

Energieumwandlung

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Energie-„Gewinnung“ heißt immer Umwandlung!..... | 2 |
| 2 | Energieeffizienz und Wirkungsgrad..... | 2 |
| 2.1 | Der Wirkungsgrad – das Verhältnis von „Nutzen zu Aufwand“ | 2 |
| 2.2 | Der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen | 3 |
| 2.3 | Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz | 3 |
| 3 | Dampfmaschinen | 4 |
| 3.1 | Die erste Wärmekraftmaschine der Welt..... | 5 |
| 3.2 | Warum dient Wasser als Arbeitsmittel?..... | 5 |
| 3.3 | Didaktischer Hinweis zum Stirlingmotor | 6 |
| 4 | Turbinen | 7 |
| 4.1 | Dampfturbine statt Dampfmaschine | 7 |
| 4.1.1 | Konstruktionsunterschiede zur Kolbendampfmaschine | 7 |
| 4.1.2 | Wie funktioniert die Dampfturbine? | 8 |
| 4.2 | Gasturbinen | 8 |
| 4.2.1 | Warum Gasturbinen?..... | 8 |
| 4.2.2 | Wie funktioniert die Gasturbine? | 9 |
| 4.3 | Wasserturbinen..... | 9 |
| 4.3.1 | Pelton-Turbine | 9 |
| 4.3.2 | Kaplan-Turbine | 10 |
| 4.3.3 | Francis-Turbine..... | 10 |
| 4.3.4 | Physik der Kaplan- und Francis-Turbine | 10 |
| 5 | Motoren | 10 |
| 6 | Stromgeneratoren | 11 |
| 7 | Kernreaktoren | 11 |
| 7.1 | Grundprinzip der Kernspaltung im Reaktor | 12 |
| 7.2 | Verschiedene technische Ausführungen von Kernreaktoren | 13 |
| 8 | Brennstoffzellen | 15 |
| 8.1 | Elektrische Energie statt Wärme | 15 |
| 8.2 | Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle | 15 |
| 8.3 | Technische Probleme bei Hochleistungsstromzellen | 15 |
| 9 | Synthesegaserzeuger | 16 |
| 10 | Windräder..... | 17 |
| 10.1 | Die Physik des Windrads | 17 |
| 10.2 | Bauarten der Windräder..... | 18 |
| 10.3 | Probleme der Stromerzeugung mit Windrädern | 18 |
| 11 | Solarzellen | 19 |
| 11.1 | Die Physik der Solarzelle | 19 |
| 11.2 | Warum ist der Wirkungsgrad der Solarzellen so schlecht?..... | 19 |
| 11.3 | Solarzellentypen | 20 |
| 11.4 | Klima- und Ökobilanz sowie Energieeffizienz von Solarzellen..... | 21 |

1 Energie-„Gewinnung“ heißt immer Umwandlung!

Energie-„Gewinnung“ bedeutet immer Energieumwandlung. Gewinnung im Sinn einer „Erhöhung“ des Energieinhalts eines abgeschlossenen Systems ist nach dem allgemeinen Energieerhaltungssatz bzw. dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik nicht möglich. Spricht man im allgemeinen Sprachgebrauch von „Energiegewinnung“ oder „Energieerzeugung“, so meint man damit immer die Umwandlung einer nicht nutzbaren Energieform in Nutzenergie. Um dies den Schülerinnen und Schülern vor Augen zu halten, werden diese Begriffe im Folgenden sowie in weiteren Medien zu diesem Thema in Anführungszeichen gesetzt, also Energie-„Gewinnung“ und Energie-„Erzeugung“.

Zum Beispiel wird die gespeicherte chemische Energie der Kohle im Kohlekraftwerk zunächst durch Verbrennung in Wärme umgewandelt, diese mit einer Turbine in mechanische Energie und die wiederum mit einem Stromgenerator in elektrische Energie. Die elektrische Energie kann dann als Strom verteilt und genutzt werden. Kohle und andere nicht direkt nutzbare Energieträger werden als „Primärenergieträger“ bezeichnet. Die Energieformen, in denen die Energie verteilt wird, nennt man „Sekundärenergieträger“. Meist sind dies Strom und Fernwärme. Die Endverbraucher – bzw. ihre Geräte und Maschinen wie Küchenherd oder Bohrmaschine – wandeln dann z. B. den Strom in Wärme bzw. mechanische Energie um.

Energie-„Gewinnung“ gibt es also nicht. Im Gegenteil, die Umwandlung von einer in eine andere Energieform ist – bezogen auf die Nutzenergie – sogar meist mit Verlusten behaftet. Man spricht bezogen auf den Nutzeffekt auch von „Degradation“ oder Entwertung eines Teils der eingesetzten Energie.

2 Energieeffizienz und Wirkungsgrad

Die Umwandlung von einer Energieform in eine andere ist – bezogen auf die gewünschte Nutzenergie – mit gewissen Energieverlusten behaftet. Grund dafür sind einerseits **technische Schranken**: Mechanische Energie z. B. ist nur theoretisch zu 100 % mittels Stromgenerator in elektrische Energie wandelbar. Aufgrund des elektrischen Widerstands der Spulen im Generator und deren damit verbundenen Erwärmung ist die 100%ige Umwandlung technisch nicht realisierbar. Dazu kommen noch Wärmeverluste durch Reibung in den Lagern der Maschinen. Allerdings erreichen moderne Elektromotoren und Generatoren durch Kühlung bis zu ca. 99 % Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad kann bei diesen Maschinen durch entsprechenden technischen Aufwand also auf fast 100 % gesteigert werden. Auch die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme mittels eines Tauchsieders in einem gut isolierten Gefäß erreicht nahezu 100%. Andererseits gibt es für bestimmte Umwandlungsprozesse auch **naturgesetzliche Schranken**: Speziell bei der Umwandlung von thermischer in mechanische Energie erlaubt der 2. Hauptsatz der Thermodynamik keine vollständige Umwandlung.

2.1 Der Wirkungsgrad – das Verhältnis von „Nutzen zu Aufwand“

Um für die Verluste bei der Energie-„Gewinnung“ eine vergleichbare Größe (also eine Maßzahl) zu haben, wurde der „Wirkungsgrad“ eingeführt. Dieser bezeichnet den Anteil der gewonnenen Nutzenergie (E_{Nutzen}) zur aufgewendeten Energie (E_{Aufwand}) und wird in der Technik mit dem Buchstaben η (griechisch „eta“) abgekürzt. Je näher ein Wirkungsgrad am Wert 1 bzw. 100 % ist, desto besser (effizienter) ist die Energieumwandlung.

$$\eta = \text{Nutzen} : \text{Aufwand} = E_{\text{Nutzen}} : E_{\text{Aufwand}}$$

Ein Wirkungsgrad von 1 wird in der Praxis aus oben genannten Gründen nie erreicht.

2.2 Der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen

Eine wichtige Bedeutung haben in der Technik jene Prozesse, bei denen aus Wärme mechanische Arbeit erzeugt wird. Diese kann dann zum Antrieb von Kraftfahrzeugen oder in einem Generator zur Umwandlung in elektrische Energie genutzt werden. Die ideale Wärmekraftmaschine wird durch den sog. Carnot'schen Kreisprozess beschrieben. Dieser hat den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad. Aus dem Carnot-Prozess lässt sich ableiten, welcher Anteil der zugeführten Wärme maximal in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Er wird als Quotient aus der Differenz zwischen höchster Temperatur (T_2) und niedrigster Temperatur (T_1) im gesamten Prozess berechnet. (Hinweis: Abgeleitet wird die Formel für den Wirkungsgrad über die Wärme und Arbeit. Wenn man die Gasgleichung verwendet, kann dann auf T umgeformt werden!)

Es gibt eine ganze Reihe realer Kreisprozesse, die aber alle einen schlechteren Wirkungsgrad haben als der theoretisch ideale Kreisprozess von Carnot:

| Kreisprozess | Maschine | Wirkungsgrad |
|------------------|---------------------------------------|---|
| Carnot | Theoretisch ideale Wärmekraftmaschine | $\eta_{\text{ideal}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} < 1$ * |
| Stirling | Stirlingmotor | $\eta_{\text{real}} = 20 \% \text{ bis } 50 \%$ |
| Diesel | Dieselmotor | $\eta_{\text{real}} = 40 \% \text{ bis } 50 \% \text{ (stationär)}$ |
| Otto | Ottomotor | $\eta_{\text{real}} = 30 \% \text{ bis } 38 \%$ |
| Clausius-Rankine | Dampfturbine, Dampfmaschine | $\eta_{\text{real}} = 30 \% \text{ bis } 50 \%$ |
| Joule-Prozess | Gasturbine | $\eta_{\text{real}} = 30 \% \text{ bis } 40 \%$ |
| GuD | Gas- und Dampfturbine kombiniert | $\eta_{\text{real}} = \text{bis } 61,5 \%$ |

* **Hinweis:** Die Berechnung nach dieser Formel ergibt eine Dezimalzahl, es ist aber üblich den Wirkungsgrad nach Multiplikation mit 100 in Prozent anzugeben.

Sonderfall Wärmepumpe: Für die umgekehrt laufende Wärmekraftmaschine, die „Wärmepumpe“, hat man in der Technik eine „Leistungszahl“ (L) sozusagen als inversen Wirkungsgrad definiert. Diese Leistungszahl ist deshalb größer als 1. Die maximale Leistungsziffer einer Wärmepumpe ist $L = 6$, üblich sind 3 bis 5. Das heißt, dass durch den Einsatz von 1 kWh Strom eine Wärmemenge von 6 kWh gewonnen werden kann.

2.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz

Um unsere fossilen Ressourcen besser zu nutzen, ist man stets bestrebt, den Wirkungsgrad zu optimieren, d. h. die Effizienz der Umwandlung zu steigern. Gerade bei den Wärmekraftprozessen

kann man zwar nicht am Naturgesetz (Wirkungsgrad < 100 %) rütteln, aber trotzdem den Wirkungsgrad noch steigern:

- **Kraft-Wärme-Kopplung:**

Als Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet man die gekoppelte Erzeugung von Elektrizität und Wärme. Dabei wird die vom Kraftwerk (Gas- und/oder Dampfturbine) naturgesetzlich anfallende Abwärme als Nah- und Fernwärme zu Heizzwecken genutzt. Der durchschnittliche Wirkungsgrad eines Gas- und Dampfkraftwerks (GuD-Kraftwerks) liegt zwischen 51 % und 58 %. Ein erstes GuD-Kraftwerk mit über 60 % ist gerade in der Testphase. Benutzt man die Abwärme als Nah- und Fernwärme zum Heizen, so werden Gesamtwirkungsgrade bis zu 90 % erreicht (wie beim Biomasse-GuD-Kraftwerk Wien).

- **Vergasung von Kohle, Bitumen, Schweröl, Holz:**

Die Verbrennung von Festbrennstoffen eignet sich weniger gut zum Betrieb von Kraftwerken mit Gasturbinen (Korrosion, Abrasion). Durch Vergasung der festen Brennstoffe und Reinigung des entstehenden Synthesegases erhält man aber ein relativ sauberes, schadstoffarmes Gas. Dieses lässt sich sehr gut und auch bei höheren Temperaturen als die entsprechenden Feststoffe verbrennen. Höhere Temperaturen bedeuten einen höheren Wirkungsgrad der Gasturbine (siehe oben!). Wird mit der Abwärme der Gasturbine noch Dampf erzeugt und eine nachgeschaltete Dampfturbine betrieben, addieren sich die Nutzungsgrade auf mehr als 60 %. Außer der Effizienzerhöhung enthält das Abgas bei dieser modernen Technologie zudem wesentlich weniger Schadstoffe und schont somit die Umwelt.

- **Optimierte Rotorschaukeln bei Gasturbinen:**

Eine Gasturbine besteht aus mehreren Schaufelreihen, gegen die das durchströmende heiße Verbrennungsgas drückt. Ein Teil des Gases passiert dabei ungenutzt den Spalt zwischen den Schaufelblättern und der Turbinenwand. Durch intelligente Konstruktion gelang es den Turbinenbauern, diesen Spalt enger zu machen und damit den Verlust zu reduzieren. Der Wirkungsgrad der Gasturbine stieg dadurch um ca. 0,2 Prozentpunkte. Das klingt nach wenig, bedeutet aber bei großen Kraftwerken eine große Menge an eingesparter Primärenergie.

- **Optimierte Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Turbinenschaufeln:**

Heute arbeiten Gasturbinen mit Verbrennungsgasen mit einer Temperatur von bis zu 1.500 °C bei über 20 bar und erreichen Wirkungsgrade von über 40 %. Bei diesen Bedingungen könnten die metallischen Turbinenschaufeln anschmelzen oder korrodieren. Es besteht auch die Gefahr, dass die Schaufeln zerbrechen, denn es wirken Beschleunigungskräfte von bis zum 10.000fachen der Erdbeschleunigung. Die Schaufeln der ersten Stufe bestehen deshalb aus extrem festen, einkristallinen Superlegierungen, die an der Oberfläche mit korrosionsfester, schlecht wärmeleitender, hochschmelzender Keramik überzogen sind.

3 Dampfmaschinen

Eine Dampfmaschine wandelt unter der Verwendung des Arbeitsmittels Wasser **Wärme in mechanische Arbeit** um. Sie war die erste Wärmekraftmaschine der Welt mit einem Wirkungsgrad von anfänglich weniger als 1 %. Es war dieser schlechte Wirkungsgrad, der Forscher und Ingenieure angespornt hat, Wärmekraftmaschinen mit immer besseren Wirkungsgraden zu entwickeln. Das Unternehmen Siemens hat an dieser Entwicklung moderner Dampfturbinen wesentlichen An-

teil und hält heute auf dem Gebiet der Dampferzeugung und der Turbinentechnik zahlreiche Patente.

3.1 Die erste Wärmekraftmaschine der Welt

Im Jahre 1690 erfand der Franzose Denis Papin den **Dampfdrucktopf** mit Sicherheitsventil. Dieser funktioniert nach folgendem Prinzip: Mit erhöhtem Druck steigt der Siedepunkt des Wassers und die Garzeiten werden kürzer. Es war ebenfalls Papin, der auf die geniale Idee kam, diesen Effekt umgekehrt zu nutzen: Erhöhte Temperatur erzeugt erhöhten Druck, den man zur Leistung von Arbeit nutzen kann. Nach Papins **Kolbendampfmaschinen-Prinzip** gebaute Pumpen wurden ab ca. 1700 genutzt und vom Engländer Thomas Savery noch verbessert. 1712 baute Thomas Newcomen in England die erste kontinuierlich arbeitende Dampfmaschine, die in Kohlegruben eingesetzt wurde. Ihr Nachteil war, dass sie fast so viel Kohle verbrauchte, wie mit ihrer Hilfe gefördert wurde. Erst dem englischen Instrumentenmacher James Watt gelang es zwischen 1765 und 1781 eine Kolbendampfmaschine in moderner Form zu entwickeln.

Das Prinzip der Watt'schen Dampf-Maschine:

In einem Kessel wird Wasserdampf erzeugt und nacheinander zuerst oberhalb und dann unterhalb des Kolbens in den Arbeitszylinder eingespritzt. In einem nachgeschalteten Kondensator wird der Dampf kondensiert und erzeugt zusätzlich Unterdruck. Das kondensierte Wasser kann über eine Pumpe wieder in den Kessel zurückgeführt werden. Die Auf- und Ab-Bewegung des Kolbens wird über Stangen und Exzenter in die Rotationsbewegung einer Schwungscheibe gewandelt.

An deren Achse wurden über Getriebe oder Transmissionsriemen die Verbraucher wie z. B. Pumpen, Spinn-, Web- und Werkzeugmaschinen angeschlossen.

Mit der Watt'schen Dampfmaschine war auch ein Antrieb für die Lokomotiven der **Eisenbahn** gefunden. Das erste Massenverkehrsmittel der Welt konnte sich entwickeln. Zu Ehren des Erfinders wurde die physikalische Einheit für Leistung „Watt“ genannt.

3.2 Warum dient Wasser als Arbeitsmittel?

Eigentlich würde ein Gas als Arbeitsmittel genügen: Druck und Volumen eines Gases sind von der Temperatur abhängig ($p \cdot V = n \cdot R \cdot T$). Hat man ein abgeschlossenes System aus Zylinder und beweglichem Kolben, kann man entsprechend dem Carnot'schen Kreisprozess durch Zuführen von Wärme Volumenarbeit ($p \cdot V$) leisten. Doch technisch war dieses Prinzip mit Gasen zunächst nur schwer zu verwirklichen. Erst 1816 wurde vom schottischen Pastor Robert Stirling der nach ihm benannte Motor mit Luft als Arbeitsgas erfunden.

Wasserdampf hat Vorteile: Erhitzt man bei Normaldruck Wasser (H_2O) über 100 °C , so entsteht „Dampf“, bzw. streng genommen gasförmiges Wasser. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass der Vorgang des „Verdampfens“ naturwissenschaftlich stets ein „Überführen in die Gasphase“ bezeichnet. Da die einzelnen H_2O -Moleküle des gasförmigen Wassers aber für den Menschen unsichtbar sind, ist auch verdampftes Wasser unsichtbar. Dagegen ist das, was wir umgangssprachlich als „Dampf“ bezeichnen, in Wirklichkeit ein Nebel, der aus kondensiertem (also flüssigem) Wasser in Form feiner Tröpfchen besteht. In der Technik der Dampfmaschine kann „Dampf“ auch „Zweiphasengebiete“ meinen. Das hat mit dem kritischen Punkt im p-T-Diagramm des Wassers zu tun. Da gasförmiges Wasser ein größeres Volumen als flüssiges hat, will es sich ausdehnen. Kann es das nicht, z. B. im Dampfkessel der Maschine, so erhöht sich der Druck. Dadurch erhöht sich aber die Temperatur, bei der das Wasser verdampft. Es entsteht noch heißerer Wasserdampf, der noch mehr Druck erzeugt usw. Das endet bei einer „kritischen“ Temperatur, bei der

der gasförmige und flüssige Zustand nicht mehr unterscheidbar sind. In der Praxis arbeiten Kolbendampfmaschinen aufgrund ihres Temperaturbereichs meist mit übersättigtem Dampf, d. h. einer Mischung aus gasförmigem Wasser und flüssigen Wassertröpfchen. Bei den höheren „überkritischen“ Temperaturen der modernen Dampfturbinen besteht der „Dampf“ nur noch aus gasförmigem Wasser. Die Erfinder der Dampfmaschine überzeugte das Wasser als Arbeitsmittel, da man aus relativ wenig flüssigem Wasser relativ große Mengen von hochenergetischem Dampf erzeugen kann. Von einem bei Raumtemperatur und Normaldruck gasförmigen Stoff bräuchte man dagegen wesentlich größere Mengen.

Wasserdampf hat Nachteile: Bei der Dampfmaschine wird die zugeführte Wärmeenergie zuerst einmal nur zur Verdampfung des Wassers verbraucht und nur der darüber hinausgehende Teil zur Erhitzung des Dampfes. Nach der Arbeitsleistung in der Maschine verlässt der „entspannte“ Dampf, d. h. gasförmiges Wasser, die Maschine. Der Dampf kondensiert z. B. bei den Kolbendampfmaschinen der Lokomotiven außerhalb der Maschine, die Verdampfungswärme wird als ungenutzte Kondensationswärme frei. Diese Wärme kann bei solchen Maschinen nicht für die Gewinnung mechanischer Arbeit genutzt werden. Der theoretische Wirkungsgrad der Kolbendampfmaschine bei Lokomotiven wird um den Kondensationswärmebetrag schlechter. Bei modernen Dampfturbinen gibt es kaum Verluste durch Kondensationswärme. Diese Dampfturbinen arbeiten mit extrem hohen Einlassdampftemperaturen und Drücken (z. B. 600 °C und 270 bar). Die in den Turbinenauslass integrierte Kondensation (Abkühlung auf 30 °C bei 30 mbar) trägt durch Unterdruck zur Leistung bei. Dadurch wird die Temperatur- und Druckdifferenz zwischen dem ein- und austretenden Dampf erhöht und damit der Wirkungsgrad verbessert.

3.3 Didaktischer Hinweis zum Stirlingmotor

Der Stirlingmotor verwendet Luft oder ein anderes inertes (chemisch nicht reagierendes) Gas als Arbeitsmittel. Dieses Gas durchläuft nicht die Maschine, sondern bleibt permanent in ihrem abgeschlossenen Arbeitsraum. Von daher entspricht der Stirlingmotor wesentlich besser der theoretischen Carnot-Maschine als die Dampfmaschine. An der Dampfmaschine wird auch auf den ersten Blick die Besonderheit aller Wärmekraftmaschinen nicht klar – nämlich dass nicht 100 % der eingesetzten Wärme in Arbeit verwandelbar sind. Die Dampfmaschine scheint nichts anderes zu sein als eine mechanische Arbeitsmaschine, in der die Kraft des Dampfes in Kraft des Kolbens umgewandelt wird. Dass Dampf Druck hat und Kraft ausüben kann, leuchtet angesichts eines „Heronballs“ (mit Wasserdampf gefüllte Drehkugel, um 120 v. Chr. von Heron von Alexandria beschrieben) oder eines Dampfmaschinenmodells aufgrund bloßer mechanischer Betrachtung sofort ein. Da diese Dampfmaschinen keinen Kühler haben, bleibt die naturgesetzliche Beschränkung bei der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit auf den „ersten Blick“ verborgen. Dagegen bietet der Stirlingmotor mit seinem Kühler einen sichtbaren Hinweis auf die bei Wärmekraftmaschinen wirkenden Gesetze der Thermodynamik. Ein kleiner Modell-Stirlingmotor in Zweizylinder-V-Bauweise mit Glaszylinder macht also die thermodynamischen Hintergründe der Wärmekraftmaschine recht anschaulich sichtbar. Auf dem Medienportal werden deshalb mehrere Medien – ein Video, eine Experimentieranleitung und ein Infomodul – zum Thema Stirlingmotor angeboten. Angesichts der Energie- und Klimaprobleme sollte aber im naturwissenschaftlich-technischen Unterricht auch die Bedeutung des Kühlers für den Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen klar werden.

4 Turbinen

Eine Turbine (von lateinisch turbare, wörtl. übersetzt: verwirbeln, verwirren) ist eine Strömungsmaschine, welche die innere Energie eines Massestroms (Flüssigkeit oder Gas) in mechanische Rotationsenergie umwandelt. Der Begriff Turbine wird auch zur Abgrenzung zu offenen, frei angeströmten Systemen verwendet, wie z. B. den Mühlrädern bei Wasser. Im Gegensatz zum Mühlrad wird in einer Turbine durch die Form des Gehäuses und durch Leitvorrichtungen (Leitschaufeln oder Düsen) der Massestrom gezwungen, den Weg zu nehmen, auf dem er am meisten Energie an die Laufschaufel abgibt.

Eine Turbine besteht im einfachsten Fall aus einer Welle, auf die ein Laufrad mit vielen Schaufeln aufgesetzt ist. Je nach Art der Turbine können auch mehrere Laufräder hintereinandergesetzt sein. Über die Laufräder soll möglichst die gesamte **Energie** eines strömenden Mediums (Wasser, Dampf, Gas) **in mechanische Rotationsenergie** der Turbine umgewandelt werden. Treibt die Welle der Turbine einen Generator an, so kann die mechanische Energie der Turbine in elektrische Energie (Strom) umgewandelt werden.

Wir unterscheiden drei Arten von Turbinen:

- Dampfturbine
- Gasturbine
- Wasserturbine

Während bei der Wasserturbine die Gesetze der Strömungsmechanik wirken, kommen bei der Dampf- bzw. Gasturbine auch noch die Gesetze der Thermodynamik hinzu. Dampf- und Gasturbine sind typische Wärmekraftmaschinen.

4.1 Dampfturbine statt Dampfmaschine

Die Dampfturbine wandelt ebenso wie die Dampfmaschine **thermische in mechanische Energie** um. Das Design der Dampfturbine erfolgt einerseits aufgrund strömungsmechanischer Berechnungen. Andererseits muss sie als Wärmekraftmaschine auch unter thermodynamischen Gesichtspunkten optimiert werden.

4.1.1 Konstruktionsunterschiede zur Kolbendampfmaschine

Ein erster konstruktiver Unterschied zur Kolbenmaschine ist bei der Dampfturbine die direkte Umwandlung der Dampfenergie in eine Rotationsbewegung. Dagegen muss bei der Kolbenmaschine die lineare Bewegung des Kolbens erst über eine Stange (sog. „Pleuel“) in eine Drehbewegung gewandelt werden. Der Ein- und Auslass des Dampfes in den Arbeitszylinder der Kolbenmaschine ist relativ träge, was wiederum Druck und Temperatur des Dampfes begrenzt. Deshalb erreicht die klassische Kolbendampfmaschine nur einen Wirkungsgrad von bis zu 20 %, moderne dampfturbinenbasierte Kraftwerke jedoch bis zu 50 %. Aktuell werden Dampfturbinenkraftwerke mit über 50 % Wirkungsgrad entwickelt. Dies ermöglicht eine Technologie, die am Turbineneingang mit 700 °C und 300 bar arbeitet.

Die klassische Kolbendampfmaschine lässt sich technisch kaum für Umdrehungszahlen größer als ca. 600 U/min konstruieren. Die Dampfturbine erreicht dagegen problemlos hohe Umdrehungszahlen von 1.500 bzw. 1.800 U/min bei Zweipolstromgeneratoren und 3.000 bzw. 3.600 U/min bei Einpolstromgeneratoren, die für die Erzeugung von Wechselstrom mit 50 Hz bzw. 60 Hz nötig sind. Auch in der Leistung ist die Dampfturbine „nach oben offen“. Die technisch realisierbare Leis-

tung der Kolbendampfmaschine liegt bei etwa 12 MW, moderne Dampfturbinen erreichen inzwischen bis zu 2.000 MW und werden noch ständig weiterentwickelt. Deshalb werden heute praktisch nur noch Dampfturbinen eingesetzt.

4.1.2 Wie funktioniert die Dampfturbine?

Theoretisch wären Dampfturbinen mit einer einzigen Schaufelreihe denkbar. Doch diese müssten extrem schnell laufen, um die Energie des extrem schnell strömenden Dampfs möglichst komplett aufzunehmen. So hohe Umdrehungszahlen sind weder technisch gut realisierbar noch für die Stromproduktion erwünscht. Stattdessen wird die Energie bei Umdrehungszahlen bis max. 3.000 bzw. 3.600 U/min mehrstufig übertragen. Auf der Welle sitzen dazu mehrere Laufräder („Stufen“) hintereinander, so dass die Energie des strömenden Dampfs nach und nach übertragen werden kann. Da der Strömungsdruck beim Durchlaufen der Turbine abnimmt, werden die Laufräder nach hinten immer größer, um die Kraft auf die Schaufeln ($\text{Kraft} = \text{Druck} \cdot \text{Fläche}$) konstant zu halten. Denn je geringer der Druck des Dampfs ist, desto geringer ist die Kraft auf die Schaufeln. Zwischen je zwei Laufrädern ist jeweils ein feststehendes Leitrad geschaltet. Das dient dazu, den Dampf wieder in die günstigste Einfallsrichtung auf die Schaufeln umzulenken, um seine Energie optimal auszunutzen. Der extrem hohe Wirkungsgrad der modernen Dampfturbinen wird möglich durch Einlasstemperaturen von über 600 °C bei einem Druck von 270 bar und Auslasstemperaturen von ca. 32 °C bei einem Druck von ca. 0,03 bar. Die niedrigen Auslasswerte wirken sich verbessernd auf den thermodynamischen Wirkungsgrad aus, da der Kondensator am Auslass integrierter Bestandteil der Gesamtturbine ist. Der durch Kondensation bewirkte Unterdruck verbessert so die Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass der Turbine.

4.2 Gasturbinen

Verwendet man als Arbeitsmittel für die Turbine statt Wasserdampf heißes Gas – aus der Verbrennung eines Gas-Luft-Gemisches –, so erhält man eine „Gasturbine“.

4.2.1 Warum Gasturbinen?

Der Hauptvorteil gegenüber einer Dampfturbine ist die kompaktere Bauweise und die Möglichkeit des schnellen Hoch- und Herunterfahrens der Leistung, da nicht erst Dampf erzeugt werden muss. Der Dampf für Dampfturbinen wird z. B. mittels Braunkohle, Steinkohle oder Schweröl erzeugt, was mit schadstoffbelasteten Abgasen bzw. aufwändiger Rauchgasreinigung verbunden ist. Auch diesbezüglich sind die meist mit Erdgas oder Synthesegas betriebenen Gasturbinen wesentlich unproblematischer. Ursprünglich waren der Wirkungsgrad und die Leistung der Gasturbine deutlich schlechter als die der Dampfturbine. Inzwischen erreichen Gasturbinen Leistungen von bis zu 400 MW bei einem Wirkungsgrad von derzeit ca. 40,1 %. In der Praxis heißt dies, dass überall dort, wo Kraftwerke oder Kraftwerksblöcke mittlerer Leistung zur Abdeckung von Spitzenlast dienen, heute bevorzugt Gasturbinen eingesetzt werden.

In modernen Großkraftwerken kombiniert man zunehmend Gas- und Dampfturbinen. Die Abwärme der Gasturbine wird zur Erzeugung von Dampf für eine Dampfturbine genutzt, der Gesamtwirkungsgrad steigt dadurch auf bis zu 61,5 %.

Hinweis: In Ländern mit hohem Anteil an regenerativem Strom (z. B. ca. 32 % in Deutschland Ende 2015) werden die Gasturbinenkraftwerke immer weniger zur Abdeckung der Spitzenlast (meist Mittagszeit) eingesetzt. Denn unsubventioniert kosten inzwischen Photovoltaikstrom lediglich ca.

7 bis 9 Cent/kWh und Windstrom ab ca. 4,5 Cent/kWh; Gasturbinenstrom dagegen kostet bis zu 10 Cent/kWh.

4.2.2 Wie funktioniert die Gasturbine?

Luft mit einer Temperatur von ca. 15 °C und Normaldruck wird in einem Verdichter auf 17 bar komprimiert und erreicht dabei eine Temperatur von ca. 400 °C. Diese Druckluft wird im Brennraum der Turbine mit Erdgas vermischt und verbrennt dort bei ca. 1.500 °C. Dieses heiße Gas hohen Drucks durchströmt nun die Turbinenschaufeln und gibt so viel Energie an diese ab, dass der Druck des Auslassgases wieder auf Normaldruck und die Temperatur auf ca. 600 °C absinkt. Aus diesen Daten errechnet sich der thermodynamische Wirkungsgrad der Gasturbine. Für den Gesamtwirkungsgrad muss u. a. berücksichtigt werden, dass auch Energie für die Komprimierung aufgewendet wird.

Für die Berechnung der Turbinengeometrie gelten die Gesetze der Strömungsmechanik. Es ist bei der Gasturbine im Unterschied zur Dampfturbine zu berücksichtigen, dass die Dichte des Gases vergleichsweise gering ist. Die Schaufelblätter werden also weniger durch Stoß (Impuls) weggedrückt. Stattdessen wirkt vor allem die hohe Geschwindigkeit des Gasstroms: An der Vorder- und Rückseite eines Schaufelblatts hat das Gas unterschiedliche Geschwindigkeiten. Daraus resultiert ein Druckunterschied (siehe Bernoulli-Gleichung), der zu einer Querbewegung des Schaufelblatts bezüglich der Strömungsrichtung der Gasströmung führt. Die Turbine beginnt zu rotieren.

Hier könnte auf die Bedeutung der Mathematik bei der Berechnung des Strömungsverlaufs in der Turbine verwiesen werden (Differenzialgleichungen, Finite-Elements-Methode).

4.3 Wasserturbinen

Die Wasserturbine wandelt die **mechanische Energie** des Wassers, d. h. die potenzielle Energie hoher Wassersäulen oder die kinetische Energie fließenden Wassers, **in die Rotationsbewegung** einer Turbine um. In Wasserkraftwerken treibt diese einen Generator zur Erzeugung elektrischer Energie an.

Bei Wasser handelt es sich um einen relativ dichten Massenstrom aus einer im Gegensatz zum Gas nicht kompressiblen Flüssigkeit. Deshalb und weil die Geschwindigkeit des Teilchenstroms (im Vergleich zum Gasstrom bei den Gasturbinen) vergleichsweise gering ist, kommen die Wasserturbinen in der Regel mit einem einzigen Laufrad aus. Die Berechnung der vom Wasser auf die Turbine übertragenen Energie ist relativ einfach: Es ist die Differenz aus den Summen der potenziellen und kinetischen Energie des Wassers vor und nach der Turbine.

Für eine möglichst 100%ige Übertragung der Wasserenergie auf die Turbine ist jedoch die strömungsmechanische Berechnung des Turbinendesigns recht komplex. Je nach Wassermenge und Fallhöhe des zur Verfügung stehenden Wassers muss die Bauweise, Form und Funktion der Turbinen stark unterschiedlich sein. Bis heute haben sich im Wesentlichen drei Wasserturbinentypen durchgesetzt, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden.

4.3.1 Pelton-Turbine

Die Pelton-Turbine wird bei relativ geringen Wassermengen (Masse m) und sehr großen Fallhöhen eingesetzt (bis zu 1.800 m). Sie besitzt ein Laufrad mit löffelförmigen Schaufeln und kein Leitrad (siehe Francis-Turbine). Das Wasser wird über Düsen direkt auf die Löffel „gespritzt“.

Die Energieübertragung könnte direkt als Impulsübertragung ($\Delta p = m \cdot \Delta v$, v : Geschwindigkeit) der aufgespritzten Wassermenge berechnet werden. Man bezeichnet die Pelton-Turbine auch als eine Gleichdruckturbine, da der hydrostatische Druck am Ein- und Ausgang gleich ist. Der Wirkungsgrad optimal eingesetzter Pelton-Turbinen liegt zwischen 85 und 93 %.

4.3.2 Kaplan-Turbine

Bei relativ geringer Fallhöhe (meist um die 10 m) – z. B. bei einem Laufwasserkraftwerk an einem Fluss – und mittleren bis sehr großen Wassermengen verwendet man die Kaplan-Turbine. Das Wasser strömt parallel zur Turbinenachse auf ein Laufrad in Propellerform. Das axial um die Welle vor dem Laufrad angebrachte feststehende Leitrad besitzt Lamellenform. Die Lamellen sind so eingestellt, dass der Wasserstrom parallel zur Achse auf den Propeller trifft. Die Kaplan-Turbine ist eine Überdruckturbine, es wirkt vor allem der Druck des Wassers, der nach Durchlaufen der Turbine kleiner ist als zuvor. Der Wirkungsgrad optimal eingesetzter Kaplan-Turbinen liegt zwischen 85 und 95 %. Kaplan-Turbinen gibt es mit starren und verstellbaren Propellerflügeln. Der Wirkungsgrad einer Kaplan-Turbine ist nämlich nur bei einer bestimmten Durchflussmenge und Flügelstellung optimal. Bei verstellbaren Flügeln bleibt der Wirkungsgrad auch bei schwankenden Durchflussmengen konstant.

4.3.3 Francis-Turbine

Bei relativ hoher Fallhöhe (typisch um die 100 m) und großen bis extrem großen Wassermengen, z. B. bei Speicherseen mit hohen Staumauern, verwendet man die Francis-Turbine. Das Laufrad hat eine geschwungene Schaufelform. Der Wasserstrom wird senkrecht zur Achsrichtung eingeleitet und das um das Laufrad angebrachte feststehende Leitrad lenkt das Wasser exakt in die Richtung der Schaufeln des Laufrads. Die Schaufeln des Leitrads können verstellt werden, so dass je nach Wassermenge und Geschwindigkeit stets der optimale Wirkungsgrad erreicht wird. Die Francis-Turbine ist eine Überdruckturbine, es wirkt also vor allem der Druck des Wassers, der nach der Turbine kleiner ist als zuvor. Der Wirkungsgrad optimal eingesetzter Francis-Turbinen liegt bei ca. 90 bis 95 %.

4.3.4 Physik der Kaplan- und Francis-Turbine

Bei stationärer, also zeitlich gleichbleibender Strömung einer inkompressiblen (Dichte konstant) und nicht viskosen Flüssigkeit (keine innere Reibung) gilt die sog. **Kontinuitätsgleichung**. Sie besagt, dass der Volumenstrom durch die Querschnittsfläche der Flüssigkeit konstant ist. Durch enge Röhren fließt die gleiche Menge Wasser also schneller als durch breite. Die daraus folgende **Bernoulli-Gleichung** besagt, dass die Summe aus hydrostatischem und hydrodynamischem Druck in einer strömenden Flüssigkeit konstant ist. Daraus lässt sich ableiten, dass der hydrostatische Druck zurückgeht, wenn die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids zunimmt. Bei den Wasserturbinen gilt deshalb für die Überdruckturbinen (Francis, Kaplan), dass der hydrostatische Druck am Laufradeingang größer ist als am Laufradausgang („Überdruckturbine“). Übrigens wird der Auslauf einer Kaplan- oder Francis-Turbine in der Fachsprache als „Saugrohr“ bezeichnet. Das heißt, die restliche kinetische Energie des Wassers verursacht wie bei der Wasserstrahlpumpe einen Saugeffekt, der sich zum Druck vor der Turbine addiert.

5 Motoren

Motoren bezeichnen ganz allgemein Maschinen, die mechanische Arbeit leisten, indem sie eine andere Energieform umwandeln (z. B. mechanische, chemische, elektrische oder thermische Energie). So gesehen wären alle **Wärmeleistungsmaschinen** Motoren, auch die Kolbendampfmaschine sowie die Gas- und Dampfturbine. Im Laufe der Zeit hat sich bei der Begriffsbezeichnung aber durchgesetzt, dass heute nur die **Verbrennungsmotoren** (z. B. Otto- und Dieselmotor),

der **Warmluftmotor** (Stirlingmotor siehe oben) und die **Elektromotoren** diesen Begriff im Namen enthalten.

Nachfolgend wird kurz auf den Elektromotor eingegangen. Zum Thema „Wärmekraftmaschinen und Motoren“ wird auf dem Medienportal eine eigene Sachinformation angeboten.

Der **Elektromotor** wandelt elektrische Energie in mechanische Energie einer Welle um. Die mechanische Arbeit resultiert aus der Lorentzkraft, die auf bewegte Ladungen im Magnetfeld wirkt. Je nach Bauart kann der Elektromotor auch als Generator dienen. Deshalb kommen heute zunehmend Kombinationen von Verbrennungsmotor und Elektromotor in sog. Hybridfahrzeugen zum Einsatz. Die Bremsenergie und evtl. auch die Leerlaufenergie werden in elektrische Energie umgewandelt und in Akkus gespeichert, die wiederum den Elektromotor (insbesondere beim Starten und Beschleunigen) antreiben. Auf dem Medienportal sind hierzu weitere Medien vorhanden, u. a. die Experimentieranleitung „Elektromotor und Stromgenerator“, der Experimentalfilm „Ein Fahrraddynamo als Motor“, sowie die teils animierten Infomodule „Elektromotor und Lorentzkraft“ und „Hybridsysteme zur Energieumwandlung“.

6 Stromgeneratoren

Der Generator wandelt mechanische in elektrische Energie um. Der Generator ist also die Umkehrung des Elektromotors: Dreht man eine Spule in einem Magnetfeld, so wird in ihr eine Spannung induziert, die die Ladungen im Spulendraht verschiebt. Dieser induzierte Strom ist so gerichtet, dass sein Magnetfeld der Ursache der Induktion (also der Bewegung) entgegenwirkt (Lenz'sche Regel). Die Stromrichtung ändert sich daher mit dem Magnetfeld periodisch, es entsteht Wechselstrom. Pulsierenden Gleichstrom erhält man, wenn man den Strom über einen Kommutator (Polwender) abgreift. Das beim Generator wirkende Induktionsgesetz ist eine der drei physikalischen Grundlagen für elektrische Maschinen. Die beiden anderen sind die Lorentzkraft (z. B. Elektromotor) und das Durchflutungsgesetz (z. B. Elektromagnet).

Historisch gesehen war der Bau von Generatoren hoher Leistung ein technisches Problem, denn zu Zeiten der beginnenden Elektrifizierung war dies mit Permanentmagnetrotoren nicht möglich. Erst durch die Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips (durch Werner von Siemens 1866) konnten Generatoren mit Elektromagneten gebaut werden. Auch heute, wo der Bau von Permanentmagnet-Generatoren bis ca. 8 MW gelingt, ist dieses Prinzip für die Generatoren mit mehreren 100 MW bis mehr als 1.600 MW Leistung in Großkraftwerken unverzichtbar.

7 Kernreaktoren

In einem Kernreaktor wird die Bindungsenergie zwischen den Bestandteilen der Atomkerne in thermische Energie umgewandelt. Im Kernreaktor wird diese Energie durch Kernspaltung freigesetzt. Das Prinzip der Kernspaltung durch Beschuss von Uran (U) mit Neutronen wurde 1938 von Otto Hahn und Fritz Strassmann experimentell entdeckt. Lise Meitner – ehemalige Assistentin Albert Einsteins – konnte den Effekt theoretisch klären und beweisen, dass sich die frei werdende Energie nach Einsteins Formel ($E = m \cdot c^2$) als Massendefekt berechnen lässt. Denn die Summe der beteiligten Massen im Kern (Neutronen und Protonen) ist vor der Spaltung etwas größer als die Summe der Massen der Zerfallsprodukte.

Hinweis: Das Thema Kernfusion wird in diesem Leitfaden nicht angesprochen, da dieser nur technisch etablierte Methoden der Energieumwandlung behandelt.

7.1 Grundprinzip der Kernspaltung im Reaktor

Obwohl es verschiedene technische Ausführungen von Kernreaktoren gibt, ist das Grundprinzip immer dasselbe:

Start des Zerfalls durch Neutronenbeschuss des Brennstoffs: In einem Brennstoff (Brennstäbe, z. B. mit ^{235}U) wird durch Neutronenbeschuss die Kernspaltung angeregt. Die Startneutronen stammen z. B. aus einer Berylliumquelle, die bei Beschuss mit Alphateilchen ($^4\text{He}^{2+}$ -Kerne) aus natürlichem Zerfall Neutronen freisetzt. Die Brennstoffatomkerne werden durch den Neutronenbeschuss gespalten und setzen dabei selbst Neutronen frei. Pro eingeschossenem Neutron entstehen bei jeder Spaltung mehrere Neutronen, der Prozess kann also als Kettenreaktion weiterlaufen. In der Atombombe läuft diese Kettenreaktion als ungebremste Lawine bis zur Explosion, im Reaktor als gesteuerte Kettenreaktion zur Wärmeabgewinnung.

Moderation, d. h. Abbremsung der Neutronen: Die meisten bei der Spaltung entstehenden Neutronen sind so schnell, dass sie beim Auftreffen auf weitere Atomkerne „keine Zeit“ zur Wechselwirkung hätten. Die Kettenreaktion käme also zum Erliegen. Um die Neutronen auf eine geeignete Geschwindigkeit (ca. 2.000 m/s) abzubremsen, benötigt man sog. „Moderatoren“ wie Wasser (H_2O), schweres Wasser (D_2O , also Deuterium statt normal schwerem Wasserstoff) oder Grafit.

Regelung des Zerfalls: Mit neutroneneinfangenden Regelsubstanzen wie z. B. Cadmium (Cd), Silber (Ag), Bor (B) oder Indium (In) kann die Anzahl der Neutronen und damit die Rate der Kernspaltungen reguliert werden. Das geschieht durch Regulierstäbe, die zwischen die Brennstäbe einschiebbar sind. Bor wird dazu als Borsäure auch dem Wasser des primären Kühlkreislaufs zugesetzt. Insgesamt wird das Zusammenspiel von Moderation und Regelung so gewählt, dass die Neutronenbilanz („Kritikalität“) minimal höher als 1 ist. Das heißt, pro Spaltung wird im Schnitt etwas mehr als 1 Neutron geeigneter Geschwindigkeit erzeugt, was gerade ausreicht, um die Kettenreaktion im Reaktor aufrechtzuerhalten.

Abführung der Nutzwärme: Bei der Kernspaltung werden 86 % der Energie als kinetische Energie der Neutronen und Spaltprodukte frei. Diese Energie wird auf die Brennstäbe selbst, die Moderatoren und Regulatoren und letztlich auf das Kühlwasser als thermische Energie übertragen. Diese wird für die Dampferzeugung zum Betrieb einer Turbine genutzt.

Kühlung des Dampfturbinenprozesses: Wie bei jeder Wärmekraftmaschine muss auch bei der Dampfturbine ein Teil der zugeführten Wärme ungenutzt über eine Kühlung (Kühltürme) abgeführt werden. Sonst würde nämlich der Tieftemperaturpunkt zu sehr ansteigen und der Wirkungsgrad sinken. Für diesen „externen“ Kühlkreislauf benötigt z. B. das Kernkraftwerk Isar 2 in Niederbayern 42.000 l/s Kühlwasser aus der Isar; das inzwischen abgeschaltete Kernkraftwerk Biblis B entnahm 210.000 m³/h aus dem Main.

7.2 Verschiedene technische Ausführungen von Kernreaktoren

Weltweit arbeiten alle in der Stromversorgung kommerziell eingesetzten Reaktortypen mit abgebremsten („thermischen“) Neutronen. Am meisten verbreitet sind wassergekühlte Reaktoren; bei ihnen dient das Kühlmittel zugleich als „Moderator“, mit dem die Neutronen abgebremst werden.

Man unterscheidet:

- Leichtwasserreaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren), die angereichertes Uran als Brennstoff benötigen.
- Schwerwasserreaktoren; sie können mit natürlichem, nicht angereichertem Uran betrieben werden

Daneben gibt es mit Gas (CO_2 oder Helium) gekühlte Reaktoren, bei denen Grafit als Moderator dient. Im kommerziellen Einsatz sind in Großbritannien die Typen „Magnox“ und „AGR“. Hochtemperaturreaktoren werden bisher nur als Versuchs- und Prototypreaktoren gebaut. In der Entwicklung befinden sich Reaktoren, die mit schnellen, nicht abgebremsten Neutronen arbeiten, sog. Brutreaktoren („schnelle Brüter“).

Zusätzlich zu den genannten Haupttypen gibt es noch verschiedene andere Typen, die derzeit aber keine große Bedeutung haben. Die wichtigsten Vertreter der Leichtwasserreaktoren werden im Folgenden näher erläutert.

Der Druckwasserreaktor ist ein Leichtwasserreaktor, denn er arbeitet mit normalem („leichtem“) Wasser (H_2O , also ohne Deuterium). Die Besonderheit ist der sehr hohe Druck von bis zu 160 bar des Primärkreislaufs im Reaktorkern, sodass sich dort das Wasser bis auf 325 °C erwärmt ohne zu verdampfen. Erst durch Wärmeaustausch mittels Dampferzeuger wird im Sekundärkreislauf dann Dampf von 280 °C und ca. 65 bar erzeugt und der Turbine zugeführt. Der entspannte Wasserdampf wird durch den externen Kühlwasserkreislauf im Kondensator verflüssigt und dann wieder dem Dampferzeuger zugeführt. Der Gesamtwirkungsgrad in Bezug auf die Stromerzeugung liegt bei ca. 35 %. Weltweit haben die Druckwasserreaktoren einen Anteil von ca. 50 % an allen Kernreaktoren. Inzwischen gibt es eine neue Generation der Druckwasserreaktoren, die als European Pressurized Water Reactor (EPR) vom französischen Atomkonzern Areva entwickelt wurde. Die Sicherheit wurde dabei weiter erhöht. Mit vierfachem Kühlkreislauf, vierfacher Redundanz und räumlicher Trennung aller Sicherheitsregelkreise, einem gegen Kerndurchschmelzen gesicherten Fundament sowie einem gegen Anschläge und Flugzeugabstürze gesicherten Containment aus 2,6 m Stahlbeton wird er als einer der sichersten Reaktoren weltweit klassifiziert. Allerdings ist bis heute kein EPR in Betrieb. Im Bau sind seit 2005 bzw. 2007 je eine Anlage in Frankreich (Flamanville) und Finnland (Olkiluoto), wobei die Kosten in Finnland von ursprünglich 3 Mrd. Euro auf 9 Mrd. explodiert sind. Heute geht man davon aus, dass der Neubau eines 1 GW EPR ca. 12 Mrd. Euro kostet.

Auch der **Siedewasserreaktor** ist ein Leichtwasserreaktor (H_2O). Die Besonderheit ist, dass der Druckbehälter im Reaktorkern nur ungefähr zu zwei Dritteln mit Wasser gefüllt ist. Durch die bei der Kernspaltung entstehende Wärme verdampft dort ein Teil des Wassers bei 286 °C und 71 bar. Mit diesem Dampf wird direkt die Turbine angetrieben (dies ist einer der Nachteile dieses Reaktortyps: durch den radioaktiven Dampf wird die Turbine kontaminiert und würde bei einem Störfall im Turbinenhaus austreten). Der entspannte Wasserdampf wird durch den externen Kühlwasserkreislauf im Kondensator verflüssigt und direkt wieder dem Reaktordruckbehälter zugeführt. Der Siedewasserreaktor hat also keinen Sekundärkühlkreislauf. Der Gesamtwirkungsgrad liegt für die Stromerzeugung bei ca. 35 %. Weltweit haben die Siedewasserreaktoren einen Anteil von ca. 30 % an allen Kernreaktoren.

Der Schwerwasserreaktor (Heavy Water Reactor; HWR) verwendet schweres Wasser (D_2O) als Kühlmittel und Moderator im Primärkreislauf. Der Vorteil hierbei ist, dass bei diesem Reaktortyp als Brennstoff natürliches, nicht angereichertes Uran verwendet werden kann. Die Herstellung der Brennelemente ist also kostengünstiger. Da die Neutronen in schwerem Wasser weniger stark absorbiert werden, erzeugt D_2O als Moderator mehr Neutronen geeigneter Geschwindigkeit als H_2O . Der Nachteil ist, dass schweres Wasser sehr teuer ist und auch die bauliche Umsetzung der Schwerwasserreaktoren aufwändiger ist. Deshalb beträgt der Anteil dieses Reaktortyps an allen Kernreaktoren weltweit derzeit nur ca. 9 %.

Der Hochtemperaturreaktor (HTR) wird in verschiedenen Bauarten erprobt. Mit dem in Deutschland entwickelten **Kugelhaufenreaktor** lässt sich eine extrem hohe Nutzungstemperatur bis 950 °C im Primärkreislauf erreichen. Dies wird durch die Nutzung von Heliumgas als Kühlmittel sowie hitzebeständigem Grafit als Moderator und als Grundmaterial der Brennstoffkugeln möglich. Statt Stäben werden tennisballgroße Grafitkugeln mit eingebetteten Brennstoffkörnchen – Uran oder Uran/Thorium – eingesetzt. Der Vorteil: Bei Ausfall der Kühlung sinkt die Leistung infolge steigender Brennstofftemperatur von selbst praktisch auf Null ab, eine Kernschmelze wird unmöglich. Der Kugelhaufenreaktor hat dadurch ein hohes Maß inhärenter Sicherheit. Doch aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten kam dieser Typ über den Bau weniger Prototypen (u. a. in Deutschland) nie hinaus.

Der Brutreaktor soll nicht nur der Energie-„Gewinnung“, sondern vorrangig der Erzeugung von weiterem spaltbarem Material dienen. Nicht spaltbare Stoffe werden durch den Neutronenbeschuss in spaltbare umgewandelt und können anschließend als Kernbrennstoff verwendet werden. Möglich ist dies für das unspaltbare ^{238}U , aus dem spaltbares Plutonium (^{239}Pu) „erbrütet“ wird. Und aus ^{232}Th ließe sich ^{233}U erbrüten. Diese Prozesse lassen sich mit begrenzter Ergiebigkeit auch in thermischen Reaktoren verwirklichen. Den Brutreaktor zeichnet also aus, dass er dadurch, dass er mit schnellen Neutronen arbeitet, mehr Spaltstoff erzeugen kann, als er selbst verbraucht. Doch technisch sind die Brutreaktoren, u. a. wegen der Kühlung mit Natrium (Na), äußerst aufwändig. Auch ist die Ausbeute von wenigen Prozent ^{239}Pu pro Brutdurchgang relativ gering und die Aufbereitung des erbrüteten Materials aufwändig. Da die befürchtete Verknappung des Urans, die in den 1960er Jahren den Anstoß zur Brütererentwicklung gab, ausgeblieben ist und auch für die absehbare Zukunft nicht zu erwarten ist, besteht auf derzeitigem Stand der Technik kein kommerzielles Interesse an Brutreaktoren. Die wenigen Brutreaktoren weltweit werden deshalb nur für die Forschung betrieben.

Der Transmutationsreaktor: In den letzten Jahren interessiert man sich für einen anderen Einsatzzweck des Brutreaktors: Die Umwandlung („Transmutation“) von langlebigen Spaltprodukten und Transuranen in kurzlebige Radioisotope. Energie, die bei der Transmutation frei wird, könnte zur Stromerzeugung genutzt werden. Außerdem würde die Transmutation die Dauer für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen aus Kernkraftwerken „verkürzen“ (wenige hundert Jahre statt viele tausende Jahre). Inwieweit diese Technik die Endlagerungsproblematik wirklich lösen kann, muss die Forschung erst zeigen. Doch die Kosten sind so groß, dass es mit der Verwirklichung eines Transmutationsreaktors nicht vorangeht. Das für 2014 geplante Projekt MYRRHA (Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications) in Belgien soll nun erst in 2023 in Betrieb gehen.

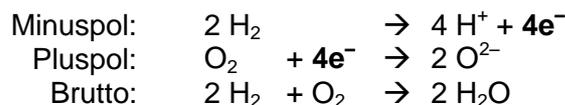
8 Brennstoffzellen

8.1 Elektrische Energie statt Wärme

Wasserstoff und Sauerstoff verbrennen bei Raumtemperatur unter Freisetzung von Wärme praktisch 100%ig zu Wasser. Dieses Wasser kann durch Zuführung von Wärme bei Temperaturen oberhalb von 3.000 °C wieder in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden. Energetisch wird also hier chemische Energie in thermische bzw. thermische Energie in chemische umgewandelt. Doch alle chemischen Reaktionen beruhen letztlich auf Wechselwirkung bzw. Austausch von Elektronen der beteiligten Atome. So entstand die Idee, den direkten „Elektronenfluss“ bei der chemischen Reaktion zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoffatomen zu unterbinden und die Elektronen stattdessen über einen äußeren Nutzstromkreis zu führen. Statt Wärme stünde dann dieser Stromfluss, also elektrische Energie, zur Verfügung.

8.2 Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle

Zur kalten Verbrennung von Wasserstoff baut man ein Primärelement (elektrochemische Zelle), bei dem eine Elektrode aus Wasserstoff (H) und die andere aus Sauerstoff (O) besteht. Da Gase Isolatoren sind, nutzt man einen technischen Trick: Platinelektroden, die mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff umspült sind. Platin (Pt) reagiert selbst nicht, hat aber die Eigenschaft H₂-Moleküle katalytisch in Atome aufzuspalten und diese dann zu lösen. Auch die O-Atome werden von Pt katalytisch in Atome aufgespalten und adsorbieren an seiner Oberfläche.



Am Minuspol treten die gelösten H-Atome aus der Pt-Oberfläche als H⁺-Ionen (Protonen) aus und wandern durch einen Elektrolyten oder eine protonenpermeable Membran zum Pluspol. In der Elektrode bleibt pro H-Atom ein Elektron zurück und diese Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis zum Pluspol.

Am Pluspol nehmen an der Oberfläche des Pt die O-Atome jeweils zwei Elektronen auf und werden zu O²⁻-Ionen; dabei entstehen jeweils zwei positive Ladungen in der Elektrode. Jeweils zwei der durch Elektrolyt/Membran zum Pluspol gewanderten H⁺-Ionen treffen dort auf jeweils ein O²⁻-Ion und reagieren zusammen zu H₂O. Die über den äußeren Stromkreis zum Pluspol geflossenen Elektronen rekombinieren dort mit den positiven Ladungen. Brutto findet also dieselbe Reaktion statt wie bei der Verbrennung, nur dass die Elektronen in der Brennstoffzelle über den äußeren Stromkreis geflossen sind.

8.3 Technische Probleme bei Hochleistungsstromzellen

Stehen Wasserstoffgas, Pt-Elektroden und eine Polymer Electrolyte Membran (PEM) zur Verfügung, ist eine Brennstoffzelle dieser Art in jedem Schullabor in Minutenschnelle aufgebaut (siehe Experimentiervorschlag auf dem Medienportal). Doch diese bei Raumtemperatur laufenden PEM-Brennstoffzellen sind relativ teuer und haben nur relativ geringe Leistungen bis ca. 500 kW. Für größere Leistungen bräuchte man so große Pt-Elektrodenflächen und Membranen, dass die Zellen unbezahlbar werden würden.

Derzeit wird fieberhaft daran geforscht, das teure Platin durch andere billigere Katalysator-Materialien zu ersetzen. So werden z. B. metallorganische Verbindungen erprobt. Sollte das gelingen, könnte Wasserstoff in Kombination mit der Brennstoffzelle eine Alternative zu den batteriebetriebenen Elektroautos werden.

Brennstoffzellen bis zu 100 MW baut man deshalb heute meist als Hochtemperatur-Festelektrolyt-Brennstoffzellen (engl. Kurzname Solid Oxide Fuel Cell, SOFC; in der Fachsprache findet man oft auch die Bezeichnungen „Festoxid-Brennstoffzellen“ oder „Festkeramik-Brennstoffzellen“). Bei der SOFC bestehen beide Elektroden aus einem bei hohen Temperaturen ionen- und elektronenleitenden Oxid. Die Elektrolytmembran besteht aus einem selektiv für Sauerstoffionen durchlässigen Oxid. Das macht die Konstruktion robust und relativ kostengünstig. Ein Nachteil ist jedoch die hohe Betriebstemperatur von über 800 °C, da die Oxidmaterialien erst bei dieser Temperatur die nötigen Eigenschaften zeigen. Es gibt auch noch andere Technologien im Entwicklungsstadium, sodass noch nicht klar ist, welche sich langfristig durchsetzen wird.

Inzwischen gibt es kleinere Blockheizkraftwerke (BHKW) in SOFC-Brennstoffzellentechnik mit bis 20 kW Wärmeleistung als Heizungsanlagen für Einfamilien- oder kleinere Mehrfamilienhäuser.

9 Synthesegaserzeuger

Feste oder Feststoffbeimengungen enthaltende Brennstoffe wie Steinkohle, Braunkohle, Bitumen, schweres Heizöl, Raffinerierückstände oder Holz sind für den Betrieb von Gasturbinen nicht oder schlecht geeignet. Um sie auch dafür verwenden zu können, werden sie in „Synthesegas“ umgewandelt („vergast“). Dieses Synthesegas, eine Mischung vor allem aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), wird so bezeichnet, da es historisch im zweiten Weltkrieg als Ausgangsstoff für die Synthese anderer chemischer Verbindungen wie z. B. Methanol und Benzin verwendet wurde. Bei dem „Vergasen“ im Synthesegasprozess handelt es sich – anders als beim Vergaser im Ottomotor – nicht um eine Phasenwandlung, sondern um eine chemische Reaktion. Es wird bei der Synthesegaserzeugung auch nicht eine Energieform in eine andere umgewandelt. Sowohl im festen als auch im vergastem Brennstoff ist chemische Energie gespeichert, allerdings in Form anderer Verbindungen: Aus festem Kohlenstoff bzw. festen oder flüssigen Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen durch Reaktion mit wenig Sauerstoff und Wasser gasförmige Verbindungen (Chemie: Teiloxidation der Kohle, Reduktion des Wassers). Bei einem typischen Prozess dieser Art erhält man aus Steinkohle z. B. ca. 31 % Wasserstoff (H₂), 56 % Kohlenmonoxid (CO), 5 % Stickstoff (N₂), 4 % Kohlendioxid (CO₂) und 4 % Wasser (H₂O). Das ist ein Gasgemisch, das einen deutlich niedrigeren Heizwert als Erdgas besitzt. Die restlichen gasförmigen Verunreinigungen wie Schwefel und Halogenverbindungen und auch alle festen mineralischen Bestandteile lassen sich aus dem Synthesegas bereits bei der Erzeugung fast zu 100 % mit relativ geringem Aufwand entfernen.

Heute wird Synthesegas zum Betrieb von kombinierten Gas- und Dampfturbinenkraftwerken (GuD) verwendet. Man spricht dann von einem IGCC-Kraftwerk (Integrated Gasification Combined Cycle). Das erzeugte Synthesegas würde sich zwar auch zur Dampferzeugung in einem Dampfkraftwerk eignen, doch der Wirkungsgrad wäre geringer als beim GuD. Das hochreine Synthesegas eignet sich dagegen hervorragend zum Betrieb der Gasturbinenstufe des GuD-Kraftwerks und hat ähnlich gute Abgaswerte wie reines schwefelfreies Erdgas.

Im Bereich der regenerativen Energien wird heute Synthesegas aus der Vergasung von Biomasse (z. B. Stroh, Holz, Klärschlamm) eingesetzt. Auch moderne Holzheizungen für Einfamilienhäuser arbeiten mit Holzvergasung, da dann das Abgas praktisch frei von Staub, Ruß und Gerüchen ist.

10 Windräder

Ein Windrad wandelt die **mechanische Bewegungsenergie der Luft in mechanische Rotationsenergie** eines Rotors um, der sie über einen Generator in elektrische Energie umwandelt.

10.1 Die Physik des Windrads

Luftteilchen durchströmen mit der Geschwindigkeit v eine Kreisfläche (senkrecht zur Windrichtung) mit Radius r in der Zeit t .

Die durchgeströmte Masse (m) beträgt:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot v \cdot t = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v \cdot t$$

ρ : Dichte der Luft,

V : Luftvolumen,

A : durchströmte Rotorfläche ($\pi \cdot r^2$),

v : Windgeschwindigkeit vor dem Windrad

w : Windgeschwindigkeit hinter dem Windrad

c_p : Wirkungsgrad,

t : Zeit

Die kinetische Energie (E_{kin}) des Winds ist:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot t \cdot v^3$$

Die Leistung (P_{Wind}) des Winds ist:

$$P_{\text{Wind}} = \frac{E_{\text{kin}}}{t} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot v^3$$

Abgabeleistung P der Windturbine:

$$P = c_p \cdot P_{\text{Wind}} = c_p \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot r^2 \cdot v^3$$

Die Leistung steigt also mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit v !

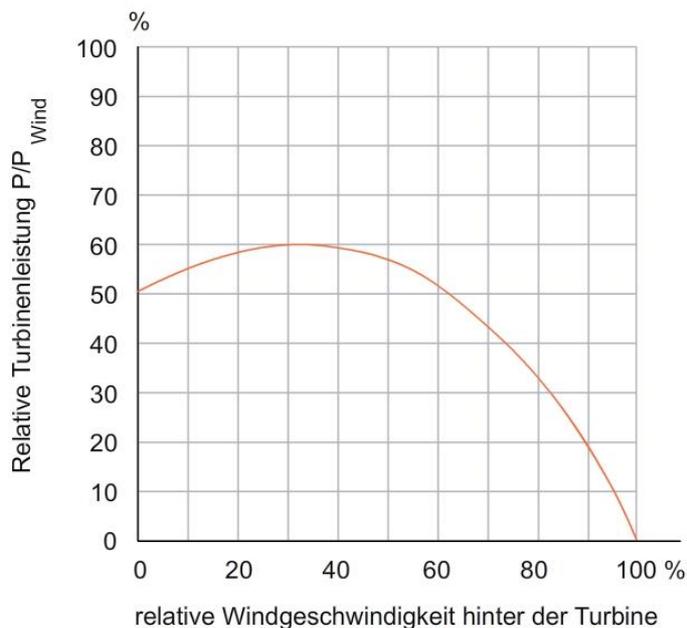
So weit ist die Berechnung des Energieumsatzes kein Problem. Doch wie wird die Energie des Winds optimal auf das Windrad übertragen? Hierzu gibt es zwei Typen: die Widerstandsläufer und die Auftriebsläufer.

Beim „Widerstandsläufer“ stößt der Luftstrom das Rotorblatt des Windrads weg, ähnlich wie das Wasser das Schaufelblatt bei der Pelton-Turbine. Doch die meisten Windräder arbeiten wegen des besseren Wirkungsgrads als „Auftriebsläufer“. Das Prinzip der Auftriebsläufer ist dasselbe, das auch die Bewegung der Schaufeln in der Gasturbine bewirkt (siehe dort). Um die Propeller eines Windrads optimierend zu berechnen, bedarf es also der Gesetzmäßigkeiten der Strömungsmechanik (siehe das Kapitel über „Turbinen“). Didaktisch interessant ist es, das Problem des Auftriebs qualitativ anhand folgender Gedankenreihe durchzuspielen: Auftrieb am Flügel eines Segelflugzeugs – Auftrieb am Flügel eines Motorflugzeugs – Vortrieb am Propeller eines Motorflugzeugs – Rotation eines Windradpropellers im Luftstrom.

Interessant ist die Frage, ob überhaupt 100 % der im Wind enthaltenen Strömungsenergie ans Windrad übertragen werden können. Das Betz'sche Gesetz (Albert Betz 1926) besagt, dass theoretisch maximal 59,3 % übertragen werden können. Das wird an folgender Überlegung deutlich: Die Leistung einer Windturbine hängt davon ab, wie viel der kinetischen Energie des Winds ($E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$) auf die Propeller übertragen wird, wie sehr sich also die Luft abbremst. Bremst sie stark ab, dann ist die Windgeschwindigkeit hinter der Turbine gering. Die Kraft auf die Turbine war groß, aber der Massendurchsatz gering. Ist die Windgeschwindigkeit hinter der Turbine hoch, war die Kraft gering, aber der Massendurchsatz groß. Hieraus muss unter Beachtung der Erhaltung von

Energie und Masse das Optimum gefunden werden.

Wenn dem Wind durch die Turbine Leistung entnommen wird, verlangsamt er sich. Trotz der geringeren Geschwindigkeit hinter der Anlage muss die gleiche Menge Luft abtransportiert werden, wie vorn angeströmt ist. Nach dem Erhaltungssatz muss jedoch der Massenstrom gleich bleiben. Bei einem frei angeströmten Windrad weitet sich deshalb der Wind hinter dem Windrad auf. So kann auch bei verringerter Geschwindigkeit dieselbe Masse passieren. Blicke die Luftmasse abgebremst im selben Querschnitt, würde der Nachfluss durchs Windrad zusätzlich abgebremst. Das Optimum kann man aus der Ableitung der entsprechenden Funktionen finden. Das Ergebnis der Maximierung ist als Grafik dargestellt.



Wie die Grafik zeigt, beträgt der maximale Wirkungsgrad einer Windkraftturbine 59,3 %. Dieser wird erreicht, wenn die Windgeschwindigkeit hinter der Turbine genau $\frac{1}{3}$ der Windgeschwindigkeit vor der Turbine beträgt. Moderne Windräder werden heute so konstruiert, dass diese „Abbremsung“ der Windgeschwindigkeit möglichst erreicht wird. Ihr Wirkungsgrad liegt bei ca. 50 %.

10.2 Bauarten der Windräder

Man kann die Windenergieanlagen (WEA) bzw. Windräder danach unterscheiden, wie die Achse des Rotors zum Luftstrom steht. Windräder mit vertikaler Rotationsachse, sog. „Darrieus-Rotoren“ oder „Savonius-Rotoren“, haben sich im Einzelfall bewährt, wurden aber nicht zur Masselösung. Am häufigsten sind heute die Windräder mit horizontaler Rotationsachse. Was die Anzahl der Rotorblätter betrifft, sind Ein-, Zwei-, Drei-, Vier- oder gar Fünfblattrotoren möglich. Am häufigsten sind heute Dreiflügelwindräder, auch Dreiblattrotoren genannt. Sie können aufgrund ihrer Symmetrie besonders schwingungsarm gebaut werden. Vier- oder fünfblättrige Rotoren würden zwar evtl. eine höhere Leistung und einen besseren Wirkungsgrad erreichen, aber dieser Zugewinn stünde in keinem Verhältnis zu den Kosten für die zusätzlichen Rotorblätter. Die Rotorblätter sind aus leichten, aber hochfesten Verbundmaterialien gefertigt, wie sie auch im Flugzeugbau eingesetzt werden. Die Belastungen sind nämlich enorm: Die Umlaufgeschwindigkeit an der Spitze des Rotorblatts beträgt ca. das 7fache der Windgeschwindigkeit!

10.3 Probleme der Stromerzeugung mit Windrädern

Auf der Achse des Rotors oder über ein Getriebe verbunden befindet sich der Stromgenerator. Damit der Generator Strom konstanter Frequenz erzeugt, muss er mit einer ganz bestimmten konstanten Drehzahl betrieben werden. Für 50 bis 60 Hz Netzfrequenz wären das z. B. bei einem Zweipolgenerator 1.500 U/min. Dieser Gleichlauf scheint aber aufgrund der ungleichmäßig we-

henden Winde fast unmöglich. In gewissem Umfang können die Schwankungen der Windgeschwindigkeit über Regelungen der Rotorblattstellung und des Getriebes ausgeglichen werden. Modernste Windräder arbeiten zusätzlich mit bis zu 36-poligen Generatoren. Je nach Windstärke werden Pole zu- oder abgeschaltet, so kann das gesamte Windspektrum fast lückenlos genutzt werden. Alternativ werden jedoch für Windräder getriebelose Permanentmagnet-Generatoren in Kombination mit leistungselektronischen Einspeiseeinheiten angeboten. Da sie mit Stromrichtern den erzeugten Wechselstrom zunächst in Gleichstrom und dann wieder in Wechselstrom konstanter Frequenz und Spannung umwandeln, wird die Stromerzeugung unabhängig von der Windgeschwindigkeit und der Drehzahl des Generators. Durch den Wegfall des Getriebes entfällt ein Verschleißteil, somit werden die Gondeln der Windräder kleiner und leichter.

11 Solarzellen

Eine Solarzelle wandelt die **Strahlungsenergie der Sonne** (Energie der elektromagnetischen Wellen) **in elektrische Energie** um. Diesen Prozess nennt man auch Photovoltaik. (Wir schlagen vor, statt **Fotovoltaik** das nach Duden ebenfalls zulässige **Photovoltaik** zu verwenden. Das ist nicht nur international üblich, sondern ist auch kompatibel zu den in der deutschen Fachsprache üblichen Abkürzungen PV-Strom oder PV-Anlage.)

Als Erstes wurden Solarzellen zur Stromerzeugung von Satelliten eingesetzt. Erst Ende der 1970er Jahre gab es die ersten Photovoltaik-Kraftwerke auf der Erde. Heute erscheint die Photovoltaik als eine der zukunftsträchtigsten Energie-„Gewinnungs“-Technologien überhaupt. Anders als Wind- oder Wasserkraft ist sie wesentlich weniger ortsgebunden und kann theoretisch in fast allen Gegenden der Erde eingesetzt werden.

Auch ist Photovoltaik inzwischen sehr preisgünstig geworden. 2005 kostete 1 Watt Solarmodul noch ca. 4 Euro, 2016 gab es 1 W ab ca. 0,40 Euro. So konnte 2016 mit einer 5 kWp-Hausdachanlage der Strom unsubventioniert für ca. 10 Cent/kWh erzeugt werden. Neu gebaute Solarparks kamen 2016 in Deutschland sogar auf 7 Cent/kWh.

11.1 Die Physik der Solarzelle

Die Photovoltaik kann prinzipiell als Zweielektrodenprozess beschrieben werden. Dieser läuft schematisch bei der Siliziumzelle folgendermaßen ab:

An der positiven Elektrode (dotierter Halbleiter) entfernt das Licht durch Anregung Elektronen aus dem Valenzband, was positive Löcher (Ladungen) hinterlässt. Diese Elektronen gehen durch eine nicht leitende Trennschicht über in das Leitungsband der negativen Elektrode (dotierter Halbleiter) und laden diese negativ auf. Von der negativen Elektrode können die Elektronen dann über den äußeren Nutzstromkreis wieder zum Pluspol zurückfließen.

11.2 Warum ist der Wirkungsgrad der Solarzellen so schlecht?

Wegen der Quantisierung der Energie kann die Solarzelle Licht nicht bei allen im Lichtspektrum enthaltenen Frequenzen absorbieren. Stattdessen erfolgt die Absorption in relativ schmalen Energiebändern, die nur wenigen Wellenlängen des Lichtspektrums entsprechen. Die nachfolgend aufgeführten Solarzellentypen haben noch alle diesen Nachteil. Durch Kombination von Solarzellenschichten aus verschiedenen Materialien oder aus Halbleitern mit verschiedener Dotierung oder durch zusätzliche Schichten aus fluoreszierenden Farbstoffen versucht man derzeit, die Absorptionsbandbreite und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

11.3 Solarzellentypen

Je nach Material, Kristallisationszustand und Schichtdicke lassen sich derzeit folgende Typen als wichtigste unterscheiden:

Dickschicht-Siliziumzellen einkristallin

Wirkungsgrad in Serie bis zu 26 %, im Labor bis 40 %,
sehr lange Haltbarkeit (30 Jahre und mehr),
teurer als polykristalline oder amorphe Siliziumzellen

Siliziumzellen polykristallin

Wirkungsgrad in Serie bis zu 19 %,
sehr lange Haltbarkeit,
Herstellung günstiger als monokristalline Zellen

Amorphe Dünnschicht-Siliziumzellen

Wirkungsgrad in Serie bis zu 10 %,
sehr lange Haltbarkeit,
Herstellung günstiger als monokristalline und polykristalline Zellen

Cadmium-Tellurid-Zellen (CdTe)

Wirkungsgrad bis zu 14 % in Serie, über 20 % im Labor,
lange Haltbarkeit,
Herstellung billiger als bei Si-Zellen,
Wegen des Gehalts an Cadmium und Tellur sind Entsorgung bzw. Recycling problematischer als bei Siliziumzellen.

Kupfer-Indium-Diselenid (CIS, CIGS)

Wirkungsgrad bis zu 14 % in Serie, über 20 % im Labor,
Sehr dünn, semitransparent, geeignet für Glasfassaden, gute Ausbeute auch bei diffusem Licht
lange Haltbarkeit,
Herstellung 50 % billiger als bei mono- und polykristallinen Si-Zellen,
Entsorgung wegen des Selengehalts evtl. problematisch

Gallium-Arsenid-Zellen (GaAs)

Wirkungsgrad bis zu 40 % (derzeit nicht in Serienproduktion),
lange Haltbarkeit,
Herstellung teurer als Si-Zellen

Organische Solarzellen (aus Halbleiterkunststoff)

Wirkungsgrad bis zu 7 % in Serie, über 14 % im Labor,
sehr dünn und flexibel, bis zu 40 % Transparenz, geeignet für Glasfassaden, aber zu wenig haltbar,
Haltbarkeit 5–10 Jahre,
Herstellung billiger als alle anorganischen Zellen

Farbstoffzellen

Wirkungsgrad bis zu 15 % im Labor,
gute Transparenz, geeignet für Glasfassaden, aber noch zu geringe Haltbarkeit, deshalb noch

nicht im Handel,
Herstellung wäre billiger als alle anderen Zellen,
Sie werden nach ihrem Erfinder auch Graetzelzellen genannt.
Farbstoffzellen nutzen als positive Elektrode organische Farbstoffe, von der durch Licht angeregte Elektronen zu einer halbleitenden Titanoxidelektrode (negative Gegenelektrode) übergehen.

11.4 Klima- und Ökobilanz sowie Energieeffizienz von Solarzellen

Hierzu sind einige grob verfälschende Behauptungen im Umlauf, von denen die wichtigsten drei im Folgenden widerlegt werden.

Behauptung: „Solarzellen verbrauchen bei der Herstellung mehr Energie als sie je wieder produzieren.“

Richtig ist: Die energetische Amortisation von Solarzellen liegt heute bei 12 bis 18 Monaten. Bei einer Lebensdauer bis zu 30 Jahren ist dies also kein Problem. Übrigens können auch Solarzellen mit regenerativer Energie gefertigt werden.

Behauptung: „Solarzellen enthalten giftige Substanzen, die bei der Herstellung, Entsorgung oder beim Recycling die Umwelt belasten.“

Richtig ist: Bei der Herstellung aller Solarzellentypen gibt es Produktionsstufen mit gefährlichen chemischen Substanzen. Das ist übrigens bei den in Smartphones, Getränke- und Lebensmittelverpackungen oder bei Autos verwendeten Materialien ebenso der Fall. Werden diese Stoffe jedoch wie vorgeschrieben in abgeschlossenen Prozessen verwendet, ist die Produktion von Solarzellen nicht bedenklicher als die Produktion von Joghurtbechern. Dasselbe gilt auch für die Entsorgung und das Recycling. Speziell die am häufigsten verwendeten Siliziumzellen sind bei der Entsorgung völlig harmlos. Die oft zitierten gefährlichen Dotierungsstoffe Arsen und Bor sind nur im ppm-Bereich enthalten und chemisch fest gebunden, sodass sie sogar bei der Entsorgung auf der Deponie nicht ins Grundwasser gelangen könnten.

Behauptung: „Solarzellen sind mit nur 20 % Wirkungsgrad sehr ineffizient.“

Richtig ist: Der Wirkungsgrad eines Pkws mit Verbrennungsmotor ist mit ca. 10 % (was vom Treibstoff zur Fortbewegung umgesetzt wird) sehr gering. Doch der Treibstoff kostet und das Auto verursacht Abgase. Dagegen ist die Sonne kostenlos und die Solarzelle verursacht weder Abgase noch Lärm. Das gilt auch im Vergleich zur landwirtschaftlichen Erzeugung von Energie-Nutzpflanzen: Ein Hektar Solarfeld produziert 10-mal mehr Energie als 1 Hektar Maisfeld. Darüber hinaus verunreinigt die Stickstoffdüngung des Maisfelds das Grundwasser mit Nitrat und die Luft mit dem Treibhausgas Distickstoffoxid, dazu kommt die Belastung durch Herbizide und Pestizide.