem nur noch etwa 10 erreichen, eine Zündung ($Q = \infty$) war nicht länger vorgesehen (Bahm 2006, S. 58f.).

Der Zweck von ITER ist hauptsächlich, zu zeigen, dass „ein für längere Zeit brennendes Plasma physikalisch und technisch realisierbar ist“ (Bahm 2006, S. 59). Zudem müssen die zentralen Komponenten eines zukünftigen Fusionsreaktors (Divertor, Blanket, Magnetspulen, etc.) weiterentwickelt werden, um schließlich eines Tages in einem Demonstrationsreaktor eingesetzt zu werden. ITER selbst wird also selbst noch kein Reaktor im eigentlichen Sinn werden, sondern ein Experiment bleiben.

Im Bildanhang werden am Beispiel von ITER die wichtigsten Komponenten eines Tokamaks gezeigt.

3.8 Zukunftsfähigkeit der Kernfusion

Man darf mit ziemlicher Sicherheit behaupten, dass die Kernfusion innerhalb der nächsten Jahrzehnte die Welt verändern wird, auch wenn sehr genaue Prognosen einfach nicht verlässlich sind. Trotzdem wird Energie aus Kernfusion wohl kaum weltweit verfügbar sein, und ihre Nutzung sich vielmehr auf einige wenige Standorte beschränken, weil der Bau eines Reaktors selbst nach Erreichen der Serienreife ein enorm teures und aufwändiges Unterfangen bleiben wird.

All dies basiert natürlich auf der Annahme, dass die zahlreichen Schwierigkeiten, vor welchen die Forscher bei der Umsetzung stehen, lösbar sind. Man darf jedoch zuversichtlich sein, dass dies der Fall ist, auch wenn es noch einige Zeit dauert: Das erste Fusionsexperiment, das tatsächlich Energie gewinnen wird, der Reaktor „DEMO“, soll erst um das Jahr 2035 seinen Betrieb aufnehmen. Bild 22 gibt einen Überblick über die geplanten Projekte in der Fusionsforschung. Man muss jedoch beachten, dass sich diese noch in der Planungsphase befinden und daher Änderungen unterliegen werden.

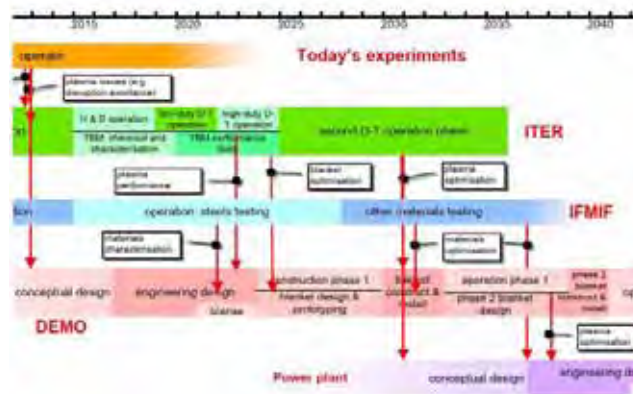


Abbildung 22: Die nächsten Schritte in der Forschung

4 Schlusssatz und Ausblick

Das Zeitalter der fossilen Energieressourcen, das seinen Beginn vor nicht einmal einem Jahrhundert genommen hat, scheint sich seinem Ende zuzuneigen. Dies ist vor allem auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Menge der verfügbaren Ressourcen stetig abnimmt und letztendlich nicht mehr ausreicht, um die jetzige Gesellschaft am Leben zu erhalten.

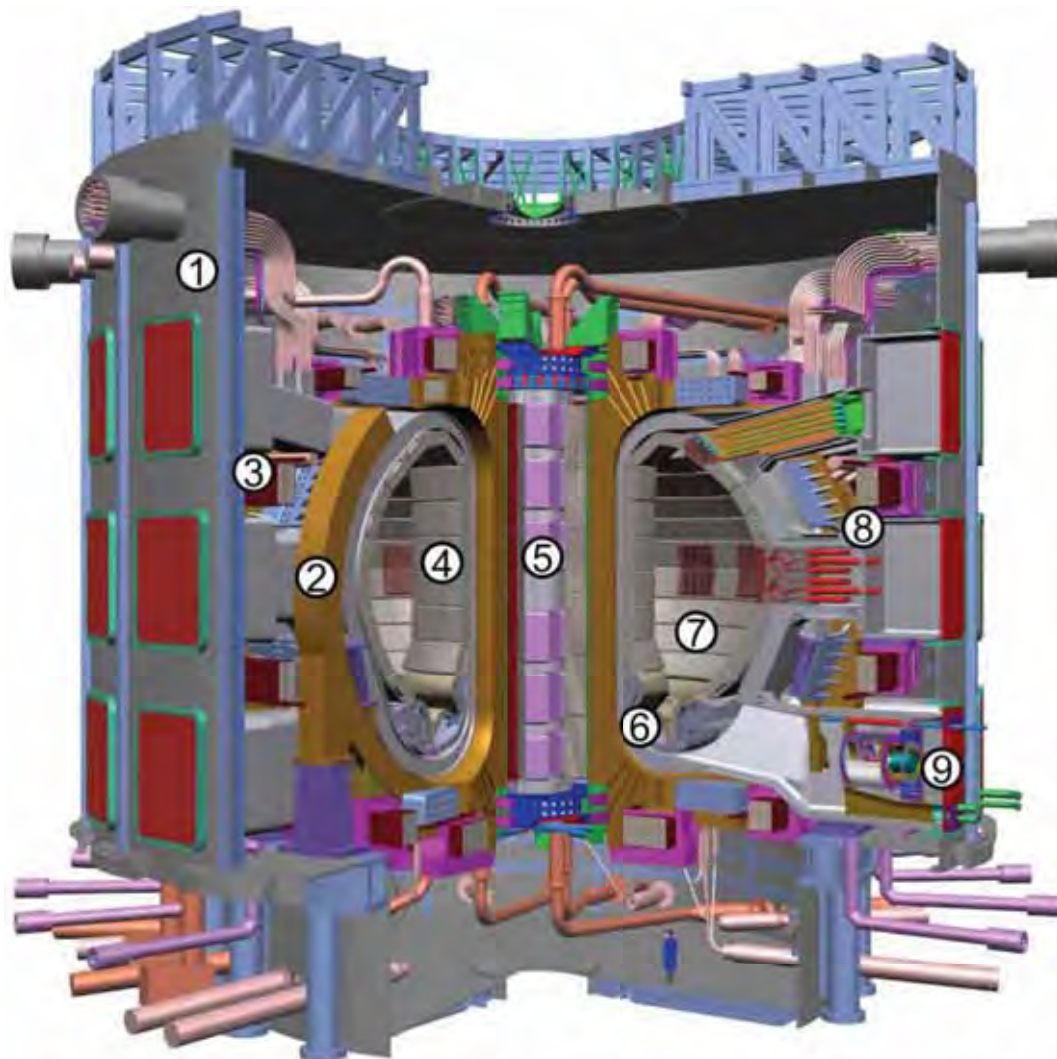
Den größten Einfluss auf das Weltgeschehen wird wohl eine länger andauernde Ölknappheit haben: Ohne Erdöl bricht letztlich das gesamte Transportwesen zusammen und damit nicht zuletzt der weltweite Handelsverkehr, sei es auf dem Wasser, der Straße oder in der Luft. Ohne diesen Außenhandel ist nahezu keine Volkswirtschaft überlebensfähig, am allerwenigsten der sogenannte „Exportweltmeister Deutschland“. Im drastischsten Falle könnte sich die Globalisierung gewissermaßen umkehren, da Transporte über größere Entfernungen zu einem unbezahlbaren Luxus verkämen. Wir würden auf den technischen (und vielleicht gar gesellschaftlichen) Stand des 19. Jahrhunderts zurückkehren, als Holz und Kohle verheizt wurden und Smogwolken den Himmel über den Städten verdüsterten.

Doch auf die Frage nach *transportablen* Energiespeichern als Ersatz zum Öl kann die vorliegende Arbeit keine definitive Lösung präsentieren. Die „Energiequellen der Zukunft“ sind zwar nahezu unerschöpflich, doch nicht sehr transportabel: Alle bisher bekannten Speicher für elektrische Energie (etwa Akkus und Batterien) sind so schwer, dass damit ausgerüstete Fahrzeuge keine große Reichweite besitzen.

Ein mögliches Bindeglied könnte hier die Wasserstoff-Speichertechnologie darstellen: Würde man die gewonnene elektrische Energie zur Herstellung von Wasserstoff aus Wasser nutzen, könnte dieser als „leichter“ Energiespeicher genutzt und beispielsweise in Fahrzeugen mit Brennstoffzellen verbraucht werden.

Derartige Antriebe könnten durchaus vergleichbare Leistungen wie die zahllos bewährten Otto- und Dieselmotoren erzielen, sofern ihre Erforschung in diese Richtung weitergeführt wird. Aufgrund der enormen Wichtigkeit eines leistungsfähigen Transportsystems für die Weltwirtschaft ist aber in den nächsten Jahren und Jahrzehnten durchaus mit diesbezüglichen Fortschritten zu rechnen.

5 Bildanhang: ITER im Querschnitt



- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| ① Kryostat (Kühlkörper) | ⑥ Divertorkassetten |
| ② Poloidalspulen | ⑦ Plasmagefäß |
| ③ Toroidalspulen | ⑧ Hochfrequenzheizung |
| ④ Blanketmodule | ⑨ Helium-Kühlpumpe |
| ⑤ Transformatorspulen | |

Literatur

EINZELVERÖFFENTLICHUNGEN / MONOGRAPHIEN:

Bahm, Werner / Milch, Isabella / Schorn, Ralph: Kernfusion in der Helmholtz-Gesellschaft Deutscher Forschungszentren. Offenbach 2006

Beuth, Klaus: Bauelemente (= Fachbuchgruppe „Elektronik“, Band 2). Würzburg ¹⁶2001

Göbel, Holger: Einführung in die Halbleiterschaltungstechnik. Berlin / Heidelberg ³2008

Knaupp, Werner / Staiß, Frithjof: Photovoltaik. Ein Leitfaden für Anwender. Köln ⁴2000

Raeder, Jürgen / Bünde, Rolf / Klingelhöfer, Rolf u. a.: Kontrollierte Kernfusion. Grundlagen ihrer Nutzung zur Energieversorgung. Stuttgart 1981

Rebhan, Eckhard (Hg.) / Werner, Jürgen H. / Pfisterer, Fritz u.a.: Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie. Mit 353 Abbildungen und 202 Tabellen. Berlin / Heidelberg 2002

Wagner, Hermann-Josef / Borsch, Peter: Energie und Umweltbelastung. Berlin / Heidelberg ²1998

Würfel, Peter: Physik der Solarzellen. Berlin / Heidelberg / Oxford ²2000

NACHSCHLAGEWERKE:

Hammer, Anton / Hammer, Hildegard / Hammer, Karl: Physikalische Formeln und Tabellen. München ⁸2005

ONLINE-DOKUMENTE:

Pelte, Dietrich: Zusammenfassung der Vorlesung „Die Zukunft unserer Energieversorgung. Physikalische Grundlagen und Folgerungen“. 2002. URL: <http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/start.htm> (Abgerufen: 01.10.08)

siehe Materialien Nr. 1 auf der CD-ROM

Seite „Tritium“. In: **Wikipedia, Die freie Enzyklopädie**. Stand: 01.11.08. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Tritium&oldid=52504380> (Abgerufen: 01.01.09)

siehe Materialien Nr. 2 auf der CD-ROM

Blum, Wolfgang: Geniestreiche (IX): Wie die Solarzelle zum Licht fand. In: Die Zeit Online, 1996. URL: <http://www.zeit.de/1996/20/solar.txt.19960510.xml> (Abgerufen: 16.01.09)

siehe Materialien Nr. 3 auf der CD-ROM

Institut für Physikalische Elektronik (IPE): Fachpraktikum Photovoltaik. Amorphes Silizium für Solarzellen. URL: <http://www.ipe.uni-stuttgart.de/content/pdf/Versuch4.pdf> (Abgerufen: 16.01.09)

siehe Materialien Nr. 4 auf der CD-ROM

Funktion einer Silizium-Solarzelle. In: **LEIFI – Rupprecht-Gymnasium**. Stand: 15.12.08. URL: http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph10/umwelt-technik/16solarzelle/funktion.htm (Abgerufen: 18. Januar 2009)

siehe Materialien Nr. 5 auf der CD-ROM

Seite „Girdler sulfide process“. In: **Wikipedia, The Free Encyclopedia**. Stand: 11.11.08. URL: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Girdler_sulfide_process&oldid=251083083 (Abgerufen: 03.02.09)

siehe Materialien Nr. 6 auf der CD-ROM

Bildnachweis (alle Abbildungen befinden sich auf der CD-ROM):

Titelbild: EFDA-JET. URL: <http://www.jet.efda.org/images/gallery3/insidevessel/large/CP93j-311.jpg> / Wikimedia Commons. URL: <http://commons.wikimedia.org/w/index.php?oldid=15753371> (bearbeitet)

Abb. 1-8, 10, 13, 14, 19: selbst erstellt

Abb. 9: Wikimedia Commons. URL: http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Solar_Spectrum.png&oldid=15146885 (bearbeitet)

Abb. 11: Wikimedia Commons. URL: http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Solar_land_area.png&oldid=16140796

Abb. 12: Rebhan 2002, S. 512

Abb. 15: Rebhan 2002, S. 528

Abb. 16: Rebhan 2002, S. 520

Abb. 17: Bahm 2006, S. 32

Abb. 18: Bahm 2006, S. 19

Abb. 20: Bahm 2006, S. 15

Abb. 21: Bahm 2006, S. 14

Abb. 22 und Bildanhang: Offizielle Internetpräsenz des ITER-Projekts. URL: <http://www.iter.org/pics/long-term2.jpg>; <http://www.iter.org/pics/iter8-high.jpg> (bearbeitet)

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den

Ort

Datum

.....
Fabio De Marco