|  |
| --- |
| Inhalt Kapitel 5 |
| [Inhalt Kapitel 5 5-1](#_Toc440366182)  [5 Energieressourcen 5-2](#_Toc440366183)  [5.1 Endliche Energiequellen 5-3](#_Toc440366184)  [5.1.1 Fossile Brennstoffe 5-3](#_Toc440366185)  [5.1.2 Kernenergie 5-11](#_Toc440366186)  [5.2 Erneuerbare Energie 5-13](#_Toc440366187)  [5.2.1 Charakterisierung der erneuerbaren Energieressourcen 5-13](#_Toc440366188)  [5.2.2 Solarenergie 5-18](#_Toc440366189)  [5.2.3 Geothermie 5-26](#_Toc440366190)  [5.2.4 Das zukünftige Energiesystem 5-31](#_Toc440366191)  [5.2.5 Erdöl **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366192)  [5.2.6 Erdgas **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366193)  [5.2.7 Kernenergie **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366194)  [5.3 Charakterisierung der erneuerbaren Energieressourcen Error! Bookmark not defined.](#_Toc440366195)  [5.3.1 Solarenergie **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366196)  [5.3.2 Wasserkraft **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366197)  [5.3.3 Windenergie **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366198)  [5.3.4 Energetische Nutzung von Biomasse **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366199)  [5.3.5 Geothermie **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366200)  [5.3.6 Weitere erneuerbare Energien **Error! Bookmark not defined.**](#_Toc440366201)  [5.4 Ziele 5-34](#_Toc440366202) |

|  |  |
| --- | --- |
| Energieressourcen | |
| Einteilung der Energieressourcen | In Kapitel 5 werden die Energieressourcen dargestellt die uns zur Verfügung stehen. Energieressourcen sind alle natürlich vorkommenden Träger von Primärenergie – sie treten in ganz vielen verschiedenen Formen auf, die viele verschiedene Eigenschaften haben (z.B. die Verfügbarkeit, die Kosten, die Endlichkeit etc.). Das wichtigste Unterscheidungskriterium ist die Erschöpfbarkeit, d.h. die Einteilung in erneuerbare und nicht-erneuerbare Energieressourcen.  Nicht erneuerbare Energieressourcen sind gespeicherte Energieformen die nur einmal verbraucht werden können – ähnlich wie das angesparte Vermögen. Beispiele dafür sind die fossilen Brennstoffe, sowie die Kernspaltung von Uran in ihrer heutigen Form.  Erneuerbare Energieressourcen sind Energieformen die aus einem laufend auftretenden Energiefluss kommen, z.B. Sonnen- oder Windenergie, ähnlich wie das laufende Einkommen. Sie erschöpfen sich nicht in für Menschen relevanten Zeiträumen.  Grenzfälle bilden die Kernspaltung mit fortgeschrittenen Technologien (Brütertechnik, Thorium anstelle von Uran, Urangewinnung aus Meerwasser) sowie die Kernfusion. Sie wären erschöpfbare Energiequellen, allerdings mit derart langen Reichweiten, dass sie für praktische Zwecke als unerschöpflich angesehen werden können. |
| Energiequellen | In unserem Sonnensystem gibt es nur zwei Energiequellen: Kernenergie und Gravitationsenergie. Diese beiden Energiequellen führen zu vielfältigen Erscheinungsformen von für uns nutzbarerer Energie.  Bei der Entstehung der Erde wurde viel Gravitationsenergie frei, die heute noch in Form von Erdwärme vorhanden ist (das Erdinnere ist viel heisser als die Oberfläche). Die Gravitation ist ebenfalls für die Gezeiten auf der Erde verantwortlich, die auch zur Energiegewinnung dienen können.  Die Kernenergie (= Bindungsenergie der Nukleonen) kann durch Kernfusion (Verschmelzung leichter Atomkerne wie Wasserstoff oder Helium) oder Kernfission (Spaltung schwerer Atomkerne wie Uran, Plutonium, Thorium) freigesetzt werden. Technisch ist dem Menschen heute die Kernspaltung zugänglich, allerdings ist die einzige zuverlässige Form die Spaltung des Isotops 235U, das auf der Erde eher selten ist. In der Natur kommt allerdings ein sehr grosser Kernfusionsreaktor vor, unsere Sonne. Die Sonneneinstrahlung auf der Erde führt zu vielfältigen für uns nutzbaren Energiequellen, z.B. direkte Sonneneinstrahlung, oder ihre Umwandlung in Biomasse, Wasserkraft, Windenergie und Wellenenergie. Biomasse wird ihrerseits über lange Zeiträume (Jahrmillionen) in fossile Energie umgewandelt.    Abbildung ‑: Energiequellen und Umwandlungsformen |
| Endliche Energiequellen | |
| Einleitung | Grundsätzlich sind alle Energiequellen endlich – auch unsere Sonne wird in einigen Milliarden Jahren aufhören zu scheinen. Allerdings sind solche Zeiträume für die Menschheit kaum relevant: Den modernen Menschen („homo sapiens“) gibt es erst seit einigen 10‘000 Jahren; die Neandertaler sind erst vor 30‘000 Jahren ausgestorben; der Ackerbau wurde erst ca. 11‘000 v. Christus in Mesopotamien erfunden, und unsere moderne industrialisierte Welt mit der Nutzung von fossiler Energie gibt es erst seit etwa 200 Jahren. Man kann daher sagen, dass alle Energiequellen die noch einige hundert oder tausend Jahre reichen für unsere Zwecke als unerschöpflich angesehen werden können. Endlich auf menschlichem Massstab sind hingegen die fossilen Energien, die beim heutigen Verbrauch in 50-100 Jahren aufgebraucht sein werden. Man beachte aber: alle vergangenen Vorhersagen zur Endlichkeit der fossilen Energien waren falsch (und zu pessimistisch). Ebenfalls endlich erscheint Uran in seiner heutigen Nutzungsform. |
| Fossile Brennstoffe | |
| Einleitung | Die fossilen Brennstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas sind heute die dominante Energiequelle der Menschheit (je nach Quelle/Statistik zwischen 80 und 90% unseres Primärenergieverbrauchs).  Wir wollen hier folgende Fragen zu den fossilen Brennstoffen beantworten:   * Wie sind die fossilen Brennstoffe entstanden? * Wie findet man Erdöl und Erdgas? * Wie fördert man fossile Brennstoffe? * Wie viel fossile Brennstoffe gibt es auf der Erde? * Wie lange reichen die Vorräte noch? |
| Entstehung der fossilen Brennstoffe allgemein | Wie der Name schon sagt, sind die fossilen Brennstoffe aus Fossilien, d.h. Zeugnisse vergangenen Lebens. Auf der Erde wird laufend aus Sonnenstrahlung Biomasse erzeugt, sowohl pflanzliche wie auch tierische Biomasse. Man geht davon aus, dass jährlich einige 100 Gigatonnen Biomasse entstehen (aber die Schätzungen dazu gehen weit auseinander). Biomasse besteht chemisch gesehen hauptsächlich aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff (C, H, O). Als Beispiel sei Zellulose genannt, der Hauptbestandteil von Holz – es hat die Formel (C12H20O10)n.  Nach dem Tod des Organismus (pflanzlich oder tierisch) zersetzt er sich und vermodert oder verrottet. Dabei werden seine Bestandteile wieder freigesetzt, ähnlich wie bei einer Verbrennungsreaktion (Oxidation). Es hat jedoch in der Biomasse nicht genügend Sauerstoff für eine vollständige Reaktion (es braucht bei der Zellulose 34 O um die 12 C zu CO2 und die 20 H zu H2O zu verbrennen, es hat jedoch nur 10 O). Es braucht also für die vollständige Zersetzung der Biomasse auch noch Sauerstoff aus der Luft. Fehlt dieser Sauerstoff, so läuft die Reaktion nur unvollständig ab, und Kohlenwasserstoffe bleiben übrig – unsere fossilen Brennstoffe. Dies ist allerdings nur unter speziellen Bedingungen möglich. |
| Entstehung von Kohle | Steinkohle entstand vor ca. 300 Millionen Jahren im „Karbon“-Zeitalter der Erdgeschichte. Damals war der CO2-Gehalt der Atmosphäre deutlich höher, was starkes Pflanzenwachstum begünstigte. Ein Teil dieser Pflanzen versank in Sümpfen und war dort vor der Oxidation teilweise geschützt. Es entstand Torf. Ein Teil dieser Sümpfe wurde später von Ozeanen überflutet und unter dicken Sedimentschichten begraben. Tiefer in der Erde steigt die Temperatur an (ca. 30K pro 1000 Meter, geothermischer Wärmegradient). Unter höheren Temperaturen und Drücken verwandelt sich Torf zunächst in Braunkohle und später in Steinkohle – der Prozess heisst „Inkohlung“. Neben der Kohle entstehen auch Gase (Methan, CO2, CO, Wasserstoff), die kollektiv „Grubengase“ genannt werden. Sie sind zum Teil hochgiftig, und explosiv. Diese Grubengase können in Kohlebergwerken austreten und sind sehr gefährlich – die Bergwerke müssen darum sehr gut belüftet sein. |
| Zusammensetzung von Kohle | Die Zusammensetzung der Kohle verändert sich mit zunehmendem Alter bzw. mit Fortschreiten der Inkohlung: der Kohlenstoffgehalt *c* (Massebezogen) steigt und der Wasserstoffanteil *h* sinkt (Verhältnis *h/c* sinkt - mit Kleinbuchstaben sind die Anteile der entsprechenden Elemente bezeichnet).  Abbildung ‑: Typische Zusammensetzung von festen Brennstoffen. Als Vergleich sind auch die erneuerbaren Brennstoffe Holz und daraus gewonnene Zellulose aufgeführt. Angegeben sind Massenanteile der chemischen Elemente. |
|  | Braunkohle ist erdgeschichtlich viel jünger als Steinkohle, und darum typischerweise auch weniger tief in der Erde vergraben. |
| Entstehung von Erdöl und Erdgas | Die Entstehung von Erdöl und Erdgas verläuft prinzipiell ganz ähnlich wie die Entstehung der Kohle. Ausgangspunkt sind hierbei aber nicht Sümpfe, sondern die Schelfmeere (flache nährstoffreiche Meere um die Kontinente). Hier entsteht in den Ozeanen viel Biomasse (Plankton), die später abstirbt und auf den Meeresboden sinkt. In grosser Tiefe ist das Wasser sauerstoffarm und die Zersetzung erfolgt nur langsam. Gleichzeitig wird von Flüssen viel feinkörniges Gestein in die Ozeane getragen das sich ebenfalls auf dem Meeresboden ablagert, und die Biomasse luftdicht abdeckt – womit die Voraussetzung für die Entstehung von Kohlenwasserstoffen gegeben ist. Damit tatsächlich Erdöl entsteht sind wieder hohe Temperaturen und Drücke nötig – im Temperaturbereich von 60-120°C (entspricht 2-4 km Tiefe) entsteht aus der Biomasse Erdöl. Bei noch höheren Temperaturen (also grösseren Tiefen) entsteht Erdgas.  Das Gestein in dem das Erdöl gebildet wurde, heisst „Muttergestein“ (source rock). Weil Erdöl und Erdgas flüssig/gasförmig sind und eine viel kleinere Dichte als Stein aufweisen, steigen sie nach Möglichkeit Richtung Erdoberfläche auf – falls das Muttergestein eine gewisse Durchlässigkeit („Permeabilität“) aufweist, so kann das Erdöl und Erdgas auf Wanderschaft gehen. Es kann durch poröse Gesteine (z.B. Sandstein) weiter hinaufsteigen. Wenn kein Hindernis auftritt, wandert das Erdöl/Erdgas bis an die Erdoberfläche wo das Erdgas und die flüchtigeren Bestandteile des Erdöls in die Atmosphäre entweichen können; die längerkettigen, schwerer flüchtigen Bestandteile des Erdöls bleiben übrig und bilden Ölsand (wie in Kanada).  Trifft das Erdöl bei seiner Migration hingegen auf eine undurchlässige Gesteinsschicht, so kann es nicht weiter, und es sammelt sich immer mehr Erdöl/Erdgas in dieser geologischen Falle an. Das poröse Gestein unterhalb der undurchlässigen Schicht wird mit Öl und Gas gesättigt, und man nennt dies nun ein Speichergestein (reservoir rock). |
|  | Image03  Abbildung ‑: Verschiedene Arten geologischer Fallen für Erdöl und Erdgas (A: strukturelle oder tektonische Falle, B: Störung, C: Salzstock, D: stratigraphische Falle) |
| Wie findet man Erdöl und Erdgas? | Die Suche nach Erdöl- und Erdgasvorkommen heisst Prospektion oder Exploration. Die frühesten Vorkommen wurden an Orten gefunden, an denen die Sperrschicht nicht ganz dicht war, so dass Erdöl bis zur Erdoberfläche gelangen konnte – so konnte man direkt sehen dass in dieser Gegend Erdöl vorhanden war. Mit der Zeit entwickelte sich das Verständnis für die Erdölentstehung, und man suchte gezielt nach geologischen Fallen. Man kann beispielsweise bei einer Sondierbohrung die Gesteinsschichten analysieren und erhält so eine Vorstellung über die Beschaffenheit des Untergrunds – man sucht spezifisch nach einem porösen Gestein unterhalb eines dichten Gesteins, das so gestaltet ist dass eine geologische Falle entsteht.  Moderne Messtechnik ist bei der Exploration heute nicht mehr wegzudenken. Zwei Beispiele dazu: Salzstöcke haben eine geringere Dichte als Gestein, und können daher durch eine lokal tiefere Erdbeschleunigung detektiert werden. Auch poröses Gestein mit Gas in seinen Poren hat eine geringe Dichte mit demselben Effekt. Mit sogenannten Gravimetern kann die Erdbeschleunigung lokal gemessen werden, und es können potentiell interessante Gebiete detektiert werden. Ein weiteres beliebtes Verfahren ist die Reflexionsseismographie. Hier werden Schallwellen von einer Schallquelle in den Boden geschickt, und von sogenannten Geophonen werden die Echos der Schallquelle detektiert. An den Grenzen zwischen einzelnen Gesteinsschichten treten Reflexionen von Schallwellen auf.  http://www.geoexpert.ch/uploads/1/1/9/3/11930159/3602335_orig.gif?456  Abbildung ‑: Prinzip der Reflexionsseismographie |
|  | Durch sehr rechenintensive Algorithmen (und darum noch nicht seit sehr langem…) kann aus den Signalen der Geophone ein genaues dreidimensionales Abbild des Erdreichs gewonnen werden, in bis zu 10 km Tiefe (!). Das Verfahren funktioniert auch im Meer; die Schallquelle wird von Schiffen mitgeführt. |
| Förderung fossiler Brennstoffe | Sind die fossilen Brennstoffe durch erfolgreiche Prospektion gefunden worden, müssen sie gefördert werden. Die verschiedenen Brennstoffe erfordern unterschiedlichen Fördertechniken |
| Förderung von Steinkohle | Durch die Ablagerung von mächtigen Schichten von organischem Material sind durch die Inkohlung Kohleschichten (als *Kohleflöz* bezeichnet) entstanden, die im Laufe der Zeit von mächtigen Gesteinsschichten überlagert wurden. Deshalb sind Kohlevorkommen oft tief "unter Tag" gelagert und müssen mittels Bergbau-Technik über Schächte und Stollen gewonnen werden.  Mit heutiger Technik kann Kohle wirtschaftlich bis zu einer Tiefe von etwa 1700 m gewonnen werden.    Abbildung ‑: Abbau von Steinkohle in einem Bergwerk.  Moderner Bergbau wie er in Europa und in den USA / Kanada betrieben wird, ist sicher und sehr produktiv. Mächtige Kohleflöze mit Dicken über 1.8 m werden mit grossen Fräsen (Schrämladern) abgefräst. Bei kleineren Flözen kommen Kohlehobel zum Einsatz. Der Abbau geschieht unter sogenannten Schreitschildern, das sind mächtige hydraulische Stützen, die das Einstürzen der Decke verhindern. Nach den Schreitschildern wird der Hohlraum, der durch den Abbau der Kohle entstanden ist mit Gestein aufgefüllt. (Siehe Bilder in den Folien) |
| Braunkohle: Vorkommen und Gewinnung | Braunkohle ist weniger alt als Steinkohle und deshalb oft auch weniger stark mit Gesteinsschichten überlagert. Bei oberflächennahen Schichten kann Braunkohle im sogenannten Tagbau gewonnen werden (Tagbau bis zu einer Tiefe von etwa 400 m!). Dabei wird zuerst die Deckschicht abgetragen und anschliessend die Braunkohle gewonnen und die Grube wieder zugeschüttet. Da das entnommene Volumen fehlt, werden in der neu gestalteten Landschaft nach der Aufschüttung Seen angelegt. Die Braunkohle wird mit riesigen Baggern gefördert, die zu den grössten Maschinen gehören die die Menschen je angefertigt haben. Man arbeitet sich z.B. in Deutschland entlang der Braunkohlevorkommen vor, und ganze Dörfer müssen dem Braunkohletagbau weichen.    Abbildung ‑: **Braunkohletagbau in Hambach (D), 400m unter Niveau, Abbau von 40 Mio. Tonnen Braunkohle und von 240 Mio. Tonnen Abraum / Jahr.** |
| Förderung von Erdöl und Erdgas | Hat man eine vielversprechende geologische Struktur gefunden, so wird eine Bohrung in die vermutete geologische Falle abgeteuft. Falls in der Falle Kohlenwasserstoffe vorhanden sind, so ist aufgrund des Dichteunterschieds immer zuoberst das Erdgas, darunter das Erdöl und zuunterst Wasser zu finden (Wasser findet man immer in den Böden). Bei den bisher beschriebenen konventionellen Vorkommen steht die geologische Falle unter grossem Druck (weil tief im Boden), und wenn man sie anbohrt, so entweicht das Erdgas und ein Teil des Erdöls aufgrund des Überdrucks von selbst. Nach einiger Zeit ist der Überdruck weg, und man muss das Erdöl aktiv fördern, bzw. durch gezielte Injektion von Gas oder Wasser in das Ölfeld zu der Bohrung treiben.  http://www.waterdropcycle.com/images/water_flood.jpg  Abbildung ‑: Wasserflutung eines Erdölfelds  Mit der Wasserflutung lässt sich ein weiterer Teil des Öls aus dem Feld gewinnen. Die „Entölung“ des Felds ist aber bei weitem nicht vollständig – man kann ca. 20-30% des Erdöls so gewinnen. Es gibt Anteile des Erdöls die nur sehr schwer aus dem Gestein lösbar sind – je längerkettiger die Kohlenwasserstoffe sind, desto weniger gut fliessen sie. |
| Enhanced Oil Recovery | Um diese teils sehr viskosen Substanzen auch noch zu gewinnen, gibt es weitere Methoden, die unter dem Sammelbegriff „Enhanced Oil Recovery“ (EOR) laufen. Man kann z.B. Dampf injizieren, und durch die hohe Temperatur werden die zähflüssigen Bestandteile des Erdöls flüssiger und können gefördert werden. Andere Methoden sind die Injektion von Chemikalien die die Oberflächenspannung des Öls heruntersetzen und es so mobiler machen (ähnlich wie Waschmittel), oder die Injektion von Mikroben die die längerkettigen Kohlenwasserstoffe in kürzere Teile abbauen können. Man kann mit EOR Ausbeutequoten von bis zu 50% erreichen – d.h. auch mit der besten Technik bleibt etwa die Hälfte des Öls im Boden! EOR ist immer teuer und lohnt sich nur wenn der Ölpreis hoch ist. |
| Fracking | In den letzten ca. 5 Jahren wurde in den USA in grossem Stil eine Technik angewendet um Erdöl auch direkt aus dem Muttergestein zu gewinnen: das Fracking. Dabei wird eine Bohrung in das Muttergestein durchgeführt, und durch Injektion von Wasser unter Hochdruck wird das Muttergestein gesprengt. Die dabei entstehenden Risse machen das Muttergestein durchlässig für Erdöl und Erdgas. Damit die Risse nach Abbau des Drucks bestehen bleiben wird das Wasser mit Sand versetzt. Die Sandkörner in den Rissen sorgen dafür dass sich die Risse nicht sofort wieder schliessen können. Zusätzlich wird das Wasser auch mit allerhand Chemikalien versetzt die dafür sorgen, dass das Öl besser fliesst.  Oelvorkommen  Abbildung ‑: Vergleich konventioneller Förderung mit Fracking  Eine Voraussetzung dafür dass Fracking wirtschaftlich angewendet werden kann, ist die präzise Steuerung des Bohrkopfs. Die Bohrung startet senkrecht nach unten, und wird dann im Muttergestein horizontal geschwenkt, so dass man mit einer einzelnen Bohrung möglichst viel Muttergestein aufbrechen kann (viel mehr als wenn man ein senkrechtes Loch bohren würde). |
| Fracking-Boom in den USA | Die Erdölförderung in den USA war in den Jahren von ca. 1970-2010 rückläufig, und man hat damit gerechnet dass die Erdölförderung stetig weiter zurückgehen würde. Der Fracking-Boom seit ca. 2010 hat die Erdölförderung in nur 5 Jahren verdoppelt, und ist damit mitverantwortlich für die aktuelle Ölschwemme auf den Märkten und dem dadurch ausgelösten Ölpreissturz. Seit Anfang 2015 stagniert die Ölförderung in den USA allerdings wieder – der tiefe Ölpreis entfaltet seine Wirkung: Erdölförderung per Fracking ist viel teurer als die Förderung konventionellen Erdöls, und darum haben viele Produzenten beschlossen auf bessere Zeiten zu warten und momentan keine oder viel weniger neue Bohrungen zu machen. |
| Fracking im Rest der Welt? | Die USA sind derzeit das einzige Land das Fracking im grossen Stil betreibt. Es wird aber vermutet dass es in vielen weiteren Ländern grosse unkonventionelle Öl- und Gasvorkommen gibt, allen voran in China, in dem mehr derartige Brennstoffe vermutet werden als in den USA. |
| Wie viel fossile Brennstoffe gibt es noch? | Die fossilen Brennstoffe wurden wie oben dargestellt während Hunderten von Millionen Jahren gebildet, und es stellt sich die natürliche Frage: wie viel Kohle, Erdöl und Erdgas gibt es überhaupt auf der Welt? Und wie lange können wir noch so weitermachen wie bisher bis diese Stoffe verbraucht sind? |
| Ressourcen und Reserven | Die Ressource ist die Gesamtheit eines Stoffs der auf der Erde vorhanden ist (egal was genau – Erdöl, Gold, Lithium, Sand, …). Naturgemäss weiss Niemand genau wie gross die Ressource ist und man kann nur begründete Schätzungen dafür machen. Die sogenannten Reserven hingegen sind alle Vorkommen, die mit hinreichender Sicherheit bekannt sind, und die zu aktuellen Preisen wirtschaftlich gefördert werden können. Die Reserven sind beispielsweise aufgrund von Exploration einigermassen bekannt.  Die Ressource ist damit immer grösser als die Reserve, nimmt aber im Laufe der Zeit immer nur ab, da sie mit der Zeit aufgebraucht wird. Die Reserve hingegen kann zu- oder abnehmen. Zunahmen von Reserven sind möglich durch…   * Funde von bisher unbekannten Vorkommen * Neubewertung von alten Vorkommen aufgrund besserer Technologie (z.B. enhanced oil recovery, Fracking) * Steigenden Weltmarktpreisen die bisher ökonomisch unattraktive Vorkommen plötzlich wirtschaftlich machen. |
| Unsicherheit bei Ressourcen und Reserven | Die Ressourcen sind naturgemäss unsicher, da nicht die ganze Welt im Detail erkundet ist. Bei den Reserven gibt es allerdings auch grosse Unsicherheiten:  Die Reserven werden nicht nur durch Geologen geschätzt sondern auch von Managern von Ölkonzernen die eventuell einen Bonus erhalten wenn die Reserven steigen, oder von Politikern in OPEC-Staaten (Kartell der Erdölproduzierenden Länder) die eine gewisse Motivation haben falsche Zahlen anzugeben: die erlaubte Förderquote der OPEC-Staaten ist proportional zu ihren Reserven…  Sicher ist nur dass die Ressourcen und Reserven endlich sind, und es ist daher eine wichtige Aufgabe der Energietechnik alternative Energiequellen zu erschliessen bevor die fossilen Brennstoffe knapp werden. |
| Aktuelle Reserven fossiler Brennstoffe | Laut BP-Statistik sind die Reserven fossiler Brennstoffe im Jahr 2014 wie folgt:   * Erdöl: 1700 Milliarden Barrel (9700 EJ), etwa die Hälfte davon im mittleren Osten * Erdgas: 187 Trillionen m3 (7000 EJ), fast die Hälfte davon im mittleren Osten * Kohle: 890‘000 Millionen Tonnen (25’000 EJ), je etwa 1/3 in Nordamerika, Asien und Eurasien.   Schaut man vergangene Schätzungen zu Reserven an, so stellt man fest, dass die Erdöl- und Erdgasreserven in den letzten 20 Jahren stark angestiegen sind (um 50-60%), während die Kohlereserven um knapp 15% gesunken sind. Ein wichtiger Grund für die gestiegenen Reserven beim Erdöl und Erdgas liegt im stark gestiegenen Preis (zu der Zeit als diese BP-Statistik gemacht wurde, lag der Ölpreis noch etwa bei 100$ pro Fass), womit z.B. der Ölsand in Venezuela plötzlich als Reserve deklariert wurde. Venezuela fördert aber derzeit überhaupt kein Öl aus Ölsand, hat die Technologie dazu nicht, und ausländische Firmen werden sich hüten dort zu investieren. In diesem Sinne sind diese ausgewiesenen Reserven momentan kaum relevant, und sollten – falls der Ölpreis weiterhin so tief bleibt – auch wieder stark zurückgehen. |
| Reserven und Weltklima | Man kann sich nun fragen, wie viel CO2 entsteht wenn man sämtliche bekannten Reserven fossiler Brennstoffe der Welt verbrennen würde. Wissenschaftler haben berechnet (?! Modelliert? Geschätzt?), dass die CO2-Konzentration in der Atmosphäre auf bis zu 1400 ppm ansteigen würde, dass sämtliches Eis in der Arktis und Antarktis schmelzen würde, die Meeresspiegel um 60 Meter ansteigen würden und weite Landstriche der Erde aufgrund hoher Temperaturen unbewohnbar würden (Temperaturen über 35°C sind für Menschen tödlich). Ob diese Schreckensszenarien eintreffen werden oder nicht weiss Niemand mit Bestimmtheit – aber es wäre wohl ziemlich dumm, diese Theorien experimentell nachzuprüfen! Die Wissenschaft sagt, dass von den bekannten fossilen Brennstoffreserven mindestens 2/3 im Boden bleiben müssen, um den Klimawandel einigermassen im Griff zu behalten. |
| Wie lange reichen die Reserven noch? | Wenn man unabhängig vom Weltklima davon ausgeht, dass alle fossilen Brennstoffe verbrannt werden, so kann man sich leicht überlegen wie lange es dauert bis sie aufgebraucht sind: Man berechnet die sogenannte statische Reichweite als Verhältnis der Grösse der Reserven zum aktuellen Verbrauch pro Jahr:    Die Reichweite wird als statische Reichweite bezeichnet, wenn der Verbrauch pro Jahr als konstant angenommen wird (in der Vergangenheit hat er stets zugenommen). In diesen Gleichungen ist alles unsicher! Die Ressourcen und Reserven sind unsicher, wie schon dargestellt, aber auch die implizite Prognose des konstanten Verbrauchs ist unsicher, daher ist die statische Reichweite erst recht unsicher. Trotzdem lohnt es sich, die statische Reichweite sowie ihre historische Entwicklung anzuschauen. |
| Reichweite von Erdöl | Abbildung ‑: statische Reichweite von Erdöl laut BP-Statistik  In der BP-Statistik ist die statische Reichweite (R/P-ratio) für die letzten 30 Jahre angegeben, und man erkennt in der Grafik dass die statische Reichweite für die ganze Welt in den letzten 30 Jahren von ca. 40 auf über 50 Jahre angestiegen ist – obwohl wir dauernd Erdöl verbraucht haben. Der Grund liegt im schon beschriebenen Anstieg der Reserven. Sehr schön sichtbar ist dies für Südamerika, wo eine Neubewertung der Ölsande von Venezuela ab 2008 zu einer viel grösseren Reichweite für Südamerika geführt hat. |
| Reichweiten aller fossilen Brennstoffe | Wer sich im Detail für die statischen Reichweiten und ihre Entwicklung interessiert, dem sei die BP-Statistik ans Herz gelegt. Als Kürzest-Zusammenfassung gilt derzeit für die Reichweiten gerundet etwa:   * Erdöl und Erdgas: ca. 50 Jahre * Kohle: ca. 100 Jahre   Die regionalen Reichweiten (d.h. für Europa oder Amerika alleine) können stark davon abweichen. |
| Zusammenfassung zu den fossilen Brennstoffen | Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es noch sehr viele fossile Brennstoffe in der Erdkruste gibt, viel mehr als wir laut Klimawissenschaftlern verbrennen dürfen, wenn wir die Erde für die Menschheit einigermassen lebenswert erhalten wollen. Die statische Reichweite der einzelnen Brennstoffe ist 50 Jahre oder mehr, und hat in den letzten Jahrzehnten kaum abgenommen. Man darf davon ausgehen, dass auch weiter durch Fortschritte in der Technik und der Exploration die Reichweiten kaum sinken werden. Damit wird die Begrenzung des Klimawandels wichtiger als die Menge noch vorhandener fossiler Brennstoffe: egal wie viel wir davon noch zusätzlich finden, wir dürfen sie sowieso nicht verbrennen. |
| Kernenergie | |
| Kernbrennstoffe (heute) | In heutigen Atomkraftwerken wird Uran gespalten, spezifisch das seltene Isotop 235U (0.7%), das viel weniger häufig vorkommt als 238U (99.3%). Für die heutigen Kernreaktoren muss das Uran „angereichert“ werden, d.h. der Gehalt an 235U muss auf 3-5% gesteigert werden. Dies ist sehr aufwändig, da sich die Isotope schlecht trennen lassen.  Die Kernenergie deckt heute knapp 6% des Welt-Primärenergiebedarfs. |
| Uranreserven | Auch die Uranreserven sind endlich. Die bekannten Uranreserven weltweit betragen ca. 5 Millionen Tonnen Uran (+- grosse Unsicherheit) und ergeben bei einem Verbrauch von jährlich ca. 67‘000 Tonnen eine statische Reichweite von ca. 80 Jahren. Würde man hingegen aus Klimaschutzgründen alle Kohlekraftwerke der Welt durch Atomkraftwerke ersetzen, so würde der Verbrauch von Uran um einen Faktor 4 grösser, und die Reichweite würde sich auf 15-50 Jahre verkürzen – auch hier scheint die Endlichkeit der Ressource absehbar. |
| Verlängerung der Reichweite mit Brutreaktoren | Eine „einfache“ Möglichkeit (mindestens theoretisch) zu einer drastischen Verlängerung der Reichweite bilden sogenannte Brutreaktoren: Bei allen Kernreaktoren werden die bei der Kettenreaktion entstehenden Neutronen teilweise von den 238U-Kernen eingefangen. Ein Neutron mehr oder weniger ändert das chemische Element bekanntlich nicht, sondern ändert einfach das Isotop: es ist nun 239U. Dieses Isotop ist instabil und zerfällt mit einem doppelten —-Zerfall in Plutonium 239Pu. Dieses Plutonium ist selber wieder ein Kernbrennstoff, und wird auch gespalten, und Energie wird freigesetzt. Damit ist es gelungen, auch das viel häufiger vorkommende 238U als Kernbrennstoff zu benützen. Allerdings passiert dieser Prozess in einem konventionellen Kernreaktor viel zu wenig oft als dass er relevant ist. Man muss also den Reaktor so bauen, dass möglichst viel 238U zu 239Pu konvertiert wird. Man misst den Erfolg des Brutprozesses mit dem sogenannten Brutverhältnis – es gibt an, wie viele neue spaltbare Atome pro verbrauchtes Brennstoffatom entstehen. Ist das Brutverhältnis > 1, so erzeugt der Reaktor mehr neues Plutonium als dass er Uran verbraucht.  Damit das Brutverhältnis hoch ist, müssen im Reaktor möglichst viele Neutronen entstehen (dies erhöht die Wahrscheinlichkeit dass eine Konversion von 238U zu 239Pu stattfindet). Dies passiert wenn die Kernspaltung mit „schnellen“ Neutronen (anstatt vom Moderator abgebremsten „thermischen“ Neutronen) läuft. Solche Reaktoren nennt man „schnelle Brüter“, nicht weil sie schnell brüten, sondern weil sie mit schnellen Neutronen arbeiten. Das bekannteste Exemplar eines schnellen Brüters war der „Super Phénix“ in Creys-Malville in Frankreich, unweit von Genf. Er wurde von 1985 bis 1996 betrieben. Zahlreiche Störfälle während der Laufzeit liessen das Vertrauen in diese Technik schwinden. Ausserdem wird bei diesem Reaktortyp sehr viel hochgiftiges und waffenfähiges Plutonium produziert, was grundsätzlich wenig wünschenswert ist. Falls die technischen Schwierigkeiten mit Brutreaktoren gelöst werden könnten, so würde die Reichweite der Uranvorräte schlagartig um einen Faktor 50 gesteigert, und damit nach menschlichem Ermessen beliebig gross. |
| Unkonventionelles Uran | In konventionellen Uranlagerstätten findet man Uranerz mit 0.2…2 Gewichts-% Uran. Im Meerwasser sind ca. 4 Milliarden Tonnen Uran gelöst, d.h. ca. 1000x mehr als in konventionellen Lagerstätten. Es wird daher auch an Verfahren geforscht um Uran aus Meerwasser zu gewinnen. Die nötigen Wassermengen die dazu umgewälzt werden müssten sind allerdings riesig. |
| Thoriumreaktoren | Aufgrund der Endlichkeit der Uranvorräte und der Schwierigkeiten mit den Brutreaktoren haben Reaktoren die mit Thorium betrieben werden in den letzten Jahren wieder stark an Interesse gewonnen. Diese Reaktoren arbeiten als Flüssigsalzreaktoren, in denen der Kernbrennstoff als flüssiges Salz vorliegt. Der Kernbrennstoff ist gleichzeitig auch das Fluid zur Wärmeübertragung. Ist die Kernspaltung einmal wie üblich mit Uran oder Plutonium in Gang gesetzt, kann der Reaktor mit dem nicht spaltbaren Thorium-Isotop 232Th betrieben werden, das wiederum in einem Brutprozess in das spaltbare Uranisotop 233U konvertiert wird. Thorium kommt in der Erdkruste einige 100x häufiger vor als 235U, und hätte damit auch das Potential um nach menschlichen Zeitmassstäben als unerschöpfliche Energiequelle zu dienen. Allerdings gibt es bisher erst einige Demonstrationsreaktoren, und ob das Prinzip sich wirklich durchsetzen kann muss erst noch bewiesen werden. |
| Zusammenfassung | Auch bei der Kernenergie sind die bekannten Reserven von 235U endlich, und die Reichweite von ca. 80 Jahren ist begrenzt. Bei einem klimapolitisch motivierten starken Ausbau der Kernenergie würde die heute bekannte Reichweite gar auf 20 Jahre schrumpfen. Es gibt diverse Ansätze um die Reichweite der Kernenergie stark zu verlängern (Brutreaktoren, Thoriumreaktoren, unkonventionelles Uran), aber alle sind noch in einem experimentellen Stadium und es ist unsicher ob sich die Hoffnungen gewisser Kreise auf eine Renaissance der Kernenergie jemals erfüllen. |

|  |  |
| --- | --- |
| Erneuerbare Energie | |
| Einleitung | In diesem Abschnitt werden erneuerbare Energieressourcen betrachtet. Da bei den erneuerbaren Energien das Kriterium der Erschöpfbarkeit entfällt, und weil sie nicht in so grossen Mengen und jederzeit verfügbar sind wie die endlichen fossilen Energien braucht es andere Kriterien zur Einteilung bzw. Bewertung erneuerbarer Energieressourcen.  Nach den allgemeinen Betrachtungen werden zwei spezifische erneuerbare Energieformen, nämlich Solarenergie und Geothermie, genauer betrachtet. |
| Charakterisierung der erneuerbaren Energieressourcen | |
| Technologien für erneuerbare Energie | Erneuerbare Energie liegt in ganz vielen verschiedenen Erscheinungsformen vor, und um aus diesen Formen handelbare Formen von Endenergie bzw. direkt Nutzenergie zu erzeugen, sind viele unterschiedliche Technologien nötig: |
|  | Abbildung ‑: Umformungen von den Erscheinungsformen der erneuerbaren Energie zur Endenergie (Figur in Anlehnung an Kaltschmitt, Wiese, Streicher; Erneuerbare Energien; Springer 2003)  Die unterschiedlichen Erscheinungsformen erfordern eine Vielzahl von Technologien zur Energieumwandlung. Dabei ergeben sich folgende Probleme:   1. Die Entwicklung neuer und angepasster Technologien ist aufwändig und es dauert lange, bis die Technologien ausgereift sind und mit den herkömmlichen Technologien der nicht erneuerbaren Energien konkurrieren können. 2. Da örtlich nicht überall die gleichen Technologien eingesetzt werden können (Wellen, Wind ...) muss *an jeder Stelle der Situation angepasste Technologie* eingesetzt werden. 3. Erneuerbare Energie steht nicht immer dann zur Verfügung wenn sie gebraucht würde. Daher sind auch neue Techniken für die Speicherung gefragt, aber es werden wohl auch Anpassungen der Konsumenten notwendig sein. Dazu gehören auch wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen. Zwei Beispiele dafür:    * Der Strompreis wird stärker flexibilisiert – anstelle des heutigen Modells mit Tag- und Nachttarif könnte ein Modell treten, in dem der Strompreis laufend dem Angebot angepasst wird    * Gewisse Energieformen werden gefördert und andere nicht – in der Schweiz wird beispielsweise erneuerbare Energie mit der KEV gefördert, während auf Heizöl laufend höhere CO2-Abgaben zu bezahlen sind. |
| Kriterien zur Beurteilung erneuerbarer Energieressourcen | Weil das Kriterium der Erschöpfbarkeit entfällt, müssen die vielen unterschiedlichen Erscheinungsformen der erneuerbaren Energie mit anderen Kriterien beurteilt werden, beispielsweise:   * Energieform und notwendige Umwandlungskette   Eigenschaften zusammenfassen in Potenziale   * Energiedichte, * räumliche und zeitliche Angebotsvariation * Speicherfähigkeit * Energierückzahldauer * Kosten, Wirtschaftlichkeit * Umweltverträglichkeit * Gesellschaftliche Akzeptanz, Risiken   Um diese vielen Kriterien zusammenzufassen werden sogenannte Potenziale gebildet. Mit Hilfe dieser Potenzialen lassen sich gewisse Fragen beantworten: |
| Einteilung nach Potenzialen der erneuerbaren Energien | * Wie gross ist das erneuerbare Energieangebot? * Wie kann die erneuerbare Ressource technisch umgeformt und damit nutzbar gemacht werden? * Ist das ganze System wirtschaftlich? * Kann die Ressource unter Berücksichtigung ökologischer, gesellschaftlicher und politischer Randbedingungen erschlossen werden? |
| Potenziale: Überblick und Definitionen | Welche Potenziale werden sinnvollerweise definiert? Im Buch von Kaltschmitt et. al. 2003 werden 4 Potenziale definiert, diese sind in Abbildung 5‑11 dargestellt.    Abbildung ‑: Potenziale erneuerbarer Energien (Kaltschmitt et. al. 2003) |
| Theoretisches Potenzial | Das theoretische Potenzial einer erneuerbaren Energie ist wie folgt definiert:   * *Energiemenge* die in einem bestimmten *Zeitraum* (z. B. 1 Jahr) weltweit oder in einer bestimmten Region *theoretisch, physikalisch nutzbar* ist. * Das theoretische Potenzial markiert die Grenze des theoretisch möglichen Beitrages zur Energieversorgung. Beachten Sie dass das theoretische Potenzial normalerweise nur zu einem sehr kleinen Teil ausgeschöpft werden kann!   Beispiele zum theoretischen Potenzial sind:   * auf die Erde eingestrahlte Sonnenenergie pro Jahr * kinetische Energie des Windes pro Jahr z. B. in der oberflächennahen Schicht bis 200 m Höhe, in der Schweiz * innere Energie der Erdkruste bis in eine Tiefe von 10 km, weltweit. * auf eine Dachfläche von 100m2 mit einer Neigung von 35° und einer Ausrichtung nach Südwest in Brugg eingestrahlte Energie pro Jahr. |
| Technisches Potenzial | Das technische Potenzial einer erneuerbaren Energie folgt aus dem theoretischen Potenzial indem *technische Randbedingungen* berücksichtigt werden:   * *Energiemenge* die in einem bestimmten Zeitraum und mit einer bestimmten *technischen Umsetzung nutzbar* ist. * Es gibt verschiedene technische Potentiale, je nach verwendeter Technik. Da die Technik sich laufend weiterentwickelt (Beispiel: der Wirkungsgrad von Solarzellen steigt mit der Zeit), steigt normalerweise das technische Potenzial mit der Zeit an. |
| Leistungsdichte | Das technische Potenzial kann auf die Grundfläche des Kraftwerks bezogen werden: man fragt sich: wenn ich eine Solaranlage bzw. einen Windpark baue, wie viel Energie bekomme ich pro m2 Fläche? Oder zeitlich normiert: wie gross ist die mittlere Leistung pro m2? Man nennt dies die Leistungsdichte, und es ist eine sehr interessante Zahl. |
|  |  |
|  | Wir erinnern uns an die Leistungsdichte der Solarstrahlung in der Schweiz: diese beträgt etwa 125 W/m2 im Mittel über das ganze Jahr. Da die technische Umwandlung dieser Solarstrahlung nie vollständig gelingt, ist es nicht erstaunlich, dass erneuerbare Energien deutlich tiefere Leistungsdichten aufweisen. Einige typische Werte der Leistungsdichte von erneuerbaren Energien sind:   * Solarthermieanlage Schweiz ≈ 40 W/m2 * Solar-Photovoltaik auf Dach, Schweiz ≈ 15 W/m2 * Thermisches Solarkraftwerk, Spanien ≈ 20 W/m2 * Biomasseanbau 0.03 W/m2 bis 0.5 W/m2 (grosse Unterschiede je nach verwendeter Pflanzenart!) * Mittlerer geothermischer Wärmestrom: 0.06 W/m2 |
|  | Aufgabe: Wie gross ist die Leistungsdichte der Schweiz? Rechnen Sie den Bruttoenergieverbrauch pro Jahr in eine Leistung pro m2 um! (Die Fläche der Schweiz beträgt 42‘000 km2).  Was schliessen Sie aus Ihrem Resultat und dem Vergleich mit den typischen Leistungsdichten von erneuerbaren Energien oben? |
| Angebots- und Nachfragepotenzial | Zusätzlich kann unterschieden werden zwischen dem technischen Angebots- und dem Nachfragepotenzial. Dies ist eine sehr wichtige Unterscheidung: Oft ist es so dass die erneuerbare Energie nicht genau dann anfällt wenn sie gebraucht würde. Drei Beispiele für die Schweiz:   * Die auf einem Dach nutzbare solare Niedertemperaturwärme ist im Sommer viel grösser als im Winter (ca. Faktor 4). Heizenergiebedarf besteht aber vor allem im Winter, darum passen das Angebot und die Nachfrage nicht zusammen. * Solarstrom wird nur zur Tageszeit erzeugt. Wollte man die ganze Schweiz mit Photovoltaik betreiben, so gäbe es immer in der Nacht einen Strommangel. Es braucht zur Photovoltaik hinzu also andere Energieformen die auch in der Nacht verfügbar sind (oder bessere Energiespeicher!) * Im Sommer gibt es deutlich mehr Wasserkraft (mehr Regen + Schmelzwasser) als im Winter, die Nachfrage nach Strom ist aber im Winter höher. Durch Speicherkraftwerke wird ein Teil des Angebots in den Winter verschoben. |
| Wirtschaftliches Potenzial | Das wirtschaftliche Potenzial einer erneuerbaren Energie beschreibt den Anteil des technischen Potenzials, das unter den *gegebenen wirtschaftlichen Rahmen-bedingungen* genutzt werden kann. Das wirtschaftliche Potenzial ist abhängig von der eingesetzten Technik, der Höhe der Investition, dem Zinssatz und der Abschreibungsdauer, aber auch beispielsweise von Subventionen die vom Staat ausgerichtet werden (in der Schweiz z.B. die kostendeckende Einspeisevergütung KEV, die unwirtschaftliche Vorhaben zur Energiegewinnung wirtschaftlich macht).  Es kann daher unterschieden werden zwischen dem wirtschaftlichen Potenzial aus *betriebswirtschaftlicher*- oder *volkswirtschaftlicher* Sicht: auch wenn es für den Einzelnen unwirtschaftlich ist, beispielsweise eine Photovoltaikanlage auf sein Dach bauen zu lassen, so ist es für die Schweizer Volkswirtschaft als Ganzes eventuell sinnvoll (jemand anderes findet einen Job in der Solarbranche, zahlt Steuern, das Geld bleibt in der Schweiz anstatt dass es in den mittleren Osten abfliesst). Dies ist auch der Grund warum der Staat bestimmte Energieformen subventioniert. |
| Erntefaktor | Ein weiteres wichtiges Kriterium um erneuerbare Energien und die dazu eingesetzten Technologien zu bewerten ist der Erntefaktor *EF* der erneuerbaren Energie.  Dabei wird die gesamte Energieproduktion der erneuerbaren Energie mit dem Energieaufwand an nicht erneuerbarer Energie verglichen:    Bei der Berechnung des Erntefaktors muss man vorsichtig sein: braucht man beispielsweise chemische Energie bei der Herstellung einer Anlage die danach Strom erzeugt, so darf man wie üblich die beiden Energieformen nicht 1:1 vergleichen, sondern muss sie ihrer Wertigkeit entsprechend gewichten.  Ein Erntefaktor von 1 würde bedeuten, dass die Anlage in ihrer gesamten Lebensdauer nur gleich viel Energie erzeugen kann wie bei ihrer Herstellung benötigt wird – ein Nullsummenspiel das sich nicht lohnen würde. Man sucht also nach Systemen die möglichst hohe Erntefaktoren aufweisen. Aktuelle Zahlen zu Erntefaktoren sind:   * Solarthermisches Kraftwerk 50 * Photovoltaikanlage 10-20 (je nach Aufstellungsort) * Windenergie 50 * Laufwasserkraft: 100   Diese Zahlen sind natürlich nur als Schätzungen zu verstehen, jede einzelne Anlage ist wieder etwas anders! |
| Energierückzahldauer | Die Energierückzahldauer *t*R für eine Anlage zur Erzeugung erneuerbarer Energie ist dann erreicht wenn die Anlage so viel Energie erzeugt hat wie bei ihrer Herstellung gebraucht wurde, wobei die Energieformen natürlich wiederum bezüglich ihrer Wertigkeit zu gewichten sind. |
| Zusammenfassung | * Es existieren viele unterschiedliche Erscheinungsformen sowie zeitliche und räumliche Verteilungen des Angebotes der erneuerbaren Energien * Viele unterschiedliche Technologien für die Energieumwandlung sind notwendig * Oft sind auch neue Technologien für Transport, Speicherung, und Verbrauch notwendig * Oft sind neue wirtschaftliche, gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen notwendig   Zur Bewertung erneuerbarer Energien werden folgende Potenziale unterschieden:   * theoretisches Potenzial * technisches Potenzial * wirtschaftliches Potenzial   Weitere Möglichkeiten zur Bewertung sind Kennzahlen wie:   * Leistungsdichte, Erntefaktor, Energierückzahldauer. |
|  | Damit diese allgemeinen Betrachtungen anschaulicher werden, wenden wir sie auf zwei sehr gegensätzliche Formen erneuerbarer Energie an: Photovoltaik und Geothermie. |

|  |  |
| --- | --- |
| Solarenergie | |
| Einleitung | Der Energiefluss von der Sonne zur Erde ist mit grossem Abstand die grösste erneuerbare Energiequelle. Viele weitere erneuerbar Energieformen sind „nur“ Umwandlungen der Sonneneinstrahlung, und bieten darum logischerweise viel weniger Potenzial. In der Sprache des vorigen Kapitels: die weltweite Solarstrahlung hat ein viel grösseres theoretisches Potenzial als Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Wellenenergie. Damit ist auch bereits klar, dass die direkte Nutzung der Sonnenenergie der „Königsweg“ der erneuerbaren Energie ist. In diesem Kapitel wird hauptsächlich die Photovoltaik betrachtet, weil sie momentan die aussichtsreichste Technologie zur Nutzung der Solarenergie ist.  Die Solarbranche hat im letzten Jahrzehnt eine stürmische Entwicklung erlebt (mit Hochs und Tiefs). In den letzten 3 Jahren hat sich viel verändert, und man kann gut davon ausgehen dass sich in den nächsten 3 Jahren auch nochmal vieles ändert – Sie können davon ausgehen, dass bereits vieles anders sein wird wenn Sie Ihr Studium beendet haben. Versuchen Sie also im Folgenden Dinge die immer richtig sind (zB theoretisches Potenzial) zu unterscheiden von Dingen die in drei Jahren anders sein werden (zB Wirtschaftlichkeit und politische Rahmenbedingungen). |
| Bedeutung der Solarenergie in der Schweiz | Mit Hilfe von Solarenergie wurde laut GEST 2014 erzeugt:   * 614 GWh Wärme in Kollektoranlagen (≅ 2PJ) * 842 GWh Strom in Photovoltaikanlagen ( ≅ 3PJ)   Dies entspricht ca. 1.4% des Stromverbrauchs der Schweiz sowie 0.6% des Wärmebedarfs. Die Solarenergie liefert also noch sehr bescheidene Beiträge zum Schweizer Energieverbrauch, allerdings ist insbesondere die Zahl der Photovoltaikanlagen stark steigend. |
| Bedeutung der Solarenergie weltweit | Auch global gesehen ist die Solarenergie noch relativ unbedeutend. Laut der BP-Statistik wurde im Jahr 2014 weltweit 186 TWh Solarstrom, während die gesamte Stromerzeugung weltweit 23500 TWh betrug. Die Photovoltaik ist also weltweit gesehen auch noch deutlich unter 1% Beitrag, aber auch da ist sie stark steigend. |
| Charakterisierung der Solarenergie | Um die Solarenergie zu charakterisieren folgen wir der Systematik aus Kapitel 5.2.1. |
| Ursprung und theoretisches Potenzial der Solarenergie | In der Sonne läuft eine Kernfusionsreaktion ab die eine enorme Leistung erzeugt. Dadurch wird die Sonnenoberfläche sehr heiss (ca. 6000°C) und strahlt elektromagnetische Strahlung aus. Auf der Erdumlaufbahn, in 150 Millionen km Abstand von der Sonne ist die Bestrahlungsstärke ca. 1360 W/m2. Die jährliche Sonneneinstrahlung auf die Erde lässt sich leicht berechnen als die besonnte Fläche x Einstrahlung pro Fläche x Zeit:  E = ·R2·S·t = ·6‘370‘0002 m2·1000 W/m2··107s = 4 1024 J = 4 YJ (Yottajoule).  Die Menschheit braucht heute ca. 500 EJ pro Jahr, d.h. die Sonne liefert ca. 8000x mehr Energie als die gesamte Menschheit heute braucht. Es tönt also auf den ersten Blick ganz einfach, es scheint Sonnenenergie im Überfluss zu haben, unsere Zivilisation müsste ganz leicht damit zu betreiben sein. Ganz so leicht ist es doch nicht, wie wir gleich sehen werden. |
| Räumliche Verteilung der Solarenergie | Die Solarenergie steht nicht überall auf der Welt gleichmässig zur Verfügung – generell hat es umso mehr davon, je näher man beim Äquator ist, wobei regionale Unterschiede durch das Wetter auftreten können.    Abbildung ‑: weltweite Verteilung des Solarenergieangebots, als Mittel über das gesamte Jahr  Wie man der Abbildung leicht entnehmen kann, ist die Schweiz bzw. Europa als Ganzes nicht ideal gelegen für die Solarenergienutzung. Bei uns ist die mittlere Einstrahlung nur etwa halb so gross wie in sonnigen Gegenden (z.B. Kalifornien, Brasilien, Nordafrika, Indien, Australien etc.).  In Spanien, Süditalien, Griechenland ist das Solarenergieangebot ca. 1.8x höher als beispielsweise in Deutschland. Die vielen deutschen Solaranlagen würden also – in Südeuropa aufgestellt – 1.8x mehr Strom liefern als sie es in Deutschland tun. |
| Räumliche Verteilung der Solarenergie in der Schweiz | Auch innerhalb der Schweiz gibt es grosse Unterschiede: http://www.solarenergy-shop.ch/Datenblaetter/Karte%20Solar%20Strahlung%20Schweiz.jpg  Abbildung ‑: Sonneneinstrahlung in der Schweiz, im Jahresmittel |
|  | Wie man der Grafik leicht ansieht, ist das Mittelland weniger sonnig als die Berge. Insbesondere in grossen Höhen wäre die Sonneneinstrahlung sehr viel stärker (kein Nebel, weniger Dreck in der Atmosphäre), allerdings ist es ja nicht denkbar, auf den Berggipfeln Solaranlagen zu bauen. Neben dem Landschaftsschutz kommt in den Bergen die Problematik mit dem Schnee hinzu – die Solarmodule werden mindestens im Winter (gerade dann wenn der Strom in der Schweiz knapp ist) oft von Schnee bedeckt sein. Im Mittelland beträgt die Sonneneinstrahlung laut Grafik ca. 1100 kWh/m2 und Jahr, oder in eine Dauerleistung umgerechnet ca. 125 W/m2 |
| Theoretisches Potenzial Solarenergie Schweiz | Mit Hilfe der nun bekannten Sonneneinstrahlung auf die Erde können wir das theoretische Potenzial der Sonnenenergie berechnen. Das theoretische Potenzial bezieht sich immer auf das Energieangebot in einem bestimmten Zeitraum und an einem bestimmten Ort. Als Ort wollen wir hier annehmen, dass die Schweizer Dächer so gut wie möglich für Solarenergieerzeugung genutzt werden. Es gibt in der Schweiz nur selten „Freiflächenanlagen“ (die aktuell grösste Schweizer Solaranlage in Payerne auf 38‘000 m2 und einer Spitzenleistung von 6 MW ist eine solche Freiflächenanlage), da wir in der Schweiz nicht beliebig viel Landreserven haben. Darum ist es im Sinne des Landschaftsschutzes sinnvoller, die Anlagen auf Hausdächer zu bauen.  Für die Berechnung treffen wir die Annahme dass ein Anteil  = ¼ der Dachfläche kann genutzt werden (Südausrichtung); die Gebäudegrundfläche der Schweiz beträgt A = 400 km2. Damit ergibt sich für die nach Süden ausgerichteten Dachflächen der Schweiz ein theoretisches Potenzial von  = 1100 kWh/m2·a 108 m2 = 110 TWh ≅400PJ  Die auf die südlich ausgerichteten Dächer der Schweiz einfallende Sonnenstrahlung ist als bereits in der Grössenordnung des Schweizerischen Energieverbrauchs. |
| Technisches Potenzial der Solarenergie in der Schweiz | Das technische Potenzial ist immer kleiner als das theoretische Potenzial, und hängt von der verwendeten Technologie ab. Dabei gibt es verschiedene Technologien um die Solarenergie zu nutzen: |
|  | * Direkte Stromerzeugung (Photovoltaik) * Hochtemperatur-Solarthermie: durch Konzentration der Sonnenstrahlung erzeugt man Wärme bei ca. 400°C und nützt diese in einem Dampfkraftwerk um Strom zu erzeugen. Diese Technologie ist in der Schweiz kaum einsetzbar, da sie voraussetzt dass die Sonnenstrahlung * Niedertemperatur-Solarthermie: es wird ohne Konzentration der Sonnenstrahlung Wärme bei < 100°C erzeugt (für Warmwasser und Heizungsunterstützung)   Passiv-solares Bauen: Die Gebäudearchitektur wird so optimiert, dass das Gebäude selbst als Sonnenkollektor wirkt: grosse Fenster gegen Süden, die sich im Sommer verschatten lassen (z.B. durch Storen oder durch vorstehende Balkone automatisch). |
|  | Nehmen wir nun noch weiter an, dass wir Photovoltaik einsetzen wollen, und dass die Solaranlage einen Wirkungsgrad von 20% aufweist. Das technische Potenzial zur Stromerzeugung auf Schweizer Dächern beträgt dann 22 TWh (≅80PJ), d.h. 1/3 des Schweizerischen Strombedarfs (also „viel“). |
| Steigerung des technischen Potenzials | Eine weitere Steigerung scheint möglich indem in Zukunft bei der Architektur stärker auf die Gewinnung der Solarenergie geachtet wird (Flach- oder Pultdach, oder asymmetrisches Dach mit mehr Fläche nach Süden). Ebenfalls denkbar ist, dass die Solarzellen noch effizienter werden, wobei das Potential dort beschränkt ist (s. Kap. 4, Shockley-Queisser Limit) – die theoretische Grenze für den Wirkungsgrad von Silizium-Solarzellen beträgt 29%, praktisch erreicht werden heute schon 21%, d.h. hier kann nur noch eine kleine Steigerung erreicht werden.  Selbstverständlich kann das technische Potenzial stark erweitert werden wenn auch Freiflächenanlagen zugelassen werden. Wie wir im letzten Kapitel noch sehen werden, ist ein grösserer Beitrag der Solarenergie zur Schweizerischen Stromversorgung vermutlich weder sinnvoll noch nötig. |
| Angebots- und Nachfragepotenzial (bzw. zeitliche Variation des Solarenergieangebots) | Bisher haben wir lediglich das theoretische und technische Potenzial der Solarenergie im Jahresmittel betrachtet. Allerdings greift diese Betrachtungsweise viel zu kurz – Solarenergie steht immer nur am Tag zur Verfügung, und in der Nacht nicht; sie steht (mindestens in der Schweiz, bzw. in höheren Breitengraden) im Winter viel weniger zur Verfügung als im Sommer, und das Wetter spielt auch noch eine Rolle. Dies ist natürlich unglücklich, da die Nachfrage nach Heizungsenergie im Winter viel höher ist als im Sommer, d.h. das Angebot und die Nachfrage passen nicht zusammen! Eine interessante Frage ist hierbei wie stark das Angebot im Jahresverlauf schwankt. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt; zusätzlich ist auch noch der Heizbedarf dargestellt.    Abbildung ‑: Solarenergie-Angebot und Heizbedarf in Brugg im Monatsmittel  Man sieht dass der Heizbedarf und das Solarenergieangebot gerade gegensätzlich verlaufen. Im Winter liefert die Solaranlage (hier mit 32° Neigung gegen Süden ausgerichtet) nur ¼ der Energie die sie im Sommer liefert.  Beachten Sie: diese Berechnung stimmt nur für ähnliche Verhältnisse (d.h. Breitengrad um 45°, Neigung der Solaranlage 30° gegen Süden). In Ländern näher beim Äquator ist die jährliche Variation viel kleiner, in nordischen Ländern noch grösser. |
| Solarstromproduktion in Deutschland 2015 | Betrachtet man die Solarstromerzeugung in Deutschland für das ganze Jahr 2015, so sieht man ein ähnliches Bild: im Januar wurde 8x weniger Solarstrom erzeugt als im August. |
| Probleme mit der zeitlichen Angebotsvariation | Die Solarenergie ist zwar eine sehr mächtige Energieressource, aber sie fällt zeitlich sehr unterschiedlich an – nie in der Nacht, im Winter viel weniger als im Sommer, und ausserdem noch zufällig weniger bei schlechtem Wetter. Eine Photovoltaikanlage liefert bei vollem Sonnenschein ca. 10x mehr Leistung als im Jahresmittel. Dies führt dazu, dass die Integration der Photovoltaik in ein Stromnetz nicht unproblematisch ist. Stellen wir uns beispielsweise vor, dass das oben berechnete technische Potential von 1/3 der schweizerischen Stromerzeugung ausgeschöpft würde. Dies würde bedeuten, dass bei starker Sonneneinstrahlung 10x mehr, d.h. 3x der Schweizer Strombedarf, zur Verfügung stehen würde. Diese Strommengen würden ohne weitere Massnahmen einen Ausbau unseres Stromnetzes nötig machen, und eventuell auch weitere Speichermöglichkeiten erfordern. |
| Verstetigung der Produktion | Da die zeitliche Variation des Angebots problematisch ist, kann man sich auch überlegen ob man schon bei der Erstellung einer Anlage darauf achten kann, dass die Variation kleiner ausfällt – und dies ist durchaus möglich. Klassischerweise werden Solaranlagen nach Süden ausgerichtet, und erzielen dadurch einen maximalen Ertrag. Man kann aber auch Solaranlagen auf West-Ost-ausgerichteten Dächern bauen, die dann eine weniger scharfe Mittagsspitze produzieren, und insbesondere die nach Westen ausgerichtete Seite liefert auch noch Abends Strom, wenn die Nachfrage üblicherweise gross ist – während eine südlich ausgerichtete Anlage dann schon Feierabend macht. Um die starken saisonalen Schwankungen auszugleichen, kann die Neigung der Anlage verändert werden, dies ist in der folgenden Grafik gezeigt    Abbildung ‑: Solarstromproduktion einer Anlage auf dem Jungfraujoch mit 90° Neigung |
|  | Die Anlage hat eine Neigung von 90° (d.h. sie ist direkt an der Fassade angebracht). Man sieht sehr schön dass die Variation über das Jahr gesehen sehr viel kleiner ausfällt als bei den „optimal“ ausgerichteten Anlagen mit 30° Neigung. Natürlich erzielt die Anlage über das Jahr gesehen etwas weniger Energie als eine optimal ausgerichtete Anlage, aber wenn wir im Winter eher zu wenig Strom haben und im Sommer eher zu viel, dann muss man sich fragen welche Anlage besser ist! |
| Speicherung von Solarenergie | Man kann aufgrund dieser grossen zeitlichen Angebotsvariationen schliessen, dass eine stärkere Nutzung der Solarenergie neue Speichertechnologien nötig machen wird. Dies kann auf dem Niveau von Tagesspeichern sein, die den Tag-Nacht-Rhythmus ausgleichen (im Stil von Tesla’s „PowerWall“: ein 7kWh Batteriespeicher der für normale Haushalte problemlos die Nacht überbrücken kann, Kosten ca. 3000 CHF). Es kann aber auch auf dem Niveau von Saisonspeichern sein (vgl. Übungsaufgabe zum solar beheizten Mehrfamilienhaus), die in der Schweiz in Form von Speicherstauseen durchaus auch zur Verfügung stehen, in anderen Ländern hingegen kaum. |
| Wirtschaftliches Potenzial | Die Solarenergie wird in vielen Ländern zum Teil stark subventioniert. In diesem Sinne ist sie vielerorts noch unwirtschaftlich, wobei man fairerweise sagen muss dass auch sämtliche „konventionellen“ Arten der Stromproduktion subventioniert wurden und werden. Sicher ist, dass die Preise für die Solarstromerzeugung seit langem fallen; ein grosser Teil dieser Entwicklung kommt von der gesteigerten Produktionsmenge der Photovoltaikzellen, und von der Verlagerung der Produktion nach China. In Deutschland ist der Endkundenpreis für Aufdachanlagen von 5000€/kWp (2006) auf 1450€/kWp (2014) gefallen, d.h. um einen Faktor 4. Mit kWp wird die maximale Leistung der Anlage bezeichnet (Kilowatt-Peak). Im Durchschnitt erzeugt eine Anlage mit 1kWp wie schon erwähnt etwa 1/10 der maximalen Leistung, d.h. 100W im Mittel, oder ca. 900kWh pro Jahr. Macht man eine sehr einfache Rechnung in der man annimmt dass die Anlage 25 Jahre lebt, so würde sie insgesamt 25x900 = 22‘500 kWh produzieren, d.h. die Investitionskosten betragen ca. 5.6 €-cent pro kWh die man erhält. Selbstverständlich fallen noch gewisse Kosten an für Reparaturen, evtl. Reinigung usw. aber man sieht anhand dieser Zahlen dass es für Hausbesitzer in der Zwischenzeit finanziell attraktiv sein kann, eine Photovoltaikanlage zu kaufen. In sonnigeren Teilen der Welt sieht die Rechnung sogar noch besser aus. |
| Beispiel Solarpark „La Boverie“ | Die grösste Solaranlage der Schweiz wurde im September 2015 eingeweiht, der Solarpark „La Boverie“ in Payerne. Auf einer Fläche von 38‘000 m2 (7 Fussballfelder) steht eine Anlage mit einer Leistung von 6MWp. Man erwartet dass sie 6 Millionen kWh pro Jahr erzeugen wird (1000 kWh/kWp, ein klein bisschen mehr als die Berechnung oben). Die Investitionskosten betrugen 7.6 Millionen CHF, und man kann wieder die einfache Berechnung machen: Wenn die Anlage 25 Jahre läuft, so kostet eine kWh Strom ca. 5 Rappen – auch hier sind keine Unterhaltskosten miteinberechnet.  Diese etwas naiven Betrachtungen zu den Gestehungskosten für Solarstrom vernachlässigen auch die Tatsache, dass die Einbindung von grösseren Mengen Solarstrom einen Ausbau des Stromnetzes oder der Speichermöglichkeiten bedingen würde, d.h. zusätzliche Kosten verursachen würde, die hier nicht berücksichtigt sind.  Trotzdem sieht man, dass die Gestehungskosten für Solarstrom sich heute in einer ähnlichen Grössenordnung bewegen wie für konventionelle Anlagen (Der Strompreis in der Schweiz für Endkunden ist ca. 20 Rappen/kWh, allerdings ist die Hälfte davon die Netzbenutzung und „nur“ die andere Hälfte, 10 Rappen/kWh, die Energiekosten). |
| Netzparität | Bei jeder neuen Technologie ist es normal, dass sie zu Beginn teurer ist als herkömmliche Technik - so ist – es auch bei der Stromerzeugung. Sobald der Strompreis der neuen Technologie tiefer ist als der Strompreis aus dem Netz, so spricht man von „Netzparität“. Die folgende Abbildung zeigt, in welchen Regionen der Welt die Netzparität für Solarstrom bereits erreicht ist:  https://www.db.com/cr/img/15_03_10_netzparitaet_en.jpg  Abbildung ‑: Länder der Erde in denen Netzparität für Solarstrom erreicht ist (Studie der Deutschen Bank, 2015)  Wie man sieht, ist die Netzparität bereits vielerorts erreicht, d.h. es ist für Betriebe und private wirtschaftlich, eine Photovoltaikanlage zu kaufen. Es braucht allerdings einen langen Anlage-Zeithorizont – es dauert ca. 20 Jahre bis man dank der Anlage Geld verdient hat. |
| Eigenverbrauch | Die Frage, ob sich die Anlage wirtschaftlich rechnet oder nicht, ist heute oft eine Frage des Eigenverbrauchs: je höher der Eigenverbrauch ist, desto wirtschaftlicher ist die Anlage.  Bezieht man eine kWh Strom aus dem Netz, so bezahlt man sowohl die Energie (ca. 10 Rappen/kWh) wie den Netzpreis (auch ca. 10 Rappen/kWh). Speist man hingegen eine kWh Strom ins Netz ein, so wird einem nur der Energiepreis vergütet. Es lohnt sich also für den Anlagenbesitzer, den Strom selber zu verbrauchen. Dies mag auf den ersten Blick etwas sinnlos anmuten, aber es ist durchaus richtig: Wenn ein PV-Anlagenbesitzer (beispielsweise ein Hausbesitzer mit einer Anlage auf dem Dach) seinen Strom hauptsächlich selbst verbraucht, so belastet er das Stromnetz weniger, d.h. teure Netzausbauten entfallen. Wie schon besprochen ist eines der Probleme der Photovoltaik, dass sie bei grösserer Verbreitung die Stromnetze stark belasten würde. Wenn schon auf der Stufe Haus versucht wird, den Strom gar nicht erst ins Netz einzuspeisen (weil die Powerwall aufgeladen wird, oder die Waschmaschine läuft), so kann man auch den Anteil der Photovoltaik im Stromnetz erhöhen.  Das Thema Eigenverbrauch ist darum heute sehr aktuell, und wird in Zukunft sicher nur noch wichtiger! |
| Hochtemperatur-Solarthermie | Nach dieser relativ ausführlichen Betrachtung der Photovoltaik wird noch kurz die Solarthermie betrachtet. Die solarthermische Stromerzeugung ist in direkter Konkurrenz zu der Photovoltaik und hat aber in den letzten Jahren rein preislich den Anschluss verloren. Die Technik ist leicht zu verstehen: Sonnenlicht wird mit Hilfe von Spiegeln konzentriert und ein Fluid wird auf einige 100°C erwärmt. Mit dem heissen Fluid wird Dampf erzeugt und ein Dampfkraftwerk betrieben. Gegenüber der Photovoltaik hat diese Technik zwei grosse Nachteile:   * Es können nur „grosse“ Anlagen gebaut werden – typische Anlagen haben Leistungen von 10-100MW. Bei der Photovoltaik können Anlagen bereits im kW-Bereich gebaut werden. Es ist auch leicht möglich, eine Photovoltaikanlage zunächst für z.B. 1 MW zu planen, und später auszubauen – dies ist bei einem solarthermischen Kraftwerk unmöglich, d.h. die nötige Investitionssumme ist immer gross. * Die Konzentration der Sonnenstrahlung erfordert zwingend dass die Sonne „richtig“ scheint. Sobald der Himmel auch nur leicht bedeckt ist, wird das Licht nicht mehr richtig fokussiert, und damit steht die Anlage still. Photovoltaikanlagen produzieren unter solchen Bedingungen zwar auch viel weniger Strom, aber nicht gerade nichts. Dies bedeutet, dass nur sehr sonnige Standorte für Solarthermie geeignet sind (Wüsten). Bei uns in der Schweiz sind solche Anlagen hingegen undenkbar. |
| Niedertemperatur-Solarthermie | Bei uns viel stärker verbreitet ist die Niedertemperatur-Solarthermie, mittels derer warmes Wasser in thermischen Solarkollektoren gewonnen wird. Solche Anlagen gibt es sowohl für Brauch-Warmwasser wie auch für die Heizungsunterstützung. Bei der Heizungsunterstützung ist aber die starke Verschiebung von Angebot und Nachfrage sehr problematisch, darum lohnen sich solche Anlagen wirtschaftlich meist nicht. Beim warmen Wasser sieht es viel besser aus, weil man ja auch im Sommer warmes Wasser will. |
| Zusammenfassung Solarenergie | * Solarenergie ist die mit Abstand mächtigste erneuerbare Energieressource der Welt. * Trotz des grossen Potenzials liefert die Solarenergie heute lediglich ca. 1% der Welt-Stromversorgung; in einzelnen Ländern sind es knapp 10% (Italien, Deutschland). * Die Nutzung erfolgt heute hauptsächlich mit Photovoltaik, die Solarthermie zur Stromerzeugung ist wirtschaftlich momentan nicht konkurrenzfähig. * Die starke zeitliche Variation des Solarenergieangebots (sowohl täglich wie auch jährlich) ist problematisch, und wird neue Speichertechniken oder besseres Lastmanagement nötig machen, damit mehr als ca. 10% der Landes-Stromerzeugung durch Photovoltaik möglich wird. * Bei Betrachtung des Gesamtsystems wird ersichtlich, dass die optimale Ausrichtung einer Anlage nicht unbedingt diejenige ist, bei der der Stromertrag über das ganze Jahr gesehen maximiert wird. |

|  |  |
| --- | --- |
| Geothermie | |
| Einleitung | In diesem Abschnitt wird die Geothermie betrachtet (Nutzung der Erdwärme). Die Geothermie hat ein viel kleineres Potenzial als die Solarenergie, dafür ist sie immer verfügbar und ist in diesem Sinne das Gegenteil der Solarenergie |
| Bedeutung der Geothermie in der Schweiz | Es gibt eine separate Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, der man entnehmen kann dass 2014 ca. 2300 GWh Erdwärme genutzt wurden (8PJ). Dies entspricht ca. 3% des Wärmebedarfs der Schweiz, der weitaus grösste Teil (5/6) dieser Erdwärme stammt aus Erdwärmesonden für Wärmepumpen.  In der Energiestrategie 2050 wird vorgesehen, dass über Geothermie 4400 GWh Strom pro Jahr erzeugt würden, was 7% des Schweizer Stromverbrauchs wäre. Heute liegt dieser Wert allerdings noch bei Null! |
| Bedeutung der Geothermie weltweit | 2014 sind weltweit sind geothermische Kraftwerke mit einer Leistung von 12.8 GW installiert – verglichen mit der Leistung aller elektrischen Kraftwerke der Welt ist das nicht ganz 1%. Auch die Geothermie ist heute noch wenig bedeutend, genauso wie die Solarenergie! |
| Ursprung und theoretisches Potenzial der Geothermie | Die feste Erdkruste ist lediglich ca. 30km dick, darunter ist die Erde so heiss, dass das Gestein flüssig ist. Der flüssige Kern ist sehr heiss (5000°C), dies ist zum Teil Restwärme aus der Erdentstehung (Gravitationsenergie wurde in Wärme umgewandelt), zum Teil Wärme aus natürlichem radioaktivem Zerfall (Uran, Thorium, Kalium). Die Erdkruste wirkt als Isolator, der den Wärmestrom vom Erdinneren zur Erdoberfläche limitiert.  Der mittlere geothermische Wärmestrom beträgt lediglich 62 mW/m2. Verglichen mit der von uns in der Schweiz benötigten Leistungsdichte (ca. 1 W/m2) ist das nicht viel, und man könnte versucht sein, die Geothermie als unbedeutend abzutun.  An der Erdoberfläche ist der thermische Gradient 30K/km, d.h. pro Kilometer den man in die Erde bohrt, erwärmt sich das Gestein um 30K. Um aus Erdwärme Strom herzustellen, benötigt man Temperaturen von mindestens 150°C, besser sind natürlich höhere Temperaturen (denken Sie an den Carnot-Wirkungsgrad!). Für eine Stromgewinnung aus Erdwärme muss man also ca. 5 km tiefe Bohrungen vornehmen. |
| Räumliche Verteilung der Erdwärme | Die Möglichkeiten zur Erdwärmegewinnung sind je nach Geologie des Untergrunds sehr verschieden. In vulkanisch aktiven Zonen tritt flüssiges Gestein bis an die Oberfläche der Erde, und offenbar sind dort sehr viel höhere Temperaturen sehr viel leichter erschliessbar als an anderen Orten. Es ist darum auch kein Zufall, dass die Geothermie in Ländern wie den Philippinen, Indonesien und Island wichtig ist. In Kontinentaleuropa wird die Geothermie vor allem in Italien genutzt, das ja ebenfalls für Vulkane bekannt ist. Die folgende Abbildung zeigt die Temperatur des Erdreichs in 2km Tiefe für Europa: |
|  | Temperaturverteilung in Europa  Abbildung ‑: Temperatur des Erdreichs in 2km Tiefe |
|  | Man sieht der Karte an, dass es Orte gibt, an denen der Untergrund kühl ist (25° C, in Russland), und andere an denen er schon in 2km Tiefe über 100°C warm ist. Die räumliche Verteilung der Erdwärme ist also sehr ausgeprägt! Dagegen gibt es keine zeitliche Variation, d.h. die Erdwärme ist immer verfügbar, und damit sehr viel zuverlässiger als beispielsweise die Solarenergie. |
| Geothermischer Wärmestrom in der Schweiz | Der geothermische Wärmestrom ist auch in der Schweiz nicht überall gleich gross. Die folgende Karte zeigt die Situation:    Abbildung ‑: geothermischer Wärmestrom in der Schweiz |
|  | Orte mit grossem Potenzial liegen der Karte nach zu urteilen in der Nordschweiz, an der Grenze zu Deutschland. Die meisten Geothermie-Anlagen der Schweiz sind auch in dieser Region konzentriert:    Abbildung ‑: Geothermie-Anlagen in der Schweiz die in Betrieb sind |
| Theoretisches Potenzial Geothermie Schweiz | Der geothermische Wärmestrom von ca.60mW/m2 ist „klein“, dies soll an einem Beispiel gezeigt werden: Ein Einfamilienhaus stehe auf einem Grundstück von 1000 m2 Fläche. Der Besitzer möchte es mit Erdwärme heizen. Er rechnet sich also kurzerhand durch eine Multiplikation aus, dass der Wärmestrom auf seinem gesamten Grundstück ca. 60W beträgt, und sein Heizleistungsbedarf im Winter 10kW, worauf er die Idee der Erdwärmenutzung sofort wieder aufgibt. Aus Interesse rechnet der Besitzer noch weiter und überlegt sich wie gross die Leistung des geothermischen Wärmestroms für die gesamte Schweiz ist, und multipliziert mit 42‘000 km2, und erhält eine Leistung von 2.5 GW, was nun schon besser tönt, allerdings müsste dazu der gesamte geothermische Wärmestrom der ganzen Schweiz „eingefangen“ werden. |
| Technisches Potenzial der Geothermie in der Schweiz | Bei der Nutzung der Geothermie gibt es verschiedene unterschiedliche Technologien dafür: Man kann versuchen die Erdwärme in ganz verschiedenen Tiefen und damit auf ganz verschiedenen Temperaturniveaus zu nutzen. Erst bei höheren Temperaturen (ab ca. 150°C) kann eine Nutzung in einem Kraftwerk zur Stromerzeugung erfolgen, bei tieferen Temperaturen steht immer die Nutzung für die Wärmeerzeugung im Vordergrund – entweder via Wärmepumpe, oder, falls die Temperatur schon genügend hoch ist, gleich direkt. Erdsonden für Wärmepumpen werden typischerweise bis zu 300m tief gebohrt, für eine direkte Heizenergienutzung wären Bohrungen von ca. 1km nötig, für Kraftwerke ca. 5km. |
|  | Aufgrund der relativ tiefen Temperaturen auch bei 5km tiefen Bohrungen ist der elektrische Wirkungsgrad immer noch bescheiden. Für geothermische Kraftwerke liegt er oft um 10%, und meistens wird auch noch Wärme direkt genutzt (zu Heizzwecken in Fernwärmenetzen).  Multiplizieren wir die vorher berechneten 2.5 GW mit einem Wirkungsgrad von 10%, und nehmen wir an, dass 1/10 der Fläche der Schweiz irgendwie geothermisch genutzt werden kann, so finden wir ein technisch realisierbares Potenzial von 25 MW, d.h. eine vernachlässigbare Menge bezogen auf die Schweiz.  Laut einer Schätzung der Axpo aus dem Jahr 2007 hingegen hat die Geothermie langfristig ein Potenzial, in der Schweiz jährlich 17‘000 GWh Strom zu erzeugen, d.h. 30% unseres Strombedarfs (oder die Erzeugung von Gösgen und Leibstadt zusammen). Dies steht im krassen Gegensatz zu der Berechnung via geothermischem Wärmestrom! Es ist aber nicht so, dass die Axpo nicht rechnen kann, sondern man benützt die Erdwärme heute eigentlich eher als eine nicht-erneuerbare Ressource – man müsste eigentlich von „Heat mining“ sprechen. |
| Heat mining | Der Hausbesitzer revidiert seine Berechnung nochmals. Diesmal überlegt er sich folgendes: Er kann auf seinem Grundstück Erdsonden bohren, die bis zu 300 m tief sind. Damit kann er ein Volumen von 300‘000 m3 Erdreich unter seinem Grundstück erreichen. Das Erdreich ist in 300m Tiefe 10°C wärmer als an der Oberfläche, d.h. im Mittel 5°C wärmer als an der Oberfläche. Damit kann man eine innere Energie ausrechnen: E = m·c·T = 300‘000 m3 ·2000 kg/m3 ·1kJ/kgK ·5K = 3·1012 J. Wenn der Hausbesitzer plant, diese Energie über die nächsten 50 Jahre abzubauen, so kann er jährlich 3·1010 J gewinnen, was einer Dauerleistung von 2000 W entspricht, und damit viel näher an seinem effektiven Heizbedarf liegt als die mit dem geothermischen Wärmestrom berechnete Leistung.  Dies ist auch der Grund warum Erdwärmesonden tatsächlich zu Heizzwecken genützt werden – allerdings zeigen diese Berechnungen auch, dass es sich hierbei keineswegs um die Nutzung erneuerbarer Energie handelt, sondern dass vorhandene innere Energie in der Erdoberfläche abgebaut wird. Man versucht darum heute oft auch die Erdwärmesonden im Sommer zu regenerieren, indem man sie entweder zur Kühlung benützt, oder indem man mit thermischen Kollektoren im Sommer viel Wärme gewinnt und mit der Erdsonde zurück ins Erdreich bringt. Auf diese Art und Weise wird die Erdsonde zum saisonalen Energiespeicher!  Das Phänomen des „heat mining“ tritt auch bei geothermischen Kraftwerken auf. Allerdings sind diverse geothermische Kraftwerke schon seit Jahrzehnten im Betrieb, und sie funktionieren immer noch, d.h. wenn „sorgfältig“ mit der geothermischen Energiequelle umgegangen wird, kann sie viele Jahrzehnte oder Jahrhunderte lang Energie liefern. |
| Erdbeben | In der Schweiz sind in den letzten Jahren zwei grosse Geothermie-Vorhaben gescheitert: in Basel sowie in St. Gallen wurden Bohrungen durchgeführt, die Strom und Wärme gewinnen sollten. Bei beiden Projekten traten „kleinere“ Erdbeben auf (ca. 3.5 auf der Richter-Skala), die zu Schäden an Gebäuden und schliesslich zur Beendigung der Projekte führten. |
|  |  |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Zusammenfassung Geothermie | * Die Geothermie ist eine erneuerbare Energieressource, die im Gegensatz zu z.B. Windenergie und Solarenergie kontinuierlich verfügbar ist. * Je tiefer man bohrt, desto wärmer wird es im Untergrund – je nach Temperaturniveau sind ganz unterschiedliche Technologien zur Energiegewinnung sinnvoll bzw. nötig. * Bei der Stromgewinnung erreichen geothermische Kraftwerke aufgrund der vergleichsweise tiefen Temperaturen elektrische Wirkungsgrade von ca. 10% * Aufgrund des tiefen elektrischen Wirkungsgrades wird die Wärme meistens auch direkt mit Fernwärmenetzen genutzt. * Das Potenzial der Geothermie in der Schweiz ist je nach Schätzung stark unterschiedlich – die Energiestrategie des Bundes sieht für 2050 eine Produktion von 4400 GWh vor, was 7% der schweizerischen Stromproduktion entspricht. * In den letzten Jahren sind in der Schweiz diverse Geothermie-Projekte gescheitert, unter anderem weil sie Erdbeben hervorgerufen haben. Unter diesem Aspekt erscheint die verstärkte Geothermie-Nutzung bzw. das Erreichen der Ziele der Energiestrategie 2050 sehr fraglich. |
|  |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Das zukünftige Energiesystem | | |
| Einleitung | Wir haben bei der Betrachtung der Solarenergie und der Geothermie gesehen, dass beide Energiequellen Vor- und Nachteile haben: die Solarenergie hat ein riesiges theoretisches Potenzial, die starke zeitliche Schwankung des Angebots ist allerdings problematisch. Die Geothermie hat ein viel kleineres Potenzial, wäre dafür immer verfügbar, birgt jedoch gewisse Risiken bezüglich Erdbeben.  Bei jeder Form der Energiegewinnung findet man solche Vor- und Nachteile. Man trifft auch immer wieder Leute an, die sich hauptsächlich für die Nachteile der erneuerbaren Energie zu interessieren scheinen: kein Strom in der Nacht bei Photovoltaik, tote Vögel bei Windturbinen, Erdbeben bei Geothermie, zu kleine Restwassermenge bei der Wasserkraft usw. In einem gewissen Sinn haben solche Pessimisten recht: es gibt keine Form der wirklich umweltfreundlichen Energieerzeugung – jede Form der Energieerzeugung erzeugt mehr oder weniger Umweltschäden. In diesem Sinne ist die Energieeffizienz ein besseres Mittel als die Produktion von mehr erneuerbarer Energie. Allerdings gehen die Pessimisten oft zu weit: sie konzentrieren sich immer auf einzelne Technologien, und stellen die Nachteile einer einzelnen Technologie dar. Dabei geht vergessen, dass in einem Energiesystem der Zukunft viele verschiedene Technologien parallel nebeneinander bestehen werden, die gegenseitig ihre Defizite kompensieren können. Dieser Abschnitt zeigt ganz kurz einige Beispiele auf, nicht im Sinne einer umfassenden Darstellung sondern als Gedankenanstoss, und damit Sie ein paar Antworten haben falls Sie einmal mit einem Pessimisten diskutieren. | |
| Die Sonne scheint im Winter nicht | Das Hauptargument der Pessimisten gegen die Solarenergie ist die Tatsache, dass wir im Winter viel weniger Sonne haben als im Sommer. Während wir in der Schweiz zwar dank der Speicherseen Saisonspeicher haben, sind wir damit in einer luxuriösen Lage, die meisten Länder haben diese Möglichkeit nicht. Wie gehen also die Deutschen mit diesem Problem um? Die Antwort ist einfach: gar nicht! Es ist nämlich nur ein Scheinproblem, das auf eine elegante Art gelöst wird: Die Windenergie verhält sich zeitlich genau umgekehrt wie die Solarenergie: es hat im Winter deutlich mehr Wind. Die folgende Grafik zeigt die monatliche Stromerzeugung in Deutschland 2015:    Abbildung ‑: monatliche Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie in Deutschland 2015  Selbstverständlich gibt es hier durchaus Schwankungen zwischen den Monaten – im Oktober haben Wind und Sonne nur halb so viel Strom erzeugt wie im Dezember. Der Unterschied für das Gesamtsystem Wind+Sonne ist aber „nur“ noch ein Faktor zwei verglichen mit einem Faktor 8 für Sonne alleine, oder Faktor 3 für Wind alleine. Diese beiden Energieformen ergänzen sich also zeitlich, und dies ist kein Zufall: schönes Wetter (Sonne) bedeutet meist ein stabiles Hochdruckgebiet, d.h. kein Wind – und umgekehrt.  Man lernt daraus, dass es sinnvoll ist, das Gesamtsystem zu betrachten und beispielsweise den Ausbau von Solar- und Windenergie aufeinander abzustimmen. In der Grafik sind zuunterst in Blau auch noch die Offshore-Windanlagen zu sehen, die 2015 stark ausgebaut wurden (die Schwankung in der Produktion ist nicht nur wetterbedingt, sondern auch durch den starken Zubau zustande gekommen). Auf dem Meer bläst der Wind viel konstanter als an Land, die Offshore-Anlagen sollten also weniger grosse Schwankungen aufweisen. | |
| Wind und Sonne sind trotzdem zufällig | Der Pessimist wird nun sagen, dass eine Schwankung um einen Faktor 2 trotzdem nicht hingenommen werden kann – und er hat damit sicher auch ein bisschen Recht. Allerdings sind auch Wind+Sonne zusammen noch kein Gesamtsystem. Betrachten wir nochmals Deutschland, diesmal aber das Gesamtsystem der Stromerzeugung:    Abbildung ‑: Installierte Kraftwerksleistung in Deutschland nach Jahr  Beachten Sie, dass hier nur die installierte Leistung gezeigt ist, nicht die tatsächliche Stromerzeugung. Wind und Sonne werden stark überhöht dargestellt, da diese Kraftwerke nur eine kleine Auslastung haben. Trotzdem zeigt die Grafik, dass die Stromversorgung auf vielen Schultern ruht, und dass auch der Anteil der Biomasse stark angestiegen ist. Biomasse ist genauso wie fossile Brennstoffe speicherbar und kann eingesetzt werden, wenn Wind und Sonne einmal ausbleiben. Die Geothermie ist ebenfalls „grundlastfähig“ und könnte zur sicheren Energieversorgung beitragen wenn das Wetter einmal verrückt spielt. | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
|  |  | |
| Ziele | | |
| **Kapitel 5.1 Einteilung der Energieressourcen** | | |
| Energieressourcen, Unterscheidungsmerkmale | | Sie kennen die Definitionen und die Bedeutungen von   * dem Begriff Energieressourcen * mindestens 5 Unterscheidungsmerkmale für Energieressourcen * Erschöpfbarkeit als Hauptmerkmal |
| Einteilung nach Erschöpfbarkeit | | Sie kennen   * alle vier Energiequellen * die beiden nicht erneuerbaren Energieformen nukleare Energie und fossile Brennstoffe und können sie in wenigen Stichworten beschreiben * die drei erneuerbaren Energieformen Sonnenenergie aus laufender Strahlung, Erdwärme und Gravitationsenergie und können sie in wenigen Stichworten beschreiben * die Energiequellen und deren Erscheinungsformen und können sie nach **Error! Reference source not found.** darstellen |
| Kriterien zur Einteilung nicht erneuerbarer Energieressourcen | | Sie kennen:   * die Definition, wie Erschöpfbarkeit gemessen wird * die Definition von Ressourcen und Reserven (je 3 Kriterien) * drei Einflüsse auf die Grösse der Reserven * die Definition der Reichweite einer Reserve / Ressource * die zurzeit geschätzten typischen statischen Reichweiten der Reserven von Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran. * Gründe dafür, dass sich die Angaben zur statischen Reichweite der Reserven von Erdöl und Erdgas in den letzten 15 Jahren nicht wesentlich verringert haben. * den Einfluss des Standes der Technologie zur Ausbeutung von Vorkommen und damit auch auf die Reichweite (qualitativ). * den Einfluss von höheren Preisen auf die Reichweite (qualitativ). |
| Kriterien zur Einteilung erneuerbarer Energieressourcen | | Sie kennen:   * ~~drei Umformungen von Strahlungsenergie in Endenergie (Abbildung 5‑10)~~ * ~~zwei Umformungen von Biomasse in Endenergie (Abbildung 5‑10)~~ * ~~drei Umformungen von Auswirkungen des Wetters in Endenergie  (Abbildung 5‑10)~~ |
|  | | * die Einteilung der erneuerbaren Energie nach Potenzialen. Welche Potenziale werden unterschieden? (Abbildung 5‑11) * die Definition des theoretischen Potenzials und können ein Beispiel geben. * die Definition des technischen Potenzials und können ein Beispiel geben. * die Definition des wirtschaftlichen Potenzials * die Definition des erschliessbaren Potenzials und können zwei Gründe angeben, weshalb das erschliessbare Potenzial geringer ist als das wirtschaftliche Potenzial. |
|  | | Sie kennen   * die Definition der Leistungsdichte und können sie auf Beispiele anwenden * vier typische Leistungsdichten von erneuerbaren Energien * ~~die Definition des Erntefaktors~~ *~~EF~~*~~NE~~ ~~der erneuerbaren Energie und wissen, wie die darin verwendeten Grössen~~ *~~KEP~~* ~~und~~ *~~KEA~~*~~NE~~ ~~definiert sind.~~ * ~~die Darstellung von~~ *~~KEP~~* ~~und~~ *~~KEA~~*~~NE einer Anlage als Diagramm über der Zeit aufgetragen, und können die Energierückzahldauer bestimmen.~~ |
| **5.2 Charakterisierung der nicht erneuerbaren Energieressourcen** | | |
| Kohle | | Sie kennen   * den Entstehungsprozess von Kohle und können ihn kurz, mit eigenen Worten beschreiben * die ungefähre Zusammensetzung von Braunkohle und Anthrazit (ungefähre Massenanteile c und h) * den Hauptverwendungszweck von Kohle * den ungefähren Anteil der Elektrizitätsproduktion mit Kohle * den ungefähren weltweiten Anteil des Primärenergieverbrauchs den Kohle deckt * die drei Länder mit dem grössten Kohleverbrauch * die ungefähre statische Reichweite von Kohle |
| Erdöl | | Sie kennen   * den Entstehungsprozess von Erdöl und können ihn kurz, mit eigenen Worten beschreiben * die ungefähre Zusammensetzung von Erdöl  (ungefähre Massenanteile c und h) * die Einteilung in konventionelle und nicht konventionelle Lagerstätten und können diese mit einigen Stichworten beschreiben * die Verarbeitung von Erdöl und können diese mit einigen Stichworten beschreiben * den Hauptverwendungszweck von Erdöl  (ungefährer Anteil des Verbrauchs in %) * den ungefähren weltweiten Anteil des Primärenergieverbrauchs den Erdöl deckt * die ungefähre statische Reichweite von Erdöl * die Region mit den grössten Reserven |
| Erdgas | | Sie kennen   * den Entstehungsprozess von Erdgas und können ihn kurz, mit eigenen Worten beschreiben * den ungefähren Anteil des Hauptbestandteils Methan am Erdgas * die Einteilung in konventionelle und nicht konventionelle Lagerstätten und können diese mit einigen Stichworten beschreiben * die Förderung von konventionellem und nicht konventionellem Erdgas und können diese mit einigen Stichworten beschreiben * den Hauptverwendungszweck von Erdgas  (ungefährer Anteil des Verbrauchs in %) * den ungefähren weltweiten Anteil des Primärenergieverbrauchs den Erdgas deckt * die ungefähre statische Reichweite von Erdgas * die Region mit den grössten Reserven |
| Kernenergie | | Sie kennen   * den ungefähren Verlauf der Kernbindungsenergie pro Nukleon in Funktion der Anzahl Kernteilchen und können zeigen, wie mit Fusion oder Fission Kernbindungsenergie gewonnen wird (**Error! Reference source not found.**) * den Vorgang der Kernspaltung und können ihm mit eigenen Worten beschreiben, ebenso den Begriff "Kettenreaktion" * die Bezeichnung des spaltbaren Uranisotops (235U) und seinen ungefähren Prozentualen Anteil am Natururan * die Gewinnung und Verarbeitung von Uran und können sie mit wenigen Stichworten beschreiben. * die beiden meist verbreiteten Reaktortypen und können mit einer einfachen Skizze deren Hauptkomponenten aufzeichnen und die Hauptunterschiede erklären. * die typische Temperatur des Dampfes, der mit den Reaktoren erzeugt wird * das Ziel für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle * den ungefähren weltweiten Anteil des Primärenergieverbrauchs den Kernenergie deckt * den ungefähren Anteil der Elektrizitätsproduktion mit Kernenergie * die ungefähre statische Reichweite für konventionelles Uran |
|  | |  |
|  | |  |