

Regenerative Energien

1	Was sind regenerative Energien?	3
1.1	Welche regenerativen Energieträger gibt es?	3
1.2	Haben regenerative Energieträger prinzipielle Vor- oder Nachteile?	3
2	Begrenztheit der Ressourcen.....	4
2.1	Wie hoch ist der Anteil regenerativer Energieträger heute?	4
2.2	Wie weit reichen die fossilen und nuklearen Ressourcen?.....	4
2.3	Wie wirkt sich die Klimaänderung auf die Energieressourcen aus?.....	5
3	Sonnenenergie als Urquelle.....	5
4	Biomasse.....	5
4.1	Was heißt Biomasse?.....	5
4.2	Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Biomasse.....	6
4.3	Bei Biomasse eingesetzte Technologien.....	6
4.4	Nachteile und Grenzen der Biomasse.....	6
5	Wasser	7
5.1	Was ist Wasserkraft?	7
5.2	Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Wasserkraft	8
5.3	Bei Wasserkraft eingesetzte Technologien	8
5.4	Nachteile und Grenzen der Wasserkraft	9
6	Wind	10
6.1	Was ist Windenergie?	10
6.2	Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Windenergie	10
6.3	Bei Windkraft eingesetzte Technologien	10
6.4	Nachteile und Grenzen der Windenergie	10
7	Sonnenwärme (Solarthermie)	11
7.1	Was ist Sonnenwärme bzw. Solarthermie?.....	11
7.2	Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Solarthermie	11
7.3	Bei Solarthermie eingesetzte Technologien	12
7.3.1	Sonnenwärme direkt mit Kollektoren nutzen.....	12
7.3.2	Sonnenwärme indirekt mit Wärmepumpen nutzen.....	13
7.3.3	Sonnenwärme durch bauliche Maßnahmen nutzen	13
7.3.4	Thermische Sonnenkraftwerke	14
7.4	Nachteile und Grenzen der Solarthermie	14
8	Sonnenlicht (Photovoltaik)	15
8.1	Was ist Photovoltaik?.....	15
8.2	Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Photovoltaik	15
8.3	Bei Photovoltaik eingesetzte Technologien.....	16
8.4	Nachteile und Grenzen der Photovoltaik	16
9	Geothermie.....	17
9.1	Was ist Geothermie?	17
9.2	Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Geothermie.....	17
9.3	Bei Geothermie eingesetzte Technologien.....	18
9.4	Nachteile und Grenzen der Geothermie.....	18
10	Energiespeicherung	18
10.1	Speicher für thermische Energie.....	18

10.2	Speicher für mechanische Energie	19
10.3	Chemische Energiespeicher	20
10.4	Elektrische Energiespeicher.....	21
10.5	Magnetische Energiespeicher.....	21

Dieser Leitfaden gibt eine umfassende Einführung in das Thema „regenerative Energien“. Dabei werden die verschiedenen regenerativen Energien bezüglich der Reihenfolge nach ihrer historischen Nutzung durch den Menschen gegliedert. Zu jeder Energieart werden jeweils folgende Kriterien beleuchtet:

- **Erläuterung**
Definition und Erklärung des Energieträgers, ggf. historische Aspekte.
- **Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial**
Wie viel von diesem Energieträger steht weltweit in welcher geografischen Verteilung zur Verfügung? Welcher Anteil der bislang genutzten fossilen und nuklearen Energieträger könnte in welchem Zeitrahmen durch diesen regenerativen Energieträger ersetzt werden?
- **Eingesetzte Technologien**
und deren wichtigste naturwissenschaftliche Hintergründe.
- **Nachteile und Grenzen**

Hinzu kommt noch ein Kapitel über die für regenerative Energien besonders wichtige Energiespeicherung.

1 Was sind regenerative Energien?

Regeneration heißt wörtlich „Wiederherstellung“. Ein regenerativer Energieträger „erneuert“ sich also sozusagen von selbst. Das gibt es streng genommen nicht, denn Energie lässt sich weder erzeugen, noch verbrauchen, noch erneuern – sondern nur umwandeln.

Dennoch ist die Sprachregelung, bestimmte Energieträger als „erneuerbar“ zu bezeichnen, korrekt. Denn es sind Energieträger, bei denen nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich viel und für extrem lange Zeit mehr Energie nachfließt, als der Mensch nutzen kann. So gesehen ist es z. B. egal, ob Holz verbrannt wird, wenn aufgrund der Sonnenstrahlung Bäume nachwachsen; oder ob z. B. die Sonnenstrahlung das Erdreich aufheizt, dem dann die Wärmepumpe Wärme entzieht, die aber die Sonne wieder nachliefert; oder ob eine Photovoltaikanlage ständig Strahlung in elektrische Energie umwandelt, denn die Sonne scheint ja noch 5 Mrd. Jahre.

Der Begriff „regenerative Energieträger“ entstand im Gegensatz zu den fossilen und nuklearen Energieträgern, die in absehbarer Zeit durch den Menschen verbraucht sein werden. Regenerative Energieträger sind dagegen nach menschlichen Maßstäben nahezu unerschöpflich.

1.1 Welche regenerativen Energieträger gibt es?

Zu den regenerativen Energieträgern zählen:

- Sonnenlicht (Photovoltaik)
- Sonnenwärme (Solarthermie inklusive oberflächennahe Geothermie)
- Biomasse (Pflanzen, Holz, Biogase)
- Wasser (Wasserkraft)
- Wind
- Geothermie (Tiefengeothermie)

1.2 Haben regenerative Energieträger prinzipielle Vor- oder Nachteile?

Als Vorteil der regenerativen Energien wird neben ihrer Unbegrenztheit oft auch aufgeführt, dass sie homogen auf der Erde verteilt seien. Im Gegensatz zu den fossilen und nuklearen Energieträgern wie Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran trifft das scheinbar zu. Doch bei genauer Betrachtung stehen z. B. auch Wasserkraft und Wind nicht in allen Regionen der Erde in gleichem Umfang zur Verfügung. Auch die Sonnenstrahlung ist in vielen Regionen als Solarthermie zumindest zur

Stromgewinnung nicht wirtschaftlich nutzbar. Dieser Vorteil ist also bestenfalls ein relativer! Die Nutzung regenerativer Energien kann jedoch ein eindeutiger Vorteil für die jeweilige Volkswirtschaft sein, denn sie verringert die Abhängigkeit von Energieimporten. So lag 2005 z. B. die Importabhängigkeit für Rohöl in der Europäischen Union (EU) bei ca. 80 % und in den USA bei ca. 66 % (Quellen: EU-Grünbuch Energiesicherheit und Auswärtiges Amt der BRD).

Als Nachteil der regenerativen Energien wird oft ihre geringe „Leistungsdichte“ zitiert. In gewisser Hinsicht stimmt das, denn das Sonnenlicht vergangener Jahrmillionen wird sozusagen in kumulierter konzentrierter Form als Erdöl, Erdgas oder Kohle genutzt. Um zum Beispiel 3,5 MWh elektrische Energie zu gewinnen, benötigt ein Kohlekraftwerk ca. 1 t Kohle, aber eine gut 1 ha große Photovoltaikanlage in Mitteleuropa einen durchschnittlichen Sonnentag. Doch andererseits erfordert die wirtschaftliche Nutzung z. B. des fossilen Energieträgers Kohle oder des nuklearen Energieträgers Uran sehr große zentrale Kraftwerke. Wind- und Photovoltaik können dagegen auch in relativ kleinen, dezentral verteilten Anlagen wirtschaftlich sein. Wenn man z. B. auch die Fassaden großer Bürogebäude und Fabrikationshallen nutzen würde, könnte fast der komplette Energiebedarf eines mitteleuropäischen Landes allein mit Photovoltaik abgedeckt werden. Mit einem nicht subventionierten Stromgestehungspreis von ab 7 Cent/kWh ist Photovoltaik inzwischen (2016) bereits kostengünstiger als Gasturbinenstrom. Onshore Windstrom aus neuen optimal platzierten Windrädern ist mit 4,5 Cent/kWh bereits zur günstigsten Stromquelle geworden. Die schwankende Verfügbarkeit regenerativer Energieträger wie Wasser, Wind und Sonne ist im Vergleich zu den herkömmlichen Energieträgern wie Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran ebenfalls nachteilig. Diese Unregelmäßigkeiten in der Stromerzeugung muss durch Ausbau der Stromnetze und Aufbau von Energiespeichern kompensiert werden.

2 Begrenztheit der Ressourcen

2.1 Wie hoch ist der Anteil regenerativer Energieträger heute?

Im Jahr 2014 wurden bereits 22 % des weltweiten Verbrauchs an Primärenergieträgern durch regenerative Quellen gedeckt. Davon ist der größte regenerative Anteil noch Biomasse. Allerdings lag 2005 bei der Erzeugung elektrischer Energie („Strom“) der Anteil der regenerativen Wasserkraft weltweit bei immerhin 16 %. Der Anteil des Verbrauchs fossiler und regenerativer Energieträger verteilt sich auch ganz unterschiedlich auf die Bereiche Industrie, Verkehr und private Haushalte. So lag der Anteil des Erdöls am gesamten Energieverbrauch im Jahr 2001 in den USA bei insgesamt 28 %, im Verkehr aber bei 70 %.

2.2 Wie weit reichen die fossilen und nuklearen Ressourcen?

Bei optimistischer Schätzung aus dem Jahr 2005 reichen nach Zahlen der IEA (International Energy Agency) die weltweiten Vorräte der nicht-regenerativen Energieträger bei Kohle ca. 190 Jahre, bei Erdöl ca. 40 Jahre, bei Erdgas ca. 60 Jahre und bei Uran ca. 100 Jahre. Weitere statistische Zahlen und Übersichten findet man im Medium (Sachinformation) „Energieträger im Überblick“. Nach neuesten Untersuchungen der IEA im Jahr 2007 wird der Weltenergieverbrauch bis 2030 aber nochmals um ca. 60 % zunehmen, was noch nicht berücksichtigt war. Deshalb gehen Skeptiker von wesentlich kürzeren Reichweiten aus, zumal nicht gesichert ist, ob die Wirtschaftlichkeit bei der Ausbeutung bislang ungenutzter Lagerstätten wirklich gegeben sein wird. Denn wenn der technische Aufwand bei der Gewinnung der fossilen Energieträger steigt, steigen auch die Kosten und damit die Preise. Ob aber Industrie und Endverbraucher die Preise zahlen können, ist fraglich. So kam es z. B. bereits 2007 wegen der gestiegenen Preise für Stahl und Kohle zu einer Wirtschaftskrise, die aber wegen der darauf folgenden Finanzkrise kaum wahrgenommen wurde.

2.3 Wie wirkt sich die Klimaänderung auf die Energieressourcen aus?

Bei der Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas wird Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt, was zur Verstärkung des Treibhauseffekts und damit des weltweiten Temperaturanstiegs beiträgt. Deswegen ist die Politik international bemüht, den Verbrauch fossiler Brennstoffe einzuschränken bzw. sie effektiver zu nutzen und mittel- und langfristig durch regenerative Energieträger zu ersetzen. Denn Sonne, Wind, Wasser und Geothermie setzen bei ihrer Nutzung kein Kohlendioxid frei, oder sind wie Biomasse zumindest CO₂-neutral. Dies gilt prinzipiell auch für die Kernenergie, bei der jedoch die Problematik der radioaktiven Abfälle besteht. Jedenfalls drängt die Zeit weit stärker als allgemein bekannt. Zur Nutzung der herkömmlichen Energieträger – sowohl fossile als auch nukleare – werden thermische Kraftwerke eingesetzt. Diese benötigen Kühleinrichtungen. Zur Kühlung wird derzeit meist Flusswasser eingesetzt, denn Luft- oder Meerwasserkühlung ist zwar technisch möglich, aber aufwändiger und teurer. Fällt aber das kostengünstige Flusswasser aufgrund der Klimaänderung zunehmend aus, werden große thermische Kraftwerke in herkömmlicher Kühltechnik immer öfter stillstehen. Im heißen Sommer 2006 standen z. B. fast alle französischen Kernreaktoren still und Frankreich musste für bis zu 2 Euro/kWh regenerativen Strom aus Deutschland kaufen. Auch im trockenen Sommer 2015 standen die meisten Braunkohlekraftwerke in Polen still, auch hier war regenerativer Strom aus Deutschland die Rettung. Klimabedingt wird sich also der Einsatz herkömmlicher Energieträger in thermischen Kraftwerken, Kernkraftwerken und Flusswasserkraftwerken verteuern. Der Einsatz regenerativer Energieträger wird dagegen immer wirtschaftlicher.

3 Sonnenenergie als Urquelle

Bis auf die Tiefengeothermie ist die Urquelle sämtlicher regenerativer Energieträger auf der Erde die Sonne bzw. deren Strahlung. Das gilt für die über Photosynthese aus Sonnenstrahlung gebildete Biomasse, für den durch die Sonnenwärme bewirkten Wasserkreislauf und die damit nutzbare Wasserkraft und auch für die durch Sonnenwärme entstehenden Winde. Darüber hinaus kann die Sonnenstrahlung auch direkt als Wärme (Solarthermie) oder über die Photovoltaik als elektrische Energie genutzt werden. Die von der Sonne eingestrahlte Energie ist mit Abstand die größte Quelle des regenerativen Energieangebots. Die Sonne strahlt pro Jahr im weltweiten Durchschnitt eine Energiemenge von ca. $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh ($5,6 \cdot 10^{24}$ J) auf die Erdoberfläche ein. Das ist mehr als das 10.000fache des Weltbedarfs an Primärenergie. Im Ranking der regenerativen Energien folgen dann die Erdwärme (tiefe Erdwärme) und die Gezeitenenergie (Mondeinwirkung bzw. Erdrotation).

4 Biomasse

Der älteste vom Menschen genutzte Energieträger überhaupt ist die Biomasse. Traditionell nutzte der Mensch seit der Entdeckung des Feuers zunächst nur die regenerative Biomasse in Form von Holz und später in holzarmen Steppengebieten auch den Dung seiner Haustiere als Brennmaterial.

4.1 Was heißt Biomasse?

Bei Biomasse-Primärprodukten wird solare Strahlung mithilfe von Pflanzen über den Prozess der Photosynthese in organische Materie umgewandelt. Damit stellt Biomasse gespeicherte Sonnenenergie dar. Bei der Nutzung von Biomasseenergie liegt der Hauptvorteil in der Verringerung des Kohlendioxidausstoßes in die Atmosphäre: Holz oder andere biogene Energieträger haben das in

ihnen gespeicherte Kohlendioxid im Lauf ihres Wachstums der Atmosphäre zunächst entzogen. Nach ihrer Verbrennung wird das gebildete Kohlendioxid bei nachhaltiger Nutzung einer nachwachsenden Vegetation wieder komplett gebunden.

4.2 Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Biomasse

Von der auf die Erde eingestrahlten Sonnenenergie werden derzeit nur ca. 0,01 % auf der Erde längerfristig gespeichert. Über 99,9 % davon speichert die Natur selbst über die Photosynthese in Form von Biomasse. Aus dieser Biomasse werden derzeit weltweit aber „nur“ ca. 10 % des Primärenergiebedarfs gedeckt. Das scheint steigerbar zu sein, doch bei genauer Betrachtung stellt global gesehen die Biomasse kein zusätzlich nutzbares regeneratives Energiepotenzial dar. Siehe dazu auch weiter unten das Kapitel „Nachteile und Grenzen der Biomasse“.

4.3 Bei Biomasse eingesetzte Technologien

Biodiesel

Pflanzenöle, vor allem aus Raps und Ölpalmen, können relativ kostengünstig herkömmlichen fossilen Dieseltreibstoff ersetzen. Die Qualität der naturbelassenen Pflanzenöle ist jedoch bezüglich Haltbarkeit und Wintertauglichkeit ungenügend, deshalb werden sie noch nachträglich chemisch in technisch besser nutzbare Stoffe umgewandelt. In vielen Regionen der Welt, auch in Deutschland, sind dafür inzwischen großtechnische Anlagen entstanden. (Für die Chemielehrkraft: Die Herstellung von Biodiesel im Unterricht ist ein schönes Beispiel für Veresterung bzw. Umesterung. Man benötigt Rapsöl aus dem Supermarkt, Methanol und Natriumhydroxid.)

Holzvergasung

Wird Holz trocken destilliert oder unter Zusatz von Wasser verschwelt, entstehen gut brennbare Gase. Über diesen Prozess wurde Benzinersatz schon im und nach dem Zweiten Weltkrieg zum Betrieb von PKWs und LKWs hergestellt. Moderne Hightechverfahren wie der „Integrated Gasification Process“ (IG) werden nicht nur in großen Kraftwerken zur Kohle- und Schwerölvergasung eingesetzt, sondern eignen sich auch zur Vergasung von Holz und anderen organischen Stoffen. Der Vorteil ist die Gewinnung eines hochreinen Gemischs aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, was als Ersatz für Erdgas den Betrieb hocheffizienter Gasturbinen erlaubt und dabei bessere Abgaswerte erzielt als ein konventionelles Kraftwerk mit direkter Verbrennung bei der Dampfkesselfeuerung.

Biogas

Kohlenhydrat- und zellulosehaltige organische Abfallstoffe wie Mist, Gülle, Stroh, aber auch Getreide wie Mais und Weizen, werden unter Luftabschluss (anaerob) von bestimmten Bakterien zu Methan abgebaut. Das so erzeugte „Biogas“ kann direkt vor Ort mit Dieselmotoren zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt werden. Nach der Reinigung kann das Biogas auch in das öffentliche Gasnetz eingespeist werden. Soll der Prozess effizient laufen, müssen u. a. Konzentrationen, Temperaturen und pH-Wert sehr genau gesteuert werden. Inzwischen gibt es ausgereifte Technologien für Biogasanlagen aller Größenklassen.

4.4 Nachteile und Grenzen der Biomasse

Biomasse ist nicht notwendigerweise umweltfreundlicher als fossile Energieträger. Bioenergien sind z. B. durch die verfügbaren Flächen sowie die Wachstumsbedingungen der Energiepflanzen begrenzt. Dann führt die Konkurrenz zwischen Lebensmittelpflanze und Energiepflanze zu negativen Auswirkungen auf die Struktur der Landwirtschaft. Beispielsweise führen Anreize für Palm-

ölimporte aus tropischen Anbaugeländern dort zu Klimaschäden und zur Störung regionaler Wirtschaftskreisläufe, wodurch die Leistungsbilanz verschlechtert und die heimische Landwirtschaft geschwächt wird. In der Ökobilanz schlagen beim Anbau und der Verarbeitung von Biomasse vor allem die Umweltbelastungen wie Überdüngung, Versauerung und die Erosion durch mechanische Bearbeitung des landwirtschaftlich genutzten Bodens negativ zu Buche. Dazu kommt die Belastung der Umwelt durch Herbizide, Fungizide und Pestizide. Wenn die Süßwasserknappheit sowie die Versteppung und Verwüstung großer Gebiete derzeit weltweit zunehmen, ist dies nur teilweise durch die Klimaänderung bewirkt. Diese Prozesse werden wesentlich verstärkt durch die Abholzung und Brandrodung der Regenwälder, inzwischen vor allem zum Anbau von Zuckerrohr und Ölpflanzen für die Gewinnung von Bioalkohol und Biodiesel als „regenerative“ Treibstoffe.

Zwar verursachen einige Biotreibstoffe mehr als ein Drittel weniger Treibhausgase als Benzin oder Diesel. In Mitteleuropa oder den USA führt jedoch z. B. der vermehrte Rapsanbau durch die Stickstoffdüngung zu vermehrter Emission des extrem starken Treibhausgases Distickoxid (N_2O), ein Treibhausgas, das 310-mal wirksamer ist als CO_2 ! In tropischen Ländern werden beispielsweise durch Brandrodung von Regenwaldflächen große Mengen an CO_2 produziert, was wiederum zu einer erhöhten Luftverschmutzung durch Ruß und andere gesundheitsschädliche Abgase wie Stickoxide, Aerosole oder Dioxine und zu einem Verlust an biologischer Vielfalt bei Flora und Fauna führt.

In Regionen, wo Holzwirtschaft betrieben wird und die Abfälle bislang ungenutzt blieben oder wo ungenutzte Brachflächen zur Verfügung stehen, kann der vermehrte Einsatz von Biomasse ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein. Da weltweit noch Hunderte von Millionen Menschen unterernährt sind und die Weltbevölkerung noch wächst, wird mittel- und langfristig die Biomasse vor allem für die Lebensmittelproduktion genutzt werden müssen und steht nicht als Ersatzpotenzial für herkömmliche Energieträger zur Verfügung.

5 Wasser

Auch die Wasserkraft ist eine Form von in der Natur gespeicherter Sonnenenergie. Denn sie stammt letztlich aus dem von der Sonne bewirkten Kreislauf aus Verdunstung und Niederschlag. Hier betrachten wir nur die direkt genutzte mechanische „Wasserkraft“ als Energieträger. Wasser wird darüber hinaus als Wärmespeicher (Fernwärme, Geothermie) genutzt. Dagegen ist bei der Speicherung von elektrischer Energie – in Form von Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser – nicht Wasser, sondern Wasserstoff der Energieträger.

5.1 Was ist Wasserkraft?

Mit Wasserkraft oder „Hydroenergie“ wird die Strömungsenergie von fließendem Wasser bezeichnet, welche über Turbinen und damit gekoppelte Generatoren in mechanische bzw. elektrische Energie umgesetzt wird. Bereits vor über 2.000 Jahren nutzte der Mensch u. a. in Mesopotamien (heutiger Irak) und Ägypten die Wasserkraft in Form von Schöpfrädern zur Bewässerung der Felder. Später kamen dann Mühlen zum Mahlen von Korn dazu. Ab dem Mittelalter bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts arbeiteten alle Eisenhütten in Form wasserbetriebener Hammerwerke. Eisen und Stahl konnten noch nicht mit dem Hochofen flüssig erschmolzen werden, sondern wurden aus festen Eisenschlackebrocken („Luppen“) mühselig „erhämmer“t. Historisch wurde also die mechanische Energie in Mühlen und Hammerwerken zunächst direkt genutzt. Erst mit der Durchsetzung der Elektrizität Ende des 20. Jahrhunderts wurde dann zunehmend die Wasserkraft mit Turbinen und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt.

5.2 Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Wasserkraft

Im Jahr 2014 entfielen 16,6 % der weltweiten Stromerzeugung auf die Wasserkraft – die anderen erneuerbaren Energien (einschließlich der biogenen Stoffe) kamen insgesamt auf einen Beitrag von 6,2 %. Die derzeit einzige erneuerbare Energiequelle, die nennenswert zur Versorgung der Erdbevölkerung beiträgt, ist die Wasserkraft. Die anderen erneuerbaren Energieformen wie Sonne, Wind, Erdwärme und Biomasse tragen zusammen rund 2,1 % bei. Mit Wasserkraftwerken wurden 2005 ca. 16 % der weltweit erzeugten elektrischen Energie gewonnen, was fast auf dem gleichen Leistungsniveau wie dem der Kernkraft liegt. Die Schnelligkeit des Anfahrens und Abstellens einer Anlage, die lange Lebensdauer, die niedrigen Betriebskosten aufgrund geringer Wartungs- und Bedienungsaufwände sind weitere positive Aspekte. Der Anteil der Wasserkraft an der Versorgung mit elektrischem Strom ließe sich nach heutiger Einschätzung bei den Flusswasserkraftwerken noch um einige Prozentpunkte steigern. Doch die natürlichen Einschränkungen wie Erdbebensicherheit und Klimaänderungen lassen keine großen Sprünge mehr erwarten.

Noch nicht abzuschätzen ist, ob die neu entwickelten Schachtwasserkraftwerke einen weiteren Ausbau der Wasserkraft in Gebieten wie Mitteleuropa ermöglichen, wo bislang ein weiterer Ausbau kaum sinnvoll war. Für diese neuen Kraftwerke findet kaum eine Landschaftsverbauung statt und sie sind relativ kostengünstig.

Dagegen bieten Meereskraftwerke, wie Strömungs- und Wellenkraftwerke, theoretisch ein großes Potenzial, doch die Technologie dazu befindet sich noch in der Pilotphase.

5.3 Bei Wasserkraft eingesetzte Technologien

Die Wasserkraftwerke lassen sich nach ihrer Bauart unterscheiden. Es folgt eine kurze Übersicht:

Laufwasserkraftwerke

Bei einem Laufwasserkraftwerk wird ein Fluss um einige Meter angestaut und mit dem durchfließenden Wasser möglichst kontinuierlich elektrischer Strom zur Abdeckung der Grundlast produziert. In der Regel werden sog. Kaplan- oder Rohrturbinen eingesetzt.

Stromboje

Bei einer Stromboje wird die Turbine direkt in einem Rohr in das Wasser eingehängt und wandelt so die kinetische Energie des Wassers in elektrische Energie um. Staumauern sind überflüssig, das Landschaftsbild und der Wasserspiegel werden nicht verändert. Erste Pilotprojekte laufen in Österreich. Die Leistung ist allerdings gering, pro Boje könnte nur der Verbrauch von ca. 30 Haushalten abgedeckt werden.

Speicherkraftwerke mit Staumauer

Bei einem Speicherkraftwerk wird das Wasser über einen längeren Zeitraum gespeichert. Je nach Wassermenge wird das Kraftwerk kontinuierlich oder temporär zur Abdeckung von Spitzenlast eingesetzt. Bei Kraftwerken mit hoher Staumauer (Talsperren), also bei großem Druck und bei großen Wassermengen (z. B. Itaipú, Cahora Bassa, Drei-Schluchten-Staudamm), wird meist die Francisturbine eingesetzt. Bei geringeren Wassermengen und relativ großer Fallhöhe wird die Pelton-turbine eingesetzt.

Pumpspeicherkraftwerk

Bei einem Pumpspeicherkraftwerk wird mit überschüssigem Strom Wasser in einen höher gelegenen Stausee gepumpt, um später Spitzenlaststrom zu erzeugen. Pumpspeicherkraftwerke sind

derzeit die einzige ausgereifte und wirtschaftliche Technologie, um größere Mengen an elektrischer Energie in Form anderer Energien zwischenzuspeichern.

Gezeitenkraftwerk

Das Gezeitenkraftwerk nutzt die mechanische Energie aus dem ständigen Wechsel von Ebbe und Flut. Didaktisch ist dieser Kraftwerkstyp interessant, da die Energie nicht, wie viele meinen, vom Mond stammt, sondern letztlich aus der Abnahme der Erdrotation.

Wellenkraftwerk

In Wellenkraftwerken wird die über Winde aus Sonnenenergie in mehr oder weniger kontinuierliche Wellen umgewandelte kinetische Energie der Wassermasse genutzt. Seit 2007 gibt es erste Pilotanlagen. Eine Lösung arbeitet mit Turbinen. Eine andere Technik will mittels einer Art Pendel die Wellenschwankungen in mechanische Rotationsenergie und dann in Strom umwandeln. Die Technologien sind vielversprechend, aber noch nicht ausgereift.

Meeresströmungskraftwerk

Aufgrund von Unterschieden in der Temperatur und der Salzkonzentration gibt es in vielen Gegenden kontinuierliche Meeresströmungen, deren kinetische Energie sich ebenfalls nutzen ließe. Erste Pilotprojekte („Seaflo“) mit extrem langsam laufenden Unterwasserpropellern sind im Test.

5.4 Nachteile und Grenzen der Wasserkraft

Bei der Stromgewinnung aus Wasserkraft werden für den Betrieb keine natürlichen Rohstoffe verbraucht, keine Schadstoffe ausgestoßen und nur geringe Abwärme produziert, und das alles bei einem sehr hohen Wirkungsgrad (bis zu 95 %). Auch die Regulierung der Wasserführung durch Staudämme hat in vielen Fällen mittelbare Vorteile für Bewässerung, Hebung des Grundwasserspiegels, Schaffung von Freizeitgebieten, Fischzucht, Schifffahrt, Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung.

Doch auch bei der Wasserkraft gibt es nicht nur Vorteile. So ist die Energieerzeugung in vielen Fällen unregelmäßig, z. B. wenn durch zu geringe Niederschläge der Wasserstand der Flüsse fällt. Die Klimaänderungen könnten diese Schwankungen noch verstärken. Auch die Auswirkungen auf Landschaft und Lebensraum von Mensch und Tier sind oftmals enorm. Die Aufstauung von Fließgewässern bewirkt Veränderungen in der Fließdynamik und den Wasserwechselzonen. Die Fließgeschwindigkeit wird stark herabgesetzt, was durch Störung des Geschiebehauhalts oberhalb der Stauanlage zu Sedimentablagerungen und unterhalb zur Erosion führt. Weitere Folgen sind Zerstückelung des Lebensraums vieler im Wasser lebender Tierarten sowie Veränderungen der Struktur und Artenvielfalt der Flora und Fauna des Gewässers und der Uferzone. Die Gewässergüte kann sich z. B. durch Sauerstoffarmut, Temperaturveränderung, Änderung der Strömungsverhältnisse und Eutrophierung (Überdüngung durch Stehen des Wassers im Stausee) verschlechtern und den Lebensraum für Wanderfische einengen. Auch angestammter Lebensraum von Menschen geht oft verloren. Zunehmend wird auch die Gefahr von Überschwemmungskatastrophen diskutiert, die durch Erdbeben oder Erdrutsche ausgelöst werden könnten. Häufig führen große Entfernungen zwischen günstigen Wasserkraftstandorten und den Verbraucherzentren zu einem relativ hohen Transportkostenanteil am Strompreis.

6 Wind

6.1 Was ist Windenergie?

Da die von den Molekülen der Atmosphäre absorbierbaren Wellenlängenanteile des Sonnenlichts bereits in den höheren Schichten ausgefiltert wurden, wird die Luft in Bodennähe nicht direkt von der Sonne erwärmt. Erst wenn die Erdoberfläche (auch Wasser) durch direkte und indirekte Strahlung erwärmt ist, werden die darüberstehenden Luftschichten erwärmt, bekommen Auftrieb und strömen nach oben. Gleichzeitig strömt seitlich aus weniger erwärmten Gebieten Luft nach; diese Querströmung bezeichnet man als Wind. Die kinetische Energie der linearen Luftbewegung des Winds kann nun mittels Segeln in eine lineare Bewegung oder über Windräder in eine Rotationsbewegung umgesetzt werden. Mit Windmühlen nutzt die Menschheit die Windenergie bereits seit ca. 2.000 Jahren.

6.2 Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Windenergie

Windenergie leistet nicht nur als CO₂-freier Stromproduzent einen wichtigen Beitrag zum aktiven Klimaschutz, es werden außerdem die Vorräte an fossilen Brennstoffen geschont. In 2014 wurden bereits 40 Mio. t CO₂ durch Windkraft eingespart. Allein China baute 2015 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von über 30 GW. Das entspricht der Leistung von bis zu 15 Kernkraftwerken. Auch wenn aus wirtschaftlichen Gründen nur relativ windreiche Gegenden und nur größere Windparks (z. B. „offshore“, d. h. vor der Küste) infrage kommen, gibt es noch sehr viele weitere potenzielle Standorte. Aufgrund der relativ modularen Technik benötigen diese Windparks im Unterschied zu anderen Großkraftwerken nur kurze Bauzeiten. Durch Nutzung der Windkraft ließen sich einige Prozentpunkte des Weltenergiebedarfs innerhalb von wenigen Jahren abdecken, wie man am Beispiel China sieht. In Deutschland musste dagegen 2016 der Ausbau von Windkraft gebremst werden. Einerseits fehlen Stromtrassen, andererseits will man einen abrupten Abbau von Arbeitsplätzen im Bereich fossiler Energieträger, vor allem bei der Braunkohle, vermeiden. Bezüglich der Verfügbarkeit der Windkraft ist allerdings zu bedenken, dass auf Grund schwankender Windverhältnisse im Schnitt nur ca. 25 bis 50 % der installierten Windgeneratorkapazität für die aktuelle Stromversorgung zur Verfügung stehen.

6.3 Bei Windkraft eingesetzte Technologien

Derzeit gibt es im Prinzip nur eine ausgereifte Windradtechnik: Das sind sog. „Auftriebsläufer“ mit zur Windrichtung vertikal ausgerichteten, meist dreiflügeligen Propellern. Die Windräder neuester Technologie arbeiten getriebefrei mit vielpoligen Generatoren und gleichen die windbedingten Spannungs- und Frequenzschwankungen durch moderne Stromrichtertechnologie aus. Diese Technologien werden u. a. im Medium (interaktives Infomodul) „So funktioniert ein Windkraftwerk“ erläutert.

6.4 Nachteile und Grenzen der Windenergie

Bedenken gegenüber Windparkstandorten werden meist aus Naturschutz- und ästhetischen Gründen geäußert. Allerdings lebt der Mensch seit Beginn des Industriezeitalters in einer zunehmend dicht besiedelten Industrielandschaft mit hoch entwickelter Infrastruktur. Künstliche, d. h. vom Menschen geschaffene Bauwerke bestimmen und beeinflussen das Landschaftsbild. Straßen, Schienen, Flughäfen, Großkraftwerke, Müllverbrennungsanlagen, chemische Fabriken und eine Vielzahl von Strommasten mit einer Höhe von mehr als 60 m werden mittlerweile als normal betrachtet. Unser Landschaftsbild wird seit jeher vom Menschen geprägt, deshalb sollte die Beeinträchtigung durch Windkraftträder in ein Verhältnis zu anderen Belastungen und vor allem zu den

großen Vorteilen, die Windenergie für den Umweltschutz insgesamt hat, gesetzt werden. Geklagt wird ebenfalls über Schattenwurf, Lärmbelastigungen oder Gefahr für Vögel und Fledermäuse. Doch eine sorgfältige Planung der Standorte sowie Abstandsregelungen können diese Nachteile verringern.

Die Einschränkung auf windreiche Gegenden, das schwankende Angebot an Windenergie, der mangelnde Netzausbau und die noch fehlenden Möglichkeiten der Zwischenspeicherung elektrischer Energie sind derzeit die wichtigsten Schranken der Windenergie.

7 Sonnenwärme (Solarthermie)

„Licht“ ist in Physik und Biophysik als der „sichtbare Anteil des elektromagnetischen Spektrums“ definiert. Bei Solarthermie und Photovoltaik werden jedoch auch zum Teil die unsichtbaren Anteile der Sonnenstrahlung genutzt. Dazu kommt, dass sich auch die Physik, Chemie und Technik der Energieumwandlung bei Wärme und Licht unterscheiden. Die Solarthermie nutzt je nach verwendetem Absorptionsmaterial die komplette Sonnenstrahlung: den unsichtbaren UV-Bereich (unter 400 nm), den sichtbaren Bereich bis unter 800 nm und den unsichtbaren Bereich des nahen (über 800 nm) bis fernen Infrarots (bis hin zu ca. 12.000 nm). Bei einem idealen solarthermischen Absorber würde ca. 1 % der Wärmeenergie aus UV-Licht, ca. 50 % aus dem sichtbaren Licht und ca. 49 % aus dem Infrarot stammen.

7.1 Was ist Sonnenwärme bzw. Solarthermie?

Bereits in der Steinzeit, noch vor der Erfindung des Feuers, nutzte der Höhlenmensch die im Gestein gespeicherte Sonnenwärme zum Schutz vor Auskühlung in der Nacht bzw. in kalten Jahreszeiten. Doch wie kommt die Wärme aus der Sonnenstrahlung ins Gestein? Beim Auftreffen der elektromagnetischen Sonnenstrahlung auf einen Körper wird ein Teil reflektiert und ein Teil absorbiert. Bei einem idealen schwarzen Körper würde der Absorptionsgrad 100 % betragen. Die absorbierte Strahlung wird in Bewegung der kleinsten Teilchen der Körper (Atome bzw. Moleküle) umgewandelt. Der Wärmeinhalt der Körper steigt und damit auch ihre Temperatur. Ein idealer schwarzer Körper absorbiert sowohl sichtbares als auch unsichtbares Licht, d. h. Ultraviolett (unter ca. 400 nm) und Infrarot (über ca. 800 nm). Wenn von Solarthermie gesprochen wird, ist vor allem der langwellige Bereich der Sonnenstrahlung gemeint.

Vorsicht mit dem Begriff „Wärmestrahlung“!

Der Begriff Wärmestrahlung wird sehr oft falsch oder missverständlich verwendet. Richtig ist, dass jeder Körper, der wärmer als 0 K ist, Energie abstrahlt. Wenn dies als Wärmestrahlung bezeichnet wird, weil Wärme die Ursache der Strahlung ist, ist das korrekt. Doch aufgepasst; es hat bei der Abstrahlung eine Energieumwandlung stattgefunden, von Wärme (Bewegung der kleinsten Materieteilchen) nach Strahlungsenergie (elektromagnetische Wellen). Auch wenn sich beim Auftreffen von Strahlung ein Körper erwärmt, dann durch Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärmeenergie. Es gibt also keine Strahlung, die Wärme transportiert und deshalb so heißt, sondern es gibt nur Wärmeenergie oder Strahlungsenergie.

7.2 Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Solarthermie

Im Jahr 2013 verbrauchten private Haushalte in Deutschland 2.603 Petajoule (PJ) Energie, das sind 723 Mrd. kWh. Dies entsprach einem Anteil am gesamten Endenergieverbrauch in Höhe von 28 %. Die privaten Haushalte benötigten ca. 69 % der Energie für das Heizen, 15 % für das Warmwasser, 6 % für das Kochen, 4 % für Kühl- und Kälteanwendungen, 4 % für Informations- und

Kommunikationstechnologien, 2 % für die Beleuchtung sowie weniger als 1 % für sonstige Elektrogeräte.

Es liegt also nahe, statt fossiler Sonnenenergie wie Kohle, Heizöl oder Erdgas die heute einestrahlte Sonnenwärme zum Heizen und für die Warmwasserbereitung zu verwenden. In weiten Teilen der gemäßigten und kühleren Regionen der Erde würde dazu die Solarthermie ausreichen. In Mitteleuropa beträgt die Sonneneinstrahlung pro Jahr ca. 1.000 kWh/m². Der Heizbedarf in einem herkömmlich gedämmten Haus liegt im Jahr bei ca. 200 kWh/m², in einem optimal isolierten „Niedrigenergiehaus“ bei ca. 30 kWh/m². Würde die gesamte Heizung und Warmwasserbereitung in deutschen Haushalten auf Solarthermie umgestellt, könnte der Energieverbrauch und damit die CO₂-Emission des einzelnen Haushalts um bis zu 70 % gesenkt werden, die Gesamtemission von CO₂ in Deutschland um bis zu 20 %! Solarthermie bietet also ein riesiges Ersatzpotenzial!

7.3 Bei Solarthermie eingesetzte Technologien

Die Sonnenstrahlung kann mit Kollektoren „gesammelt“ bzw. eingefangen und in Wärmespeichern, meist Wassertanks, zwischengespeichert werden. Möglich ist auch die Nutzung der in der Erde, im Grund- oder Oberflächenwasser gespeicherten Sonnenwärme mittels Wärmepumpe. Auch bauliche Maßnahmen sind zur Absorption und Speicherung der Sonnenwärme im Baukörper selbst gut geeignet.

7.3.1 Sonnenwärme direkt mit Kollektoren nutzen

Der wichtigste Bestandteil des Kollektors ist der Absorber, der die Strahlungsenergie der Sonne in Wärme umwandelt und diese an einen flüssigen Wärmeträger abgibt. Diese Flüssigkeit wird im Gesamtkreislauf umgepumpt und gibt ihre Wärme an einen Wärmespeicher wie den Kessel einer Zentralheizung bzw. den Boiler der Warmwasserversorgung ab. Bei Temperaturen des Kollektors von ca. 60 °C können mit einem großen Wärmespeicher (von ca. 2.000 l Wasser) auch mehrere Tage ohne Sonnenschein überbrückt werden. Um die Verluste am Absorber zu reduzieren, ist eine gute Wärmedämmung gegenüber der Umgebung notwendig. Die Kollektorsysteme werden nach der Effizienz der Absorption und der angewandten Dämmtechnik unterschieden.

Einfachabsorber

Sie bestehen meist aus schwarzen Kunststoffkörpern und sind nicht zusätzlich gedämmt. In südlichen Ländern wird oft auch nur eine schwarze Tonne auf dem Hausdach verwendet. Im Sommer reicht das in Mitteleuropa bei Sonnenschein zum Duschen oder zur Erwärmung des Schwimmbads.

Flachkollektoren

Einem flachen Heizkörper ähnlicher Absorber aus Kupfer oder Aluminium liegt auf einer isolierenden Dämmschicht aus Mineralwolle oder Hartschaum in einem flachen Kasten. Die Oberfläche des Absorbers ist mit einer bläulich schwarzen Titanverbindung beschichtet, die die Eigenschaft hat, über 90 % der Strahlung zu absorbieren. Die Besonderheit dieser Beschichtung ist, dass sie nur ca. 10 % der Wärme wieder abstrahlt, da sie an der Grenzfläche zu Kupfer bzw. Aluminium die Wärme wieder zu 80 % in den Absorber zurückreflektiert. Durch die Abdeckung des Kastens mit einer Glasscheibe wird die Wärmeabführung durch die Luft (Leitung, Konvektion und Wind) stark verringert. Die Temperatur im Absorber erreicht bei voller Sonneneinstrahlung bis zu 90 °C. Kollektoren dieser Art mit ca. 5 m² Kollektorfläche reichen bei entsprechender SpeichergroÙe in Mitteleuropa zur Warmwasserbereitung in einem Einfamilienhaus während ca. 9 Monaten des Jahres. Mit ca. 32 m² Fläche kann im selben Zeitraum auch die Heizung mit abgedeckt werden.

Vakuum-Flachkollektoren

Sie besitzen dieselbe Bauart wie der normale Flachkollektor, nur dass der Kasten zusätzlich evakuiert (luftleer) ist. Die Wärmeabführung an die Umgebung ist deshalb geringer, theoretisch könnten bei Stillstand der Pumpe Temperaturen von bis zu ca. 200 °C am Kollektor erreicht werden. Falls nicht durch Schnee abgedeckt, kann ein solcher Kollektor auch im Winter teilweise den Wärmebedarf des Haushalts abdecken.

Vakuümröhrenkollektoren

Der Absorber besteht wie die Flachkollektoren aus speziell beschichtetem Kupfer. Aber im Unterschied zu diesen sind die Absorber Kupferrohre, die sich jeweils in einem luftleeren Glasrohr befinden. Auf der Unterseite des Glasrohrs ist ein Parabolspiegel so angebracht, dass sich das Kupferabsorberrohr im Brennpunkt befindet. Kollektoren dieses Typs sind bis zu viermal effizienter als Flachkollektoren und erzielen Stillstandstemperaturen von über 300 °C. Erste Pilotprojekte in Deutschland zeigen, dass sich damit Warmwasser und Heizung in Niedrigenergiehäusern ganzjährig komplett abdecken lässt. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeit solcher Extrem Lösungen zu bezweifeln, da der Investitionsbedarf im Vergleich zu den anderen Kollektorarten deutlich höher ist.

7.3.2 Sonnenwärme indirekt mit Wärmepumpen nutzen

Die Temperatur des Erdreichs und des Grundwassers sinkt selbst im Winter in weiten Gebieten Europas, Nordamerikas und Japans nie unter ca. 7 °C ab. Selbst das Oberflächenwasser in Flüssen und Seen liegt nur bei völligem Durchfrieren unter 4 °C. Diese Temperaturen ergeben sich aus der Aufwärmung durch die Sonneneinstrahlung und dem großen Wärmespeichervermögen des Wassers und des Erdreichs. Mithilfe sog. Wärmepumpen (Kraftwärmemaschinen) kann Wärme aus einem Reservoir tiefer Temperatur (z. B. Grundwasser) in ein Reservoir hoher Temperatur (z. B. Heizkessel) befördert werden. Beträgt die Temperatur des Grundwassers z. B. 7 °C und die Heizkesseltemperatur ca. 40 °C, können mit 1 kW Antriebsenergie der Wärmepumpe ca. 4 kW Heizwärme gewonnen werden. Als Wärmequellen eignen sich Flusswasser, Grundwasser (Bohrungen bis in ca. 15 m Tiefe), Erdwärme (großflächige Verlegung von Rohren in mindestens 1,5 m Tiefe), die Luft und auch thermische Solarkollektoren. Selbst wenn die Wärmepumpe mit elektrischem Strom betrieben wird, kann das eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Lösung sein. Allerdings muss mit Amortisationszeiten von mindestens 15 Jahren gerechnet werden, was sich nur bei extrem haltbaren Wärmepumpen lohnt.

7.3.3 Sonnenwärme durch bauliche Maßnahmen nutzen

Die Nutzung der Sonnenwärme wird traditionell auch zur Temperierung von Wohnräumen eingesetzt. Dies geschieht mithilfe einer bedarfsgerechten Architektur in Form von Niedrigenergie- oder Passivhäusern. In kalten Klimazonen sind Fenster, Türen oder auch Wintergärten bevorzugt in Richtung zur Mittagssonne ausgerichtet. Bei optimaler Ausführung sind sie durch Dächer oder Jalousien so abgeschattet, dass die hoch stehende Sonne im Sommer nicht ins Haus fällt. Die flache Strahlung der tief stehenden Sonne, in der Übergangszeit und im Winter, fällt dagegen ein. Die Innenwände und Böden bestehen aus gut wärmespeichernden Materialien wie Ziegel, Beton oder bestimmtem Naturstein. Ist deren Masse ausreichend groß, wird so viel Wärme in ihnen gespeichert, dass das gesamte Haus nachts und auch an sonnenfreien Tagen angenehm warm bleibt. Wenn, wie in einem Niedrigenergiehaus, die Fenster und Außenmauern des Hauses extrem gut isoliert sind, können in Gegenden mit vielen Sonnenscheintagen so bis 80 % der Heizenergie eingespart werden. Im Gegensatz zu einem herkömmlich isolierten Haus mit einem jährlichen

Energiebedarf von über 200 kWh/m² braucht das Niedrigenergiehaus nur ca. 40 kWh/m². Ein noch besser isoliertes und mit besseren Wärmespeichern ausgestattetes „Passivhaus“ kommt sogar auf bis zu 95 % Energieeinsparung.

Ein neuer Trend sind sog. „Energieplus-Häuser“, also Häuser, die im Jahresschnitt mehr Energie liefern als sie verbrauchen. Durch Kombination von optimaler Ausrichtung der Glasflächen des Hauses nach Süden, wärmespeichernden Baumaterialien, Wärmepumpenheizung mit Eisspeicher, Thermosolarkollektoren und Photovoltaik können bereits heute kostengünstige Energieplus-Häuser gebaut werden. Das kostengünstige Bauen wird u. a. durch Verzicht auf Wärmedämmmethoden erreicht. (Zum Beispiel kostet eine 35 cm dicke Gasbetonaußenmauer nur ca. 1/3 im Vergleich zu einer „normalen“ Mauer mit zusätzlicher Kunststoffschäumisolierung. Auch die für das Energiesparen viel gelobte Holzbauweise nutzt zwar das relativ gute Isoliervermögen des Holzes, aber seine Wärmespeicherung ist gering. Holzhäuser haben deshalb eine relativ starke Nachtabsenkung der Innenraumtemperaturen.)

7.3.4 Thermische Sonnenkraftwerke

Eine Zeit lang wurden auch viele Kraftwerke zur Stromerzeugung aus Sonnenwärme gebaut. Das rentiert sich jedoch nur in Gegenden mit starker und kontinuierlicher Sonneneinstrahlung, in Europa z. B. in Südspanien, in den Wüstengegenden Arabiens und Afrikas, in den Wüstengegenden in den Südstaaten der USA, in Mittelamerika sowie in Australien. Es haben sich zwei Typen herauskristallisiert:

- Kleinere Sonnenkraftwerke besitzen einen großen runden Hohlspiegel (Dish, Teller), in dessen Brennpunkt sich der Arbeitszylinder eines Stirlingmotors befindet, auf dem direkt der Generator aufgesetzt ist. Das gegenwärtig leistungsfähigste Kraftwerk dieser Art ist der Euro-Dish-Stirling-Typ.
- Große Sonnenkraftwerke mit der Leistung großer Kohlekraftwerke arbeiten mit langen Zeilen von Parabolspiegeln, in deren Brennpunkt ein Absorberrohr mit dem Arbeitsmittel verläuft („Parabolrinnenkraftwerk“). Über einen Wärmeaustauscher erzeugt das heiße Arbeitsmittel Dampf, mit dem sich dann große Dampfturbinen und Generatoren betreiben lassen. Mit entsprechenden Wärmespeichern (Salzschmelzen) können große Solarthermiekraftwerke auch ohne Sonne bis zu 7 h mit Volllast weiterlaufen. Das ist ein großer Vorteil gegenüber Photovoltaik- und Windstrom!

Seitdem der Preis für Photovoltaik-Module von ursprünglich 4 Euro/W im Jahr 2005 auf unter 0,40 Euro/W (2016) gesunken ist, ist die Stromerzeugung mit solarthermischen Kraftwerken vergleichsweise teuer geworden. Der Neubau von Solarthermiekraftwerken hat deshalb weltweit stark nachgelassen.

7.4 Nachteile und Grenzen der Solarthermie

Ein Nachteil ist, dass nicht in allen bewohnten Regionen der Erde genug Sonnenwärme bzw. Sonnentage zur Verfügung stehen. Ein anderer Nachteil sind die relativ hohen Investitionskosten für die erforderliche Technik. Diese Kosten können sich im privaten Haushalt im Vergleich zu herkömmlichen Erdgas- oder Ölheizungen mehr als verdoppeln. Dazu kommen meist auch noch Kosten für eine verbesserte Wärmedämmung des Hauses. Aufgrund verschärfter gesetzlicher Vorgaben und der rasant ansteigenden Öl- und Gaspreise haben sich jedoch die Amortisationszeiten im letzten Jahrzehnt von 15–30 Jahre auf 8–15 Jahre bereits halbiert. Die großen Vorteile der Solarthermie sind: Sie arbeitet abluft- und abfallfrei und in klimatisch geeigneten Gegenden der Erde steht praktisch unbegrenzt viel Sonnenenergie zur Verfügung. Solarkraftwerke benötigen zwar

große Flächen, die stehen aber in Wüsten ohnehin zur Verfügung. Der in vielen Fällen nötige Stromtransport über tausende von Kilometern ist zwar technisch gelöst, stellt aber meist noch die Wirtschaftlichkeit in Frage.

8 Sonnenlicht (Photovoltaik)

Wird das Sonnenlicht mit sog. Solarzellen direkt in elektrische Energie umgewandelt, spricht man von Photovoltaik. Eine auf den ersten Blick faszinierende Möglichkeit, da bei indirekter Umwandlung von Sonnenenergie über Wärmekraftmaschinen nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik stets ungenutzte Abwärme entsteht. Die Photovoltaik könnte dagegen theoretisch fast 100 % Wirkungsgrad erreichen.

8.1 Was ist Photovoltaik?

Trifft Licht auf Metalle, werden an der Oberfläche Elektronen freigesetzt. Dieser „äußere“ Photoeffekt kann nur im Vakuum zur Erzeugung geringer Ströme genutzt werden und eignet sich nicht zur Erzeugung elektrischer Energie. Hierzu eignet sich der „innere“ Photoeffekt, der prinzipiell als Zwei-Elektroden-Prozess beschrieben werden kann: An der positiven Elektrode (dotierter Halbleiter) entfernt das Licht durch Anregung Elektronen aus dem Valenzband, was Löcher (positive Ladungen) hinterlässt. Diese Elektronen gehen durch eine nichtleitende Trennschicht in das Leitungsband der negativen Elektrode über und laden diese negativ auf. Von der negativen Elektrode können die Elektronen dann über den äußeren Nutzstromkreis wieder zum Pluspol zurückfließen (Ladungsfluss = $U \cdot Q = E_{el}$).

Bereits 1883 hatte Charles Fritts die erste Photozelle der Welt aus dem Halbleiter Selen entwickelt. Diese wurde jedoch nicht zur Energiegewinnung genutzt, sondern diente jahrzehntelang in der Fotografie zur Belichtungsmessung. 1954 stellten dann Chapin, Fuller und Paerson eine erste Siliziumsolarzelle mit ca. 5 % Wirkungsgrad her. Diese Solarzellen wurden zunächst nur in der Raumfahrt genutzt. Erst ab den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden Solarzellen auch in Alltagsprodukten (Rechner, Uhren) eingesetzt. Die Nutzung der Photovoltaik in kraftwerksartigen Anlagen wurde erst um das Jahr 2000 in Angriff genommen. Langfristig besitzt Photovoltaik aufgrund der gesunkenen Preise, der völlig modularen Technik und der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten (Dächer, Fassaden, Felder) das wohl größte Ausbaupotenzial.

Der Wirkungsgrad aktueller Photozellen ist derzeit noch relativ gering. Die besten serienmäßig produzierten Solarzellen (Stand 2016) liefern 2016 ca. 24 % Wirkungsgrad. Das liegt daran, dass aufgrund der Quantisierung der Energie in den derzeit für Solarzellen verwendeten Stoffen kein kontinuierliches Absorptionsspektrum für das Sonnenlicht zur Verfügung steht. Stattdessen erfolgt die Absorption in relativ schmalen Energiebändern, die nur wenigen Wellenlängen des Lichtspektrums entsprechen. Durch Kombination von Solarzellenschichten aus verschiedenen Materialien oder durch zusätzliche Schichten aus fluoreszierenden Farbstoffen ist man derzeit dabei, die Absorptionsbandbreite zu erhöhen und damit den Wirkungsgrad in Richtung der theoretisch möglichen 100 % zu verbessern.

8.2 Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Photovoltaik

Nach Angaben der Agentur für Erneuerbare Energien lag in Deutschland der Anteil von regenerativen Energieträgern beim Strommix Ende 2015 bei ca. 32,5 % (im Vergleich zu 12 % im Jahr 2006). Der Anteil von Photovoltaik lag dabei bei ca. 6,5 % (im Vergleich zu 0,3 % 2006). Im Vergleich dazu lag in den USA 2014 der Anteil von regenerativen Energien am Strommix bei ca. 12 % und Photovoltaik hatte nur einen Anteil von ca. 0,5 % (Quelle: U.S. Energy Information Administration, EIA)

Technisch gesehen eignen sich ca. 80 % der Landoberfläche der Erde zur solaren Stromerzeugung. In Deutschland z. B. würden beim heutigen Wirkungsgrad der Solarzellen ca. 1 % der Fläche des Lands genügen, um den gesamten Bedarf an elektrischer Energie abzudecken. Mit ca. 10 % der Fläche Deutschlands könnte sogar der gesamte Energiebedarf inklusive Verkehr und Heizung abgedeckt werden. Würden dazu vor allem Dächer und Hausfronten verwendet, ginge kaum unbebaute Natur verloren. Im Vergleich zur Landwirtschaft ist dabei Photovoltaik extrem effizient: Ein Hektar Photovoltaikfeld liefert 10-mal mehr Energie als ein Hektar Maisfeld!

Bleibt die Frage nach Haltbarkeit und Entsorgung der Solarzellen. Bei der Siliziumzelle sinkt der Wirkungsgrad zwar während der Lebensdauer ab, bleibt aber nach heutigem Stand der Technik bis zu 30 Jahre wirtschaftlich (Absenkung auf nicht weniger als 80 %) und wird in Zukunft wohl 50 Jahre erreichen. Eventuelle Schadstoffe (aus der Dotierung) sind im Silizium fest gebunden, so dass die Entsorgung unproblematisch ist. Bei den anderen Solarzellentypen fehlt bezüglich der Haltbarkeit noch die Langzeiterprobung. Auch enthalten einige Typen größere Mengen an Schadstoffen (wie Cd, Te, Se) und müssen als Sondermüll entsorgt werden.

Am Beispiel der Photovoltaik sieht man deutlich, wie sehr sich die Subvention dieser Technik gelohnt hat (Vorreiter waren hier weltweit vor allem Deutschland und China). Seit 2005 ist der Preis für Photovoltaik-Module auf ca. 1/10 gesunken. Das heißt, dass in sonnenreichen Gegenden mit intensiver Sonneneinstrahlung wie z. B. Kalifornien, Südspanien oder Nordafrika die Stromgestehungskosten aus Photovoltaik 2016 schon günstiger sind als aus fossilen Energieträgern. In Mitteleuropa sind in 2016 die Stromgestehungskosten großer Anlagen (mit ca. 7 Cent/kWh) bereits unter die von Gasturbinenstrom gesunken. Bereits 2013 erklärte die Studie „New Lens Scenarios“ der Royal Dutch Shell, eine der größten Erdölfirmen der Welt, Photovoltaik zur zukünftig weltweit wichtigsten Primärenergiequelle.

8.3 Bei Photovoltaik eingesetzte Technologien

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

- Dickschicht-Siliziumzellen
- Dünnschicht-Siliziumzellen
- Gallium-Arsenid-Zellen (GaAs)
- Cadmium-Tellurid-Zellen (CdTe)
- Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)
- Organische Solarzellen
- Farbstoffzellen

Diese Solarzellentypen findet man im Leitfaden „Energieumwandlung“ näher erläutert.

8.4 Nachteile und Grenzen der Photovoltaik

Der Hauptvorteil der Photovoltaik ist die weltweit weitgehend ortsungebundene Möglichkeit zur Erzeugung elektrischer Energie. Das wird z. B. in Indien für bislang unelektrifizierte ländliche Gegenden zum Aufbau örtlicher Stromversorgungen genutzt. Als Nachteil wird oft eine ungünstige Ökobilanz genannt. Doch das stimmt nicht, wenn auch die derzeit zum Einsatz kommenden Solarzellen in ihrer Produktion selbst energieaufwändig sind und teilweise giftige Schwermetalle dazu benötigt werden. Der Anteil der Schadstoffe ist z. B. in den fertigen Siliziumzellen so gering, dass die Entsorgung keine Probleme bereitet. Der oft zitierte Gehalt an giftigem Bor und Arsen der Siliziumzellen bewegt sich im ppm-Bereich. Dazu sind diese Stoffe im Silizium fest gebunden und würden sich auch nicht herauslösen, wenn die ausrangierten Solarzellen auf Halde geworfen wür-

den. Und bei Laufzeiten von über 30 Jahren für bewährte Solarzelltypen ist dieser scheinbare ökologische Nachteil im Vergleich zum ökologischen Nutzen verschwindend. Auch die energetische Amortisation der Solarzellen, d. h. wie lange es dauert, bis die bei der Produktion verbrauchte Energie zurückgewonnen ist, ist mit bis zu 12 Monaten sehr günstig geworden.

Ein großer Nachteil ist das schwankende, durch Nacht- und Wetterpausen und jahreszeitliche Schwankungen unsichere Angebot an Photovoltaikstrom. Während sich die Sonnenwärme mit relativ wenig Aufwand zwischenspeichern lässt, wird dies mit elektrischer Energie derzeit noch kaum durchgeführt (siehe dazu Kapitel 10, „Energiespeicherung“).

9 Geothermie

Zu den regenerativen, also praktisch „unerschöpflichen“ Energien gehört auch die Geothermie.

9.1 Was ist Geothermie?

Wörtlich bedeutet Geothermie „Wärmegewinnung aus der Erde“. Da die Wärme der Erdschichten bis ca. 30 m Tiefe vor allem durch die Sonneneinstrahlung und Gegenstrahlung von der Atmosphäre gegeben ist, wird diese Art der Wärme der Solarthermie zugeordnet. Manchmal spricht man auch von „oberflächennaher“ Geothermie. Mit „Geothermie“ oder, um Missverständnisse auszuschließen, mit „tiefer Geothermie“ meint man die Gewinnung von Wärme aus dem Erdinneren, die durch Bohrungen von bis zu mehreren tausend Metern Tiefe erschlossen werden muss. Diese Wärme ist einesteils Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung vor ca. 4,6 Mrd. Jahren, anderenteils stammt sie aus den seit Jahrtausenden ablaufenden natürlichen radioaktiven Zerfallsprozessen der im Erdinneren vorhandenen langlebigen radioaktiven Isotope wie z. B. ^{235}U (U) und ^{238}U , ^{232}Th Thorium und ^{40}K Kalium.

9.2 Verfügbarkeit und Ersatzpotenzial der Geothermie

Die Geothermie ist eine langfristig nutzbare Energiequelle. Mit den in den oberen 3.000 m der Erdkruste gespeicherten Wärmeverräten könnte theoretisch der derzeitige weltweite Energiebedarf für über 100.000 Jahre gedeckt werden. So gesehen ist die tiefe Erdwärme trotz des langsamen Abkühlens des Erdkerns nach menschlichen Maßstäben tatsächlich unerschöpflich. Doch für eine wirtschaftliche Erschließung dieser Erdwärme eignen sich derzeit nur sehr wenige Stellen der Erdkruste mit vulkanischen Wärmenestern („Hotspots“) in einigen hundert bis wenigen tausend Metern Tiefe. Traditionell konzentriert sich Stromerzeugung aus Geothermie auf Länder wie z. B. Island, die aufgrund der vielen Vulkane über viele oberflächennahe Hotspots verfügen. In Ländern, wo dies nicht der Fall ist, muss der Strom ziemlich ineffizient mit einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau von 90–150 °C erzeugt werden. Als Wärmequelle für Heizung und Warmwasserbereitung reichen dagegen Vorkommen ab ca. 45 °C aus. Nützt man z. B. alle in Deutschland gegebenen Möglichkeiten aus, könnten bis zum Jahr 2020 durch Geothermie mehr als 20 Mio. t Kohlendioxid eingespart werden. Weltweit waren 2005 ca. 20 GW in Anlagen zur Wärmegewinnung sowie 8 GW in geothermischen Kraftwerken zur Stromerzeugung installiert (Quelle: RWE). Die USA bauten von 1979 bis 2005 Geothermiekraftwerkskapazitäten von ca. 2,6 GW und liegen damit weltweit an der Spitze. Aber derzeit stagniert der weitere Ausbau eher, was wohl an der mangelnden Wirtschaftlichkeit der noch zur Verfügung stehenden Standorte liegt (siehe unten „Nachteile und Grenzen der Geothermie“!).

9.3 Bei Geothermie eingesetzte Technologien

Zur Erschließung der Geothermie wird eine Bohrung bis zur Tiefe des Wärmenests angelegt. Be- findet sich dort Wasser von über 100 °C, wird es eventuell durch den eigenen Dampfdruck an die Erdoberfläche befördert. Wenn nicht, muss gepumpt werden. Dem geförderten heißen Wasser wird dann durch einen Wärmeaustauscher die Wärme entzogen und einem Fernwärmenetz oder einem Kraftwerk zugeführt. Das abgekühlte Wasser wird zurück ins Erdinnere gepresst. Führt die heiße Schicht im Erdinneren kein Wasser, könnte von der Erdoberfläche aus auch kaltes Wasser ins Bohrloch gepresst und dann der gebildete Dampf abgezapft werden.

Wird die geothermisch gewonnene Wärme zu Heizzwecken genutzt und ist ihr Temperaturniveau dafür noch zu niedrig, kann es mithilfe einer Wärmepumpe auf das gewünschte Niveau angehoben werden. War die Bohrung nicht zu tief und damit nicht zu teuer, ist das in vielen Fällen wirtschaftlich.

Wird die Geothermie für Kraftwerke genutzt, reichen Temperaturen von 90–150 °C für den effizienten Betrieb herkömmlicher Dampfturbinen nicht aus. Hier wird dann statt Wasser ein niedrig siedender Stoff wie z. B. Perfluorpentan (Siedepunkt bei 31 °C) verwendet. Eine andere Möglichkeit wäre der Einsatz von Stirlingmotoren.

9.4 Nachteile und Grenzen der Geothermie

Hauptbremse für den Einsatz von Geothermie waren bislang die zu hohen Kosten. Seit die gestiegenen Energiepreise die Geothermie jedoch konkurrenzfähig machen, zeigen sich auch einige andere Nachteile. So kann die Nutzung der Geothermie zu regionalen Absenkungen des Untergrunds führen, wenn heißes Tiefenwasser entnommen, aber nicht wieder ersetzt wird. Das heiße Tiefenwasser kann auch gelöste Salze und toxische Schwermetalle enthalten. Falls das Wasser nicht 100 % in die Tiefe rückgeführt werden kann, muss es gereinigt und die Rückstände müssen als Sondermüll entsorgt werden. Tiefere Bohrungen, um optimale Temperaturen zu erreichen, schienen bislang in tektonisch aktiven Gebieten besonders erfolgversprechend. Da diese Hotspots aber meist nicht wasserführend sind, hoffte man durch Injektion von Wasser Dampf erzeugen zu können. Beim Bau eines Geothermiekraftwerks bei Basel löste jedoch im Dezember 2006 die Injektion von Wasser ein starkes Erdbeben aus. Der Einsatz von Geothermie für größere Kraftwerke wird seitdem wieder skeptischer gesehen.

10 Energiespeicherung

Das Angebot der regenerativen Energien schwankt in der Regel sehr stark. Dies ist ihr größter Nachteil. Die Energie, die aus der Umwandlung regenerativer Energieträger stammt, muss also zur Abdeckung der z. T. gegenläufigen Nachfrage zwischengespeichert werden. Wie weit und wie schnell Wind und Sonne fossile Energieträger ersetzen können, hängt also ganz wesentlich von der Entwicklung geeigneter Speicher ab.

Energiespeicher kann man nach der gespeicherten Energieform klassifizieren. Es sind nachfolgend nur die Speicher aufgeführt, die bereits jetzt eine größere praktische Bedeutung oder ein hohes Potenzial für die Zukunft haben.

10.1 Speicher für thermische Energie

Temperaturspeicher

Sie verändern beim Lade- oder Entladevorgang ihre Temperatur. Als Wärmespeicher dient z. B. bei der Heizung und Warmwasserbereitung Wasser. Aber auch Stein, Beton und Ziegel können gute Wärmespeicher sein. Das ist Standard und wird für Sonnenwärme schon weitgehend genutzt.

Latentwärmespeicher

Sie verändern beim Lade- oder Entladevorgang ihren Aggregatzustand bzw. Phasenzustand. Am besten geeignet ist der Übergang fest/flüssig. Beim Schmelzen nimmt der Stoff Wärme auf, die er beim Erstarren wieder abgibt. Für niedere Temperaturen eignen sich Paraffine und spezielle Kunststoffe. So hat ein Chemieunternehmen eine Tapete mit eingebetteten Kunststoffkügelchen entwickelt, die an heißen Sommertagen durch Schmelzen Wärme aufnehmen und nachts durch Erstarren wieder abgeben, sozusagen eine Klimaanlage ohne Energieverbrauch. Ein anderes Verfahren nutzt dagegen nicht die Schmelzwärme, sondern die Lösungswärme. Das Salz löst sich bei einer bestimmten Temperatur komplett im Wasser und gibt die so gespeicherte Wärme beim Kristallisieren wieder ab (siehe dazu auch Experimentieranleitung „Wärme chemisch speichern“). Für hohe Temperaturen von bis zu mehreren hundert Grad eignet sich die Schmelzwärme von Salzen und Salzmischungen. Überschüssige Windenergie z. B. könnte so über elektrische Widerstandswärme in einer Salzschmelze gespeichert und bei Bedarf zur Dampferzeugung für eine Dampfturbine verwendet werden. Im großtechnischen Maßstab werden Salzschmelzen z. B. in Solarthermiekraftwerken genutzt. Im Parabolrinnenkraftwerk Andasol 1,2 und 3 in Spanien reicht die in der Salzschmelze gespeicherte Wärme für über 7 h sonnenlosen Betrieb der 3x50-MW-Anlage.

10.2 Speicher für mechanische Energie

Schwungrad

In der bewegten Masse eines Schwungrades kann Energie gespeichert werden. Allerdings ist der Energieinhalt nicht sehr hoch (~500 kJ/kg). Das Schwungrad muss extrem reibungsarm gelagert sein und läuft in der Regel im Vakuum. Typische Leistungsgrößen sind von 3 kWh bis >100 kWh. Inzwischen gibt es Versuche, Schwungräder bei Windrädern und Gasturbinen einzusetzen. Bei kleinen Gasturbinen zur Notstromversorgung von Krankenhäusern wird das Prinzip seit Jahren erfolgreich eingesetzt. Inzwischen nutzen z. B. die Zwickauer Straßenbahnbetriebe oder die Stadtwerke München mit Elektromotor-Generatoren gekoppelte Schwungräder, um in Millisekundenschnelle bis zu mehrere Sekunden dauernde Schwankungen im Stromnetz auszugleichen.

Pumpspeicherkraftwerk

Bei Stromüberfluss entnimmt das Kraftwerk dem Stromnetz elektrische Energie und pumpt damit Wasser in einen höher gelegenen Speichersee. Die elektrische Energie wurde also als potenzielle zwischengespeichert. Bei einer Nachfragespitze arbeitet das Kraftwerk „normal“ und verwandelt die gespeicherte Energie wieder zurück in Strom. In Deutschland wurden ab 1923 Pumpspeicherkraftwerke gebaut. Die deutschen Pumpspeicherkraftwerke Goldisthal mit 1,06 GW, Markersbach mit 1,05 GW und Schluchsee mit 0,95 GW gehören zu den weltweit größten. Heute ist eine Gesamtleistung von über 6 GW erreicht, d. h., der Ausfall mehrerer Kernkraftwerke oder Kohlegroßkraftwerke kann überbrückt werden. Das führt zu Stromausfallzeiten von durchschnittlich nur 20 min pro Jahr gegenüber fast 3 h in den USA. Die USA planen deshalb in Brumley Gap den Bau des größten Pumpspeicherkraftwerks der Welt mit 3,2 GW. Trotz dieser scheinbar großen Speicherkapazitäten reichen die vorhandenen Pumpspeicherkraftwerke derzeit kaum zur Zwischenspeicherung der Stromproduktion aus den herkömmlichen Energieträgern. Da ein weiterer Ausbau unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in den meisten Ländern – darunter auch Deutschland – kaum mehr möglich ist, müssen andere Speicher für die regenerativen Energieträger entwickelt werden.

Druckluftspeicherkraftwerk

Diese Technologie wird in Kombination mit Gasturbinen bereits genutzt (zwei ausgeführte Anlagen). Da Gasturbinen ohnehin mit stark komprimierter Luft arbeiten, füllt das Gasturbinenkraftwerk vor dem Abschalten (bei Stromüberangebot) einen Druckluftspeicher auf. Dessen Entleerung beim Wiederanlassen des Kraftwerks (bei Nachfragespitze) ermöglicht schnellen Start der Gasturbine und bringt zusätzliche Leistung ohne Brennstoffverbrauch. Inzwischen wird darüber nachgedacht, Wind- und Solarenergie in Druckluftspeichern zwischenzuspeichern und bei Nachfrage mit reinen Druckluftturbinen ganz ohne Verbrennung Strom zu erzeugen. Wenn nicht natürliche Kavernen oder aufgelassene Bergwerksstollen als Speicher genutzt werden können, ist der Bau großer Speicher derzeit eher unwirtschaftlich. Und da sich reale Gase beim Komprimieren erwärmen, haben Druckluftspeicher durch Wärmeverluste nur ca. 60 % Wirkungsgrad. Wenn diese Abwärme nicht genutzt werden kann, ist die Wirtschaftlichkeit ebenfalls schlecht.

10.3 Chemische Energiespeicher

Festkörperakkus

Akkumulatoren und Batterien sind elektrochemische Zellen bzw. Arrays aus ihnen. Kombiniert man Festkörperelektroden aus Metallen (ggf. auch Nichtmetallen) mit unterschiedlichem elektrochemischem Potenzial, so wird die eine Atomsorte oxidiert und die andere reduziert. Die dabei ausgetauschten Elektronen fließen über einen äußeren Stromkreis, chemische Energie wird also in elektrische Energie umgewandelt: Die Zelle wird entladen. Legt man umgekehrt eine äußere Spannung an diese elektrochemische Zelle, wird die aufoxidierte Atomsorte wieder reduziert und die reduzierte Atomsorte wieder oxidiert. Bei dieser Aufladung des „Akkus“ wird also elektrische Energie durch Umwandlung in chemische Energie gespeichert. Gebräuchliche Akkus arbeiten mit Blei (Autobatterie), Nickel/Cadmium, Nickel/Metallhydrid oder Lithium. Doch sie sind teuer, ihre Speicherkapazität ist wenig variabel und ihre Lebensdauer ist relativ kurz. Die derzeit üblichen Festkörperakkus lassen sich je nach Typ nur einige 100- bis 1.000-mal aufladen. Das ist für die Speicherung von Wind- oder Solarstrom in Kraftwerken zu wenig.

Redox-Flow-Zelle

Dieser Akkutyp arbeitet sozusagen mit flüssigen Elektrodenmaterialien, z. B. aus Zink (Zn) und Brom (Br). Zn ist in Wasser aufgeschlämmt (Suspension), Br liegt in einer organowässrigen Emulsion vor. Zwei Grafit Elektroden dienen als Stromabnehmer. Fließt nun das Zn-Pulver an seiner Elektrode vorbei, wird es oxidiert, d. h., es gibt Elektronen ab und geht ionisch (Zn^{2+}) in Lösung. Fließt das Br an seiner Elektrode vorbei, wird es reduziert, nimmt also Elektronen auf und geht ionisch als Bromid (Br^-) in Lösung. Beim Aufladen legt man Spannung an und pumpt die beiden Lösungen wieder an den Elektroden vorbei. Das Verfahren hat den Vorteil, dass die beiden aufgeladenen Suspensionen bzw. Emulsionen in beliebig großen Tanks gelagert werden können. Diese Flüssigelektroden zeigen praktisch keinen Alterungseffekt, es sind also theoretisch unbegrenzt viele Lade-Entlade-Zyklen möglich. Das technisch nicht sehr aufwendige und deshalb kostengünstige Verfahren eignet sich prinzipiell bestens zur Speicherung großer Mengen an Wind- oder Solarstrom. Inzwischen wurden besonders langlebige Redox-Flow-Zellen auf Vanadiumbasis entwickelt, die auch in ersten großen Anlagen eingesetzt werden.

Wasserstoff

Überschüssiger Strom kann technisch mit wenig Aufwand zur Elektrolyse (elektrochemische Zersetzung) von Wasser (H_2O) zu Wasserstoffgas (H_2) und Sauerstoffgas (O_2) genutzt werden. Der so gebildete chemisch reine Sauerstoff kann sehr gut an die Industrie verkauft oder einfach in die Luft abgelassen werden. Das Wasserstoffgas wird dann verflüssigt und in Tanks gelagert. Tanks

für flüssigen Wasserstoff sind für mobile Zwecke äußerst aufwändig und ineffizient; stationäre Großtanks lassen sich dagegen nach heutigem Stand der Technik relativ kostengünstig und explosionsicher realisieren. Bei Strombedarf kann dann der Wasserstoff durch Verbrennung zu Wasser über Gasturbinen, Diesel- oder Stirlingmotoren wieder in Strom zurückgewandelt werden. Der Wirkungsgrad ist allerdings nicht sehr gut, da die Wärmekraftmaschinen ja immer nur einen Teil (ca. 40 %) der Wärme in mechanische Energie umwandeln können. Es bietet sich deshalb die Brennstoffzellentechnik an. Hier wird die elektrische Energie direkt ohne Verbrennung mit Wirkungsgraden von bis zu 85 % gewonnen. Da letztlich nur wieder umweltneutrales Wasser entsteht, ist die Energiespeicherung mit Wasserstoff ein ökologisch optimales Verfahren, vor allem wenn das gespeicherte Wasserstoffgas aus Wind- oder Solarstrom stammt. Eine Alternative zur reinen Wasserstofftechnologie wäre es, Wasserstoff mit CO₂ aus der Luft katalytisch (modifiziertes Fischer-Tropsch-Verfahren) in Methanol (CH₃OH) oder CH₄ umzuwandeln. Damit stünde dann ein universeller, CO₂-emissionfreier, im Gegensatz zu Wasserstoff allerdings leicht lager- und verteilter Treib- und Brennstoff zur Verfügung, der auch Erdöl und Erdgas komplett ersetzen könnte. Der Vorteil bei der Umwandlung in CH₄ wäre, dass dann das komplette flächendeckende Erdgasnetz zur Verteilung genutzt werden könnte. Und auch die bereits bestehenden Erdgasspeicher haben mit bis zu drei Monaten genug Reichweite, um auch größere Schwankungen in der regenerativen Energieproduktion auszugleichen. Dieses auch als „Power-to-Gas“ bezeichnete Verfahren wird bereits in einigen Pilotanlagen getestet.

10.4 Elektrische Energiespeicher

Kondensator

Kondensatoren sind die einzige Möglichkeit, elektrische Energie direkt zu speichern. (Spulen speichern streng genommen elektrische Energie als magnetische Energie!) Kondensatoren bestehen aus zwei großflächigen Polen, zwischen denen sich ein elektrischer Isolator befindet. Eine angelegte Gleichspannung verschiebt die Elektronen zwischen den Polen. Der Kondensator ist nun aufgeladen und kann die Energie jederzeit als Ladungsfluss über einen äußeren Stromkreis wieder abgeben. Kondensatoren sind praktisch verschleißfrei und haben fast unbegrenzte Lebensdauer. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eignen sie sich jedoch nur zur Speicherung relativ kleiner Energiemengen. Das beginnt bei Solaruhren und hört bei Kondensatorarrays zur Speicherung der Bremsenergie in S-Bahnen, U-Bahnen und Eisenbahnen auf. Als Speicher für größere Energiemengen in Wind- und Solarstromkraftwerken sind Kondensatoren nicht geeignet. Dies liegt daran, dass die Speicherkapazität eines Kondensators von der Fläche seiner Elektroden abhängt, was ähnlich wie bei Festkörperbatterien riesige und damit teure Konstruktionen erfordern würde.

10.5 Magnetische Energiespeicher

Magnetspule

Das Einschalten des Stromflusses durch eine Spule bewirkt den Aufbau eines magnetischen Felds. Die in diesem Feld gespeicherte magnetische Energie kann beim Abschalten des Stromflusses durch die Spule wieder als elektrische Energie entnommen werden. Gelingt es, den Stromfluss durch die Spule als widerstandsfreien Stromkreislauf einzurichten, eignet sich eine Spule als Speicher für elektrische Energie. Mithilfe von entsprechend gekühlten Supraleitern und moderner Steuerungselektronik werden solche supraleitende Spulen heute bereits als Speicher eingesetzt. Doch sie sind extrem aufwendig und teuer und die Kühlung verbraucht relativ viel Energie. Deshalb sind Magnetspulen als „Massenspeicher“ für Energie kaum einsetzbar.