

Erneuerbare Energien - eine physikalische Betrachtung

Anette Regelous*, Jan-Peter Meyn*

*Physikalisches Institut - Didaktik der Physik, FAU Erlangen-Nürnberg, Staudtstrasse 7, 91058 Erlangen,
Anette.Regelous@physik.uni-erlangen.de, Jan-Peter.Meyn@physik.uni-erlangen.de

Kurzfassung

Der Begriff "Erneuerbare Energien" wird in der Literatur sehr unterschiedlich definiert und mitunter werden nicht alle relevanten physikalischen Parameter berücksichtigt. Wir schlagen eine Definition vor, die auf physikalischen Fließgleichgewichten basiert. In den Energiereservoirs Kohle/Öl/Gas und Kernenergie ist die nutzbare Energie "gespeichert". Die Lebenszeiten dieser Energievorräte sind vom Verbrauch abhängig und können beschrieben werden mit: $\Delta_t \text{Lebensdauer} = \text{Abstrom} - \text{Zustrom}$. Bei Kohle/Öl/Gas und Uran ist die Produktionsrate im Vergleich zu momentaner Verbrauchsrate sehr gering, bzw. nicht vorhanden. Hier herrscht kein Fließgleichgewicht und diese Energiequellen sind nicht-erneuerbar. Die erneuerbaren Energiequellen Solarenergie (demnach auch Wind- und Wasserenergie), Geothermie und Gezeiten haben Lebenszeiten von $\Delta_t \text{Lebensdauer} = \text{Energieinhalt} / \text{Abstrom}$ aus dem Reservoir, die unabhängig von Verbrauchsraten sind, da in diesen Fällen transiente Wärme oder die Strahlungsquelle „angezapft“ werden. Die Menge an verfügbarer Energie ist limitiert, wird aber konstant oder periodisch nachgefüllt. Hier ist nicht die Lebensdauer, sondern die Flussdichte ($\text{Joule}/\text{m}^2\text{s}$) entscheidend. Biomasse ist ein Spezialfall der erneuerbaren Energien. Ihre Lebensdauer hängt von der Differenz zwischen Verbrauch und Aufforstung ab und ist vom Menschen kontrollierbar. Bei der Geothermie muss zwischen globalen und lokalen Fall unterschieden werden, da im lokalen Fall bei nicht nachhaltig geführter Geothermie-Anlage kein Fließgleichgewicht herrscht und es keine erneuerbare Energiequelle darstellt.

1. Einleitung

Der Begriff der "Erneuerbaren Energien" wird in der Literatur sehr unterschiedlich und zum Teil widersprüchlich definiert [1-7]. Beispielsweise schreibt das Landesamt für Umwelt auf dessen Homepage [1]: „Erneuerbare Energien sind Energieträger/-quellen, die sich ständig erneuern... Hierzu zählen: Sonnenenergie, Biomasse, Wasserkraft, Windenergie, Erdwärme und Gezeitenenergie.“ Dahingegen schreibt das Geothermiezentrum in Bochum auf ihrer Homepage [2]: „Geothermie ist keine regenerative Energiequelle, da sie sich nicht erneuert.“ Auch in der internationalen Fachliteratur wird der Begriff der "Erneuerbaren Energien" unterschiedlich definiert, z.B. Twidell and Weir (1986): "Renewable energy can be defined as 'energy obtained from the continuous or repetitive currents of energy recurring in the natural environment [3]". Hier steht der Gedanke der Zeitkonstante der Auffüllung im Vordergrund. Andererseits definiert z.B. Sorenson (2000) "Erneuerbare Energie" mit: "Renewable energy can be defined as 'energy flows which are replenished at the same rate as they are used [4]". Diese Definition basiert vor allem auf dem Gedanken, dass die Größe des Reservoirs konstant gehalten werden sollte.

Erneuerbare Energien sind inzwischen fester Bestandteil des Unterrichts und es ist daher

unumgänglich eine einheitliche Definition aufzustellen, die auf den wesentlichen physikalischen Parametern beruht.

2. Physikalisches Fließgleichgewicht

Alle wichtigen Parameter werden erfasst, wenn die Definition der "Erneuerbaren Energien" auf physikalischen Fließgleichgewichten aufgebaut wird, denn hier sind die Energieströme und die Lebensdauer von Bedeutung (siehe auch Borer et al. [8]). Die drei wesentlichen Parameter sind dabei der Zustrom in das Energiereservoir, die Menge an Energie im Reservoir und der Abstrom aus dem Reservoir. Wenn sich alle drei Parameter im Gleichgewicht befinden, dann existiert ein Fließgleichgewicht und es handelt sich um eine erneuerbare Energiequelle (Abb. 1).

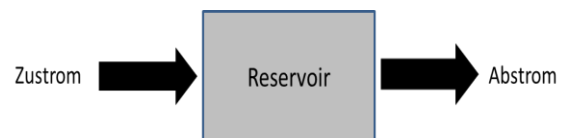


Abb. 1: Bei einer erneuerbaren Energiequelle befinden sich die drei Parameter im Fließgleichgewicht.

Die Berechnung der Lebensdauer basiert auf diesen Parametern: $\Delta_t \text{Lebensdauer} = \text{Energieinhalt im Reservoir [J]} / (\text{Abstrom} - \text{Zustrom}) [\text{J/s}]$.

Unter dem Aspekt des physikalischen Fließgleichgewichtes wird im Folgenden jede einzelne Energiequelle untersucht.

3. Kohle/Öl/Gas

Kohle/Öl/Gas sind vom Prinzip her drei identische Systeme und daher diskutieren wir repräsentativ nur ein System, die Kohleenergie (Abb. 2).



Abb.2: Bei der Kohle ist der Zustrom sehr gering verglichen mit der momentanen Verbrauchsrate. Daher besteht kein Fließgleichgewicht.

Der Zustrom in das Kohlereservoir ist sehr gering, da es momentan nur wenige Regionen gibt, in denen Kohle gebildet wird. Hinzu kommt die lange Bildungsdauer von mehr als einer Millionen Jahre. Im Gegensatz dazu steht die momentan hohe Verbrauchsrate durch das Verbrennen von Kohle. Die Lebensdauer von Kohle hängt vom menschlichen Verbrauch ab. Da momentan wesentlich mehr Kohle verbraucht als nachgebildet wird, herrscht kein Fließgleichgewicht und damit ist Kohle keine "Erneuerbare Energiequelle". Die Lebensdauer kann sehr einfach über die in Abschnitt 2 beschriebene Formel berechnet werden und beträgt etwa 110 Jahre bei der momentanen Verbrauchsrate [9].

4. Kernenergie

Im Fall der Kernenergie gibt es keinen Zustrom in das Reservoir, da Uran nicht auf der Erde gebildet wird, sondern lediglich während einer Supernova Explosion. Der Abstrom erfolgt durch Kernspaltung in Kernkraftwerken (Abb. 3). Die natürliche Halbwertszeit von ^{235}U beträgt 703 Millionen Jahre und hat daher bei den momentanen Verbrauchsraten einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Lebensdauer von Uran.



Abb.3: Uran wird nicht auf der Erde gebildet, daher gibt es keinen Zustrom. Der Abstrom erfolgt durch Kernspaltung im Kernkraftwerk. Daher besteht kein Fließgleichgewicht.

Damit ist die Lebensdauer der Kernenergie von unserem Verbrauch abhängig. Es herrscht kein Fließgleichgewicht und damit ist die Kernenergie keine erneuerbare Energiequelle. Die Lebensdauer

kann mit der Formel aus Abschnitt 2 berechnet werden und beträgt bei momentaner Verbrauchsrate noch ca. 67 Jahre [10].

5. Sonnenenergie

Die Situation bei der Sonnenenergie stellt sich anders dar als bei Kohle und Kernenergie. Wir können die Sonnenenergie einerseits direkt durch Photovoltaik nutzen, oder auch indirekt durch von der Sonnenenergie angetriebene atmosphärische Prozesse, durch Wind- und Wasserenergie. Der Zustrom erfolgt kontinuierlich von der Sonne (Reservoir 1) auf die Erde (Reservoir 2) und die gleiche Menge an Energie wird als Abstrom von der Erde wieder abgegeben (Abb. 4).



Abb.4: Bei der Sonnenenergie herrscht ein Fließgleichgewicht zwischen Zustrom und Abstrom. Durch z.B. Wind- und Solarenergie zapfen wir diese Energiequelle nur an. Hier ist die Flussdichte entscheidend.

Hier wird die Energie z.B. durch Windräder lediglich umgewandelt. Die Sonnenenergie und ihre Lebensdauer sind nicht von unserem Verbrauch abhängig. Wir können die Energie, die auf die Erde trifft, nur „anzapfen“. Hier ist die Flussdichte der entscheidende Parameter.

Es herrscht ein Fließgleichgewicht zwischen Zu- und Abstrom auf der Erde und daher ist die Sonnenenergie eine erneuerbare Energiequelle. Die Lebensdauer der Sonne beträgt nach astronomischen Berechnungen etwa noch 4.5 Milliarden Jahre [11].

6. Gezeitenenergie

Das System der Gezeitenenergie gleicht dem der Sonnenenergie. Der Zustrom erfolgt in diesem Fall durch Gravitation zwischen Erde, Mond und Sonne und die Rotation der Erde. Das Reservoir ist die Gezeitenenergie. Der Abstrom erfolgt durch Reibung bzw. Dissipation (Abb. 5).



Abb. 5: Bei der Gezeitenenergie herrscht ein Fließgleichgewicht zwischen Zustrom und Abstrom. Die Gezeitenkraftwerke haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Reibungsverlust und durch sie „zapfen“ wir die Energie nur an. Hier ist die Flussdichte entscheidend.

Der Einfluss der Gezeitenkraftwerke auf den Reibungsverlust ist bisher wenig untersucht. Es ist aber anzunehmen, dass der Einfluss sehr gering ist, die Lebensdauer der Gezeiten nur geringfügig beeinflusst. Die Gezeitenenergie ist also von unserem Verbrauch unabhängig. Wir „zapfen“ die Energiequelle nur an. Es herrscht ein Fließgleichgewicht und es handelt sich demnach um eine Erneuerbare Energiequelle. Wie bei der Sonnenenergie ist auch hier die Flussdichte der entscheidende Parameter. Die Lebensdauer beträgt ungefähr 3 Milliarden Jahre [12].

7. Biomasse

Die Grundlage der Biomasse ist die Sonnenenergie. Etwa 0.1 Prozent des eingestrahlenen Sonnenlichts werden mittels Photosynthese in Biomasse umgewandelt [13]. Der Zustrom in das Biomasse-Reservoir erfolgt durch Wachstum der Biomasse. Hierbei kann der Zustrom durch natürliches Wachstum oder durch Aufforstung erfolgen. Der Abstrom erfolgt entweder durch das natürliche Absterben oder durch Abholzung (Abb. 6). Aufforstung und Abholzung werden vom Menschen kontrolliert. Damit ist die Biomasse die einzige Energiequelle bei der der Mensch Zu- und Abstrom beeinflussen und damit die Lebensdauer kontrollieren kann. Die Lebensdauer wird hier bestimmt von der Differenz aus Aufforstung und Verbrauch. Da es im Fall der Biomasse je zwei Zu- und Abströme gibt, sind hier auch mehrere Gleichgewichte möglich. Dadurch ist das System der Biomasse komplizierter als die der anderen Energiequellen und nur mit Hilfe von Differentialgleichungen zu lösen. Aus diesem Grund wird für die Berechnung der Lebensdauer die Modellierungssoftware Stella verwendet [14] (Abb. 6, 7).

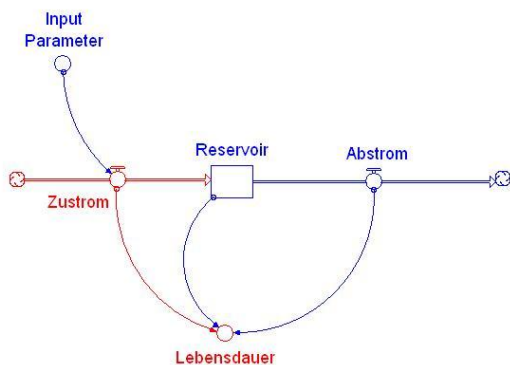


Abb. 6: In Rot Parameter die der Mensch beeinflussen kann, in Blau Parameter die vom Mensch unbeeinflussbar sind. Zustrom und Abstrom sind mit Pfeilen mit verstellbaren Schrauben dargestellt, Input-Parameter als Kreise, und die dünnen Pfeile zeigen die Richtung der Beeinflussung. Hier z.B. wird gezeigt, dass die Lebensdauer aus Reservoir, Zu- und Abstrom berechnet wird.

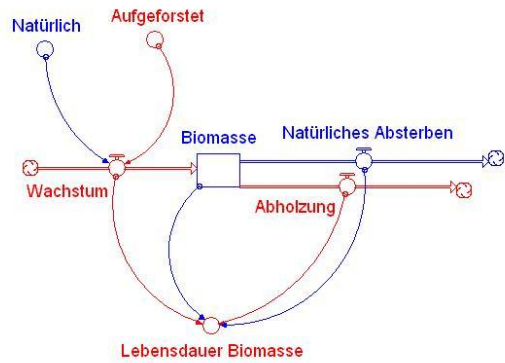


Abb. 7: Bei der Biomasse kann Zu- und Abstrom vom Menschen beeinflusst werden. Hier sind mehrere Gleichgewichte möglich. Es kann ein Fließgleichgewicht herrschen.

8. Globale Geothermie

Bei der Geothermie ist es essentiell zwischen dem globalen Fall und dem lokalen Fall zu unterscheiden. Im globalen Fall ist das Energiereservoir das Erdinnere und die darin enthaltene Wärme. Der Zustrom erfolgt über die Wärmeproduktion, z.B. den radioaktiven Zerfall. Der Abstrom erfolgt über den Wärmefluss zur Erdoberfläche. Die Lebensdauer der Geothermie ist hier vom Verbrauch unabhängig. Es wird etwa noch 6.4 Milliarden Jahre dauern bis die Erde abgekühlt ist [15]. Es herrscht ein Fließgleichgewicht und daher handelt es sich um eine erneuerbare Energiequelle. Auch hier wird die Energiequelle nur „angezapft“ und die Flussdichte ist der entscheidende Parameter. Der Wärmefluss zur Oberfläche bestimmt die Menge an verfügbarer Energie. Dabei spielen die lokalen Wärmeflussraten noch eine wichtige Rolle. Die Menge an verfügbarer geothermischer Energie hängt damit von der Anzahl der geothermischen Anlagen und den lokalen Wärmeflussraten ab.

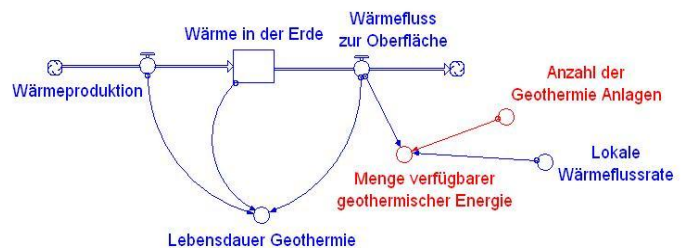


Abb. 8: Bei der globalen Geothermie herrscht ein Fließgleichgewicht. Die Menge an verfügbarer Energie ist dann von der Anzahl der Geothermie Anlagen und den lokalen Wärmeflussraten abhängig.

9. Lokale Geothermie

Wie bei der globalen Geothermie stellt bei der lokalen Geothermie die Wärmemenge der Erde das Energiereservoir dar. Der Zustrom erfolgt auch hier durch die Wärmeproduktion in der Erde. Allerdings wird hier der Wärmefluss an die Oberfläche nur an einer bestimmten Stelle betrachtet (Abb. 9).

Dabei hängt nun die Lebensdauer des Wärmeflusses von der Wärmeentnahmerate der Geothermie-Anlage an dieser Stelle ab. Wenn die Anlage nachhaltig geführt wird und der Wärmewiderstand nicht oder kaum verringert wird, so ist die Lebensdauer so lange wie der Wärmefluss aus der Erde erhalten bleibt [15] und es herrscht ein

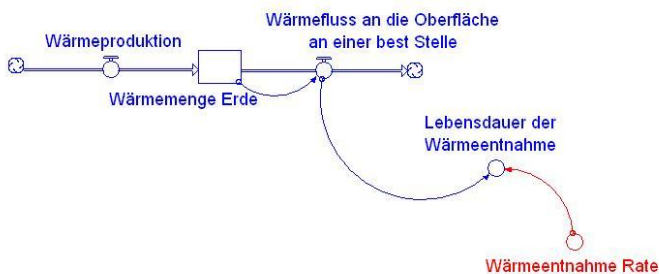


Abb. 9: Bei der lokalen Geothermie ist die Lebensdauer der Wärmeentnahme abhängig von der Wärmeentnahmerate. Wenn die Geothermie-Anlage nachhaltig geführt wird, handelt es sich um eine erneuerbare Energiequelle, ansonsten um eine nicht erneuerbare Energiequelle.

Fließgleichgewicht, d.h. es handelt sich um eine erneuerbare Energiequelle. Wird die Anlage nicht nachhaltig geführt und der Wärmewiderstand stark verringert, dann wird die Wärmeentnahmerate nach einigen Jahren geringer, es herrscht kein Fließgleichgewicht und in dem Fall handelt es sich um keine erneuerbare Energiequelle. Im Fall der Geothermie ist es somit wichtig, den globalen Fall vom lokalen Fall zu unterscheiden und im lokalen Fall auf Nachhaltigkeit zu achten.

10. Zusammenfassung

Die nicht-erneuerbaren Energiequellen sind vom Verbrauch abhängig (Kohle/Öl/Gas und Kernenergie), nicht im Fließgleichgewicht und werden kaum oder nicht nachgebildet. Daher sind die Lebenszeiten bei der momentanen Verbrauchsrate gering.

Im Gegensatz dazu sind die erneuerbaren Energiequellen vom Verbrauch unabhängig, wir „zapfen“ die Energiequelle nur „an“ (Solarenergie, Gezeiten, Geothermie). Hier ist die Flussdichte der

entscheidende Parameter. Ihre Lebenszeiten liegen im Bereich von Milliarden von Jahren.

Die Biomasse ist ein Sonderfall der erneuerbaren Energien, da hier die Lebensdauer von der Differenz zwischen Aufforstung und Verbrauch abhängt. Damit handelt es sich um die einzige von uns kontrollierbare Energiequelle.

Bei der Geothermie ist es essentiell zwischen dem globalen und dem lokalen Fall zu unterscheiden. Im globalen Fall und im nachhaltig geführten lokalen Fall handelt es sich um eine erneuerbare Energiequelle. Im lokalen, nicht nachhaltig geführten Fall ist es eine nicht-erneuerbare Energiequelle.

Zusammenfassend plädieren wir aus den dargelegten Gründen dafür, die Definition der erneuerbaren Energien auf Fließgleichgewichten aufzubauen.

11. Literatur

- [1] Homepage des Umweltbundesamtes: <http://umweltbundesamt.de>, (Stand: 3/2011)
- [2] Homepage des Geothermiezentrums Bochum: <http://geothermie-zentrum.de/geothermie.html> (Stand: 3/2011)
- [3] Twidell, J. and Weir, T. In: (1st ed.), Renewable Energy Resources, E.&F.N. Spon, London (1986), pp. 228–242.
- [4] Sorensen, B. (2000) Renewable Energy (Sec. Ed.) Academic Press, p. 3.
- [5] Rybach, L., Megel, T., Eugster, W.J. (2000) At what time scale are geothermal resources renewable? Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu, Japan, 867-872.
- [6] Rittmann, B. E. (2008). Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. Biotechnol. Bioengr. 100: 203-212
- [7] Turner, J.A. (1999) A realizable renewable energy future. Science 285, 5428, pp 687-689.
- [8] Borer, T., Frommenwiler, P., Fuchs, H.U., Knoll, H., Kopacsy, G., Maurer, W., Schütz, E., Studer, K. (2005) Physik. Ein systemdynamischer Zugang für die Sekundarstufe II. h.e.p. Verlag, Bern.
- [9] Bessereau, G. und Saniere, A. (2010) World coal resources. Innovation Energy Environment, France.
- [10] Lübbert, D., Lange, F. (2006) Uran als Kernbrennstoff: Vorräte und Reichweite, Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, Info-Brief WF VIII G – 069/06.
- [11] Sackmann, I.-J. et al. (1993) "Our Sun. III. Present and Future", Astrophysical Journal 418: 457–468.
- [12] Lowrie, W. (2002) Fundamentals of Geophysics, Cambridge University press, p.42.
- [13] Schuberth, Reinhard (2008): Technologie: Energie, Werkstoffe, Verlag Handwerk und Technik, Hamburg, S.130.

[14] Barry Richmond (2010) Stella Software, An introduction to systems thinking. Isee Systems.

[15] Clauser, C. (2006) Geothermal Energy, In: K. Heinloth (Ed), Landolt-Börnstein, Group VIII: “Advanced Materials and Technologies”, Vol.