

Autor: Max Blatter (c/o Energie-Atlas GmbH). Veröffentlichungsrechte beim Autor und beim Nuklearforum Schweiz.
Digitale Registrierung (DOI): 10.2434/2008-1.

Der Artikel wurde als Referat für den Vertiefungskurs "Kernbrennstoffe – Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit" des Nuklearforums Schweiz vom 20./21. November 2008 verfasst.

Tagungsband erhältlich bei Nuklearforum Schweiz, Postfach 1021, CH-3000 Bern 14

Globale Energieressourcen im Überblick

Eine Systematik der in der Natur vorkommenden Energierohstoffe und Energieflüsse

Max Blatter

1. Begriffe

1.1 Energierohstoffe und erneuerbare Energieflüsse

Zur Erfassung der Energieressourcen muss man zwei verschiedene Klassen unterscheiden. Zum einen geht es um Vorkommen materieller Rohstoffe, die einen nutzbaren Energieinhalt aufweisen, insbesondere in Form freisetzbarer chemischer oder nuklearer Bindungsenergie. Zum andern handelt es sich um natürliche, so genannt «erneuerbare» Energieflüsse, in die sich der Mensch gleichsam einklinken kann – beispielsweise die in der Schweiz traditionell sehr bedeutende Wasserkraft. Der grundlegende Unterschied wird in Abb. 1 zusammenfassend illustriert.

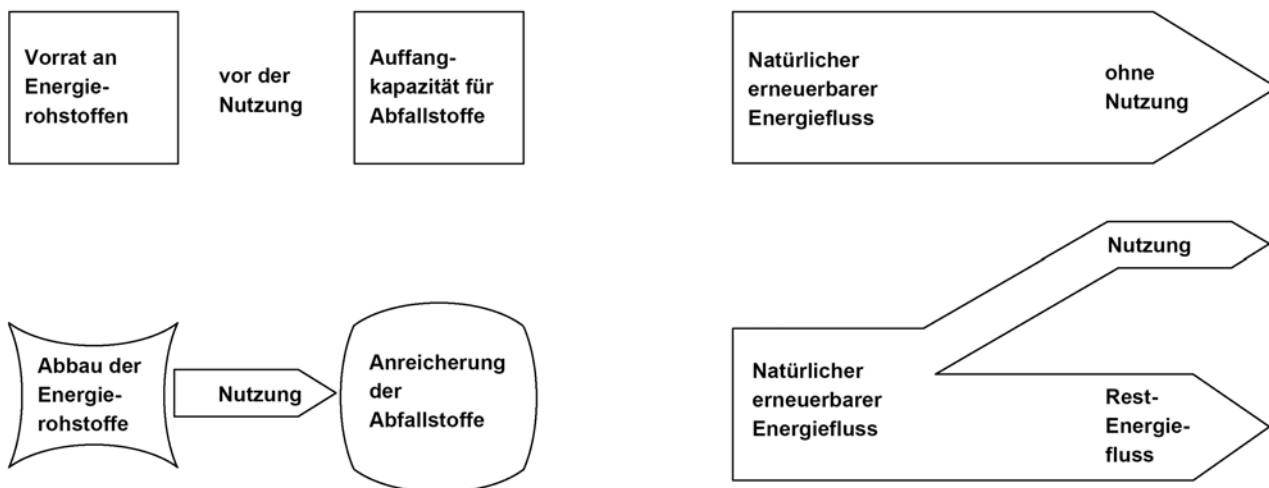


Abb. 1: Abbau von Energierohstoffen (links) und Nutzung natürlicher erneuerbarer Energieflüsse (rechts) (nach [1])

Bei den Energierohstoffen steht ein endlicher Vorrat zur Verfügung, desgleichen eine endliche Auffangkapazität für die Abfallstoffe, die bei der Nutzung entstehen. Durch die Nutzung werden die Vorräte abgebaut, was grundsätzlich irreversibel ist, ebenso erfolgt eine Anreicherung der Abfallstoffe. Mit abnehmenden Vorräten wird deren Erschließung aufwändiger, desgleichen die Vermeidung ökologischer Schäden mit zunehmender Kumulierung der Abfallstoffe.

Bei den erneuerbaren Energien besteht als Ausgangssituation ein natürlicher Energiefluss. Für die Nutzung wird ein Teil davon abgezweigt, ein um diesen Betrag verminderter Rest-Energiefluss verbleibt in der Natur. Um die ökologische Verträglichkeit zu gewährleisten, muss dieser einen gewissen Mindestwert beibehalten. Eine einmal initiierte und als umweltverträglich erkannte Nutzung kann jedoch unbegrenzt und nachhaltig weitergeführt werden.

1.2 Energierohstoffe: geschätzte Vorkommen und nachgewiesene Reserven

Bei der Nutzung von Energierohstoffen ist von Interesse, wie lange diese ausreichen. Man kann zunächst grob schätzen, wie viel fossile respektive nukleare Energierohstoffe in der ganzen Erdkruste enthalten sind. In beiden Fällen kommt man darauf, dass die Gesamtvorkommen dem hochgerechneten Verbrauch in der Größenordnung eines Jahrtausends entsprechen. Das bedeutet aber keinesfalls, dass die Versorgung über diese Zeitspanne gesichert wäre: Weder sind die Vorkommen im einzelnen geologisch nachgewiesen, noch ist klar, in welchem Umfang und zu welchen Kosten sie abbaubar wären.

In einem UN-Arbeitspapier werden für die Klassifizierung von Rohstoffvorkommen (insbesondere auch Energierohstoffe) folgende drei Kriterien empfohlen (UNFC-Methodik, [4]):

- «*geological axis*»: Geologischer Existenznachweis eines bestimmten Vorkommens
- «*feasibility axis*»: Technische Machbarkeit des Abbaus
- «*economic axis*»: Wirtschaftlichkeit des Abbaus

Vorkommen, die nach allen drei Kriterien als abbaubar nachgewiesen sind, werden in den einschlägigen Statistiken üblicherweise als «Reserven» bezeichnet. Setzt man diese in Bezug zur aktuellen jährlichen Fördermenge, so entsteht eine Verhältniszahl in Jahren, die «Reserve-Produktionsverhältnis» oder englisch «R/P-Ratio» genannt wird. So beträgt beispielsweise das R/P-Verhältnis der weltweiten Rohölvorkommen derzeit etwas über 40 Jahre [2], [3]. Die Zahl wird von Laien oft dahingehend fehlinterpretiert, dass das Erdöl «in 40 Jahren ausgehe». Dies stimmt unter anderem deshalb nicht, weil laufend neue Vorkommen nachgewiesen und erschlossen werden, was das R/P-Verhältnis zu einer dynamischen Grösse macht.

1.3 Erneuerbare Energien: geophysikalische Nutzungsgrenze

Bei den erneuerbaren Energieressourcen findet kein irreversibler Ressourcenabbau statt. Die zu Grunde liegenden natürlichen Energieflüsse können über eine Zeitspanne in der Größenordnung einer Jahrmilliarde (!) als dauerhaft angesehen werden. Im Fall der Solarstrahlung übersteigt ihre Leistung zudem bei Weitem das Tausendfache des Welt-Energieverbrauchs. Indessen ist auch dabei keineswegs der gesamte natürliche Energiefluss nutzbar. In Analogie zur Klassifizierung der Energierohstoffe nach der UNFC-Methodik (Kap. 1.2) sind für die Nutzbarkeit drei Faktoren zu berücksichtigen:

- *Geophysikalische* Gegebenheiten
- *Technische* Nutzbarkeit
- *Ökonomische* Nutzbarkeit

Zur Nutzbarkeit aufgrund geophysikalischer Kriterien wird in [5] der Begriff der «geophysikalischen Nutzungsgrenze» vorgeschlagen. Sie geht vom gesamten natürlichen Energiefluss aus und verkleinert diesen auf denjenigen Anteil, der einerseits der Nutzung durch den Menschen zugänglich ist (z.B. infolge der geografischen Situation) und andererseits einen ökologisch verträglichen Rest-Energiefluss gewährleistet. Die geophysikalische Nutzungsgrenze kann grundsätzlich für die verschiedenen erneuerbaren Energieressourcen abgeschätzt werden, doch sind derzeit noch grosse Wissenslücken vorhanden.

Die technische und ökonomische Nutzbarkeit ist im Zusammenhang mit konkreten Projekten abzuklären; allgemeine Potenzialabschätzungen dürften in Anbetracht der derzeitigen dynamischen Entwicklung wenig aussagekräftig sein.

2. Energierohstoffe

2.1 Fossile Energieträger

Bei den fossilen Energieträgern handelt es sich um *kohle- oder kohlenwasserstoffhaltige Stoffe*, die als Rückstände abgestorbener Biomasse in gewissen Gesteinsschichten abgelagert wurden. Nach gängiger Lehrmeinung geschah dies vorwiegend im erdgeschichtlichen Karbon-Zeitalter (das auch davon seinen Namen erhalten hat).

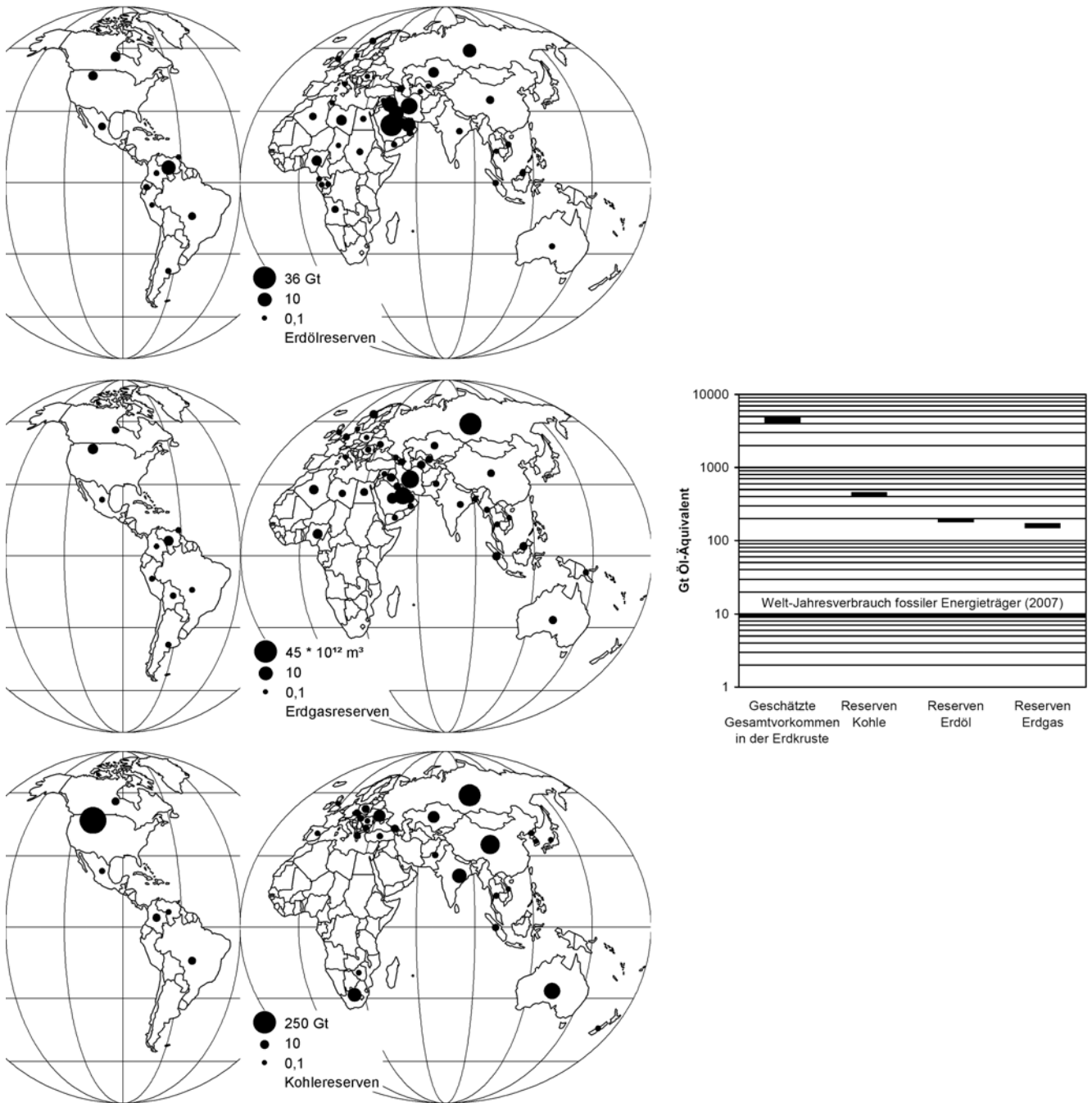


Abb. 2 Fossile Energierohstoffe
Nachgewiesene Reserven und deren geografische Verteilung nach Staaten (Daten: [3])

Wie Abb. 2 zeigt, entsprechen die nachgewiesenen Reserven von Kohle, Erdöl und Erdgas dem weltweiten Gesamtverbrauch während einiger Jahrzehnte. Die geschätzten Gesamtvorkommen in der Erdkruste liegen noch rund eine Zehnerpotenz höher.

Die geografische Verteilung zeigt bei den Erdölreserven die starke Dominanz der Staaten des Persischen Golfes. Diese ist beim Erdgas zugunsten von Russland abgeschwächt. Gleichmässiger verteilt sind die Kohlereserven, wobei die Grosstaaten USA, Russland, China und Australien besonders hervortreten.

2.2 Nukleare Energieträger

Als nuklearer Energierohstoff wird derzeit ausschliesslich *Uran* genutzt (Plutonium stammt aus Wiederaufbereitungsprozessen oder Brutreaktoren und ist somit kein primärer Rohstoff).

Die in Abb. 3 dargestellten nachgewiesenen Uranreserven entsprechen der aktuellen weltweiten Produktion während eines knappen Jahrhunderts. Wie bei den fossilen Energieträgern sind die geschätzten Gesamtvorkommen deutlich höher.

Die geografische Verteilung der Reserven ist ziemlich ausgeglichen. Australien und Kasachstan treten hervor, gefolgt von Kanada, den USA und etlichen anderen Staaten.

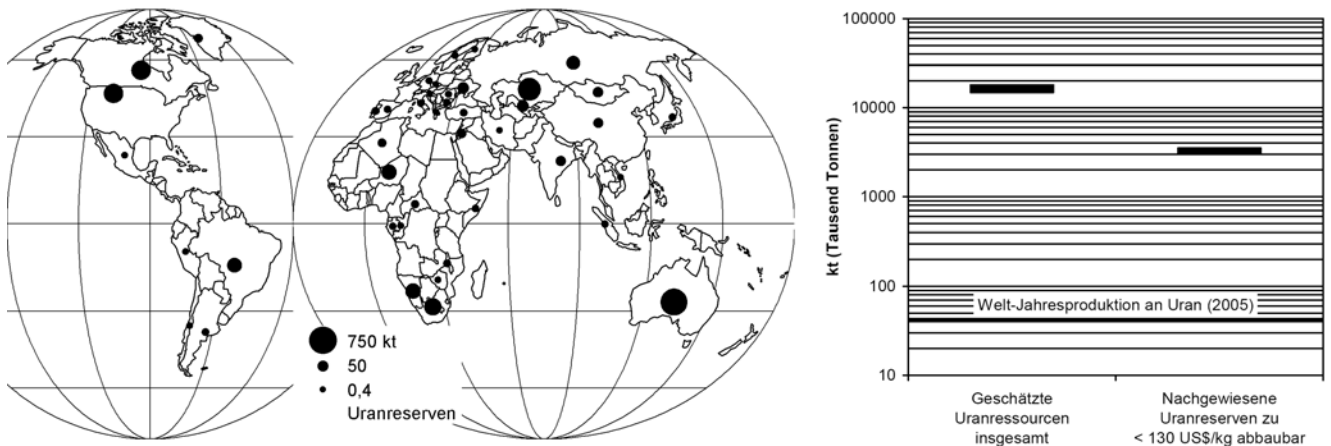


Abb. 3 Nukleare Energierohstoffe (Uran)

Nachgewiesene Reserven und deren geografische Verteilung nach Staaten (Daten: [2])

3. Erneuerbare Energieressourcen

Die natürlichen Energieflüsse werden, wenn sie im Kontext der Nutzung durch den Menschen betrachtet werden, mit dem Begriff «erneuerbare Energieressourcen» bezeichnet. Sie alle gehen auf drei *primäre erneuerbare Energieressourcen* zurück: Die von der Erde aufgefangene Solarstrahlung, die nukleare Zerfallsenergie im Erdinnern sowie die Rotationsenergie der Erde.

Als Derivate treten die *sekundären erneuerbaren Energieressourcen* auf. Es sind im Einzelnen:

- Die auf die Erdoberfläche auftreffende Solarstrahlung («direkte Solarenergie»)
- Die Wasserkraft
- Der Wind, inkl. den Meereswellen als Derivat zweiter Ordnung
- Die thermischen Meeresströmungen
- Die Biomasse
- Der geothermische Wärmefluss
- Die Gezeiten des Meeres

3.1 Derivate der Solarstrahlung

Die durch die Solarstrahlung jährlich von der Erde aufgefangene Energiemenge entspricht mehr als dem Zehntausendfachen des derzeitigen Welt-Energieverbrauchs. Direkte Solarenergie, Wasserkraft, Wind und Wellen, thermische Meeresströmungen sowie die Produktion von Biomasse sind Derivate der Solarstrahlung.

3.1.1 Direkte Solarenergie

Als *direkte Solarenergie* soll der Anteil der Solarstrahlung bezeichnet werden, der die Erdoberfläche erreicht, unter Ausschluss der Ozeane (Abb. 4). Der entsprechende natürliche Energiefluss beträgt mit 220000 PWh/a ein Mehrtausendfaches des Welt-Energieverbrauchs. Auch die geophysikalische Nutzungsgrenze liegt mit Sicherheit weit über jedem realistisch erscheinenden Energieverbrauch. – Auf der andern Seite ist die tatsächliche Nutzung noch ausserordentlich klein. Ein rasches Wachstum ist bereits im Gang und wird sich mit zunehmendem Fortschritt bezüglich ökonomischer Nutzbarkeit (vgl. Kap. 1.3) noch beschleunigen.

Die direkte Solarenergie lässt sich, mit Ausnahme der Gebiete über etwa 55° nördlicher Breite, auf der ganzen Welt sinnvoll nutzen. Speziell hohe Solarenergieressourcen gibt es indessen innerhalb der Zonen von etwa 10° bis 40° nördlicher und südlicher Breite.

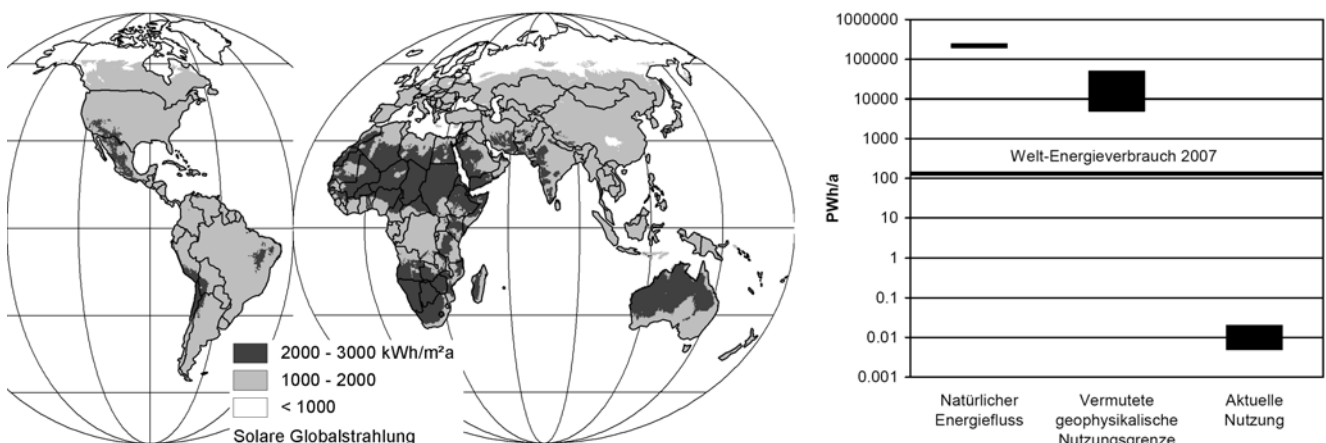


Abb. 4 Direkte Solarenergie

Geografische Verteilung und Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

3.1.2 Wasserkraft

Die *Wasserkraft* (Abb. 5) wird in den dafür geeigneten Industriestaaten, beispielsweise der Schweiz, schon lange und intensiv genutzt. Die Nutzung kann aber weltweit noch gesteigert werden. Der natürliche Energiefluss beträgt rund 40 PWh/a; die vermutete geophysikalische Nutzungsgrenze liegt bei etwa einem Zehntel des gegenwärtigen Welt-Energieverbrauchs.

In der geografischen Verteilung treten wie erwartet die Gebirgsstaaten (Alpen, Himalaja, Anden, Indonesien, Japan) hervor. Ein Vergleich mit Abb. 4 zeigt, dass sich Solarenergie und Wasserkraft geografisch gut ergänzen.

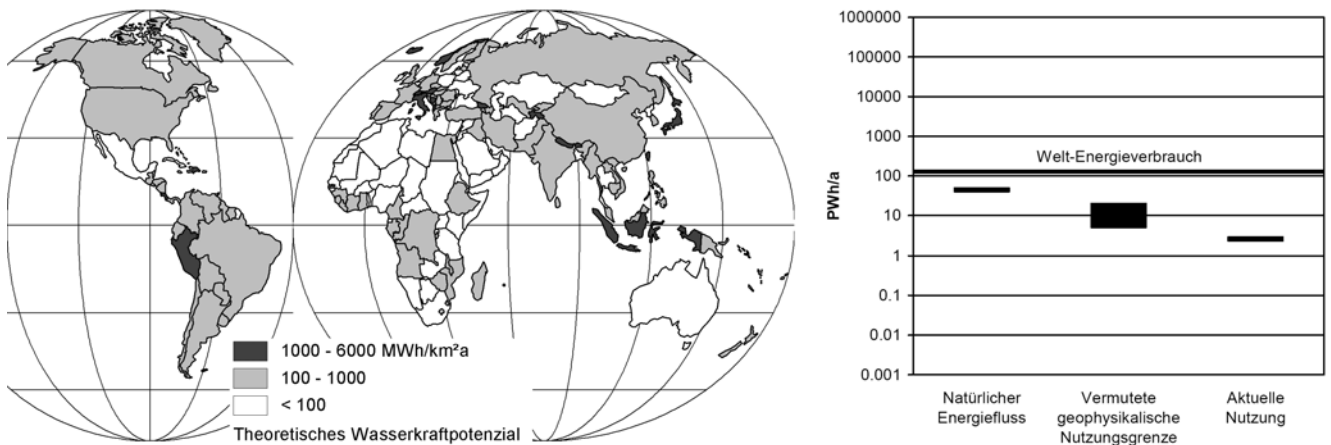


Abb. 5 Wasserkraft

Geografische Verteilung nach Staaten und Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

3.1.3 Wind und Wellen

Der natürliche Energiefluss der *Windenergie* (Abb. 6) beträgt etwa 8000 PWh/a und liegt damit etwas weniger als zwei Zehnerpotenzen über dem derzeitigen Welt-Energieverbrauch. Die aktuelle Nutzung ist noch klein, doch wächst sie zurzeit rasch und dürfte noch um mehr als zwei Zehnerpotenzen steigerbar sein. Die geophysikalische Nutzungsgrenze ist allerdings unsicher.

Sehr gute Windenergieressourcen findet man unter anderem an den Küstengebieten des Atlantiks; dort ist als Alternative oder Ergänzung auch Wellenenergie verfügbar. Nutzbare Windgeschwindigkeiten sind jedoch weit verbreitet, speziell windarm sind dagegen hauptsächlich die Tropen.

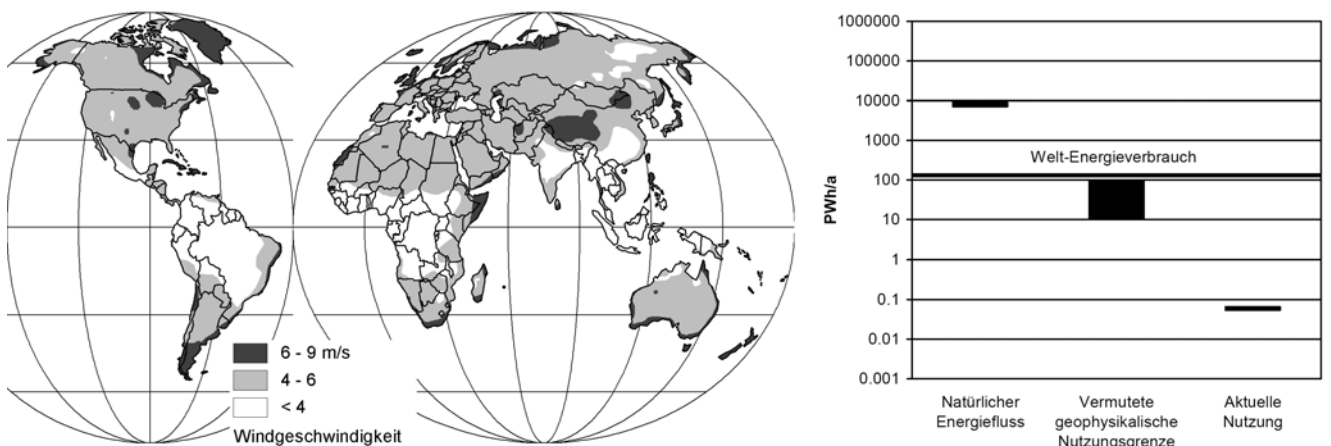


Abb. 6 Wind- und Wellenenergie

Geografische Verteilung und Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

3.1.4 Thermische Meeresströmungen

Die *thermischen Meeresströmungen* (Abb. 7) ergeben einen natürlichen Energiefluss von mindestens 10000 PWh/a, also rund zwei Zehnerpotenzen über dem derzeitigen Welt-Energieverbrauch. Die geophysikalische Nutzungsgrenze ist insbesondere aus ökologischen Gründen höchst unsicher, da Meeresströmungen in äusserst sensibler Weise mit dem Klima verknüpft sind. – Derzeit wird die Energie der Meeresströmungen noch nicht kommerziell genutzt.

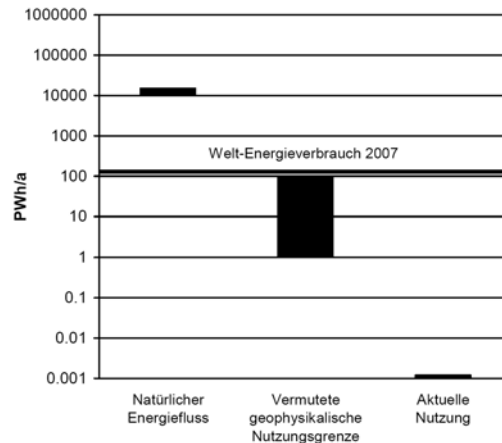


Abb. 7 Thermische Meeresströmungen
Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

3.1.5 Biomasse

Die natürliche Produktion von *Biomasse* beträgt mit rund 600 PWh/a rund das Fünffache des derzeitigen Welt-Energieverbrauchs. Zur Ermittlung der geophysikalischen Nutzungsgrenze sind ökologische Aspekte wichtig. – Die derzeitige Nutzung ist die höchste unter den erneuerbaren Energien, doch ist noch ein beträchtlicher Anteil auf den Verbrauch von Brennholz in kaum industrialisierten Ländern zurückzuführen. Eine wesentliche Steigerung technologisch hochstehender Nutzung ist möglich, doch ist die Konkurrenzsituation zur Produktion von Nahrungsmitteln und nachwachsenden Baustoffen zu berücksichtigen.

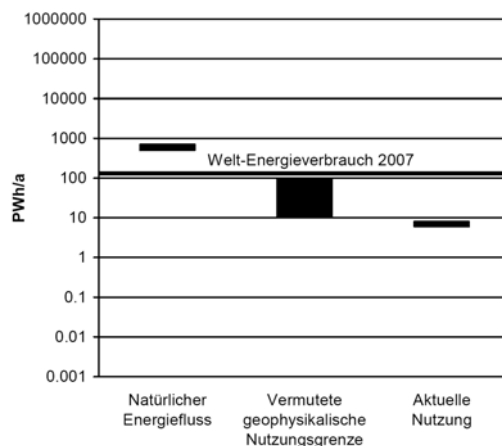


Abb. 8 Biomasse als Energieträger
Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

3.2 Geothermie

Die Geothermie stammt im wesentlichen aus der nuklearen Zerfallsenergie, die im Erdinnern natürlicherweise freigesetzt wird. Der dadurch entstehende natürliche Energiefluss vom Erdinnern zur Erdoberfläche wird *geothermischer Wärmefluss* genannt und erreicht auf der Landfläche der Erde insgesamt rund 80 PWh/a. Dies entspricht knapp der Grössenordnung des derzeitigen Welt-Energiebedarfs. – Die aktuelle Nutzung dürfte noch etwa um zwei Zehnerpotenzen steigerbar sein.

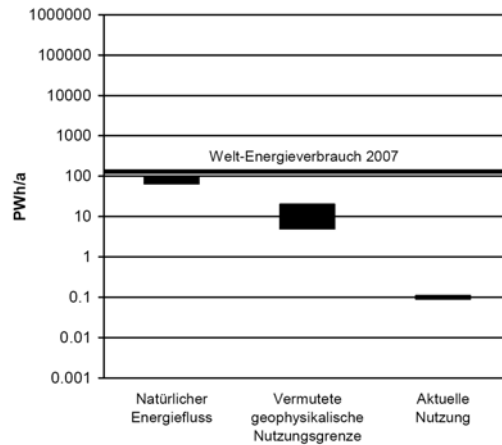


Abb. 9 Geothermie

Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

3.3 Derivat der Erdrotation: Gezeitenenergie

Die *Gezeiten* werden durch die Anziehungskraft des Mondes (und in geringerem Ausmass der Sonne) auf die Erdkruste und die Meere verursacht. Ihre Energie entstammt jedoch der Rotationsenergie der Erde.

Der durch die Gezeiten natürlich umgesetzte Energiefluss beträgt weniger als 20 PWh, liegt also um rund eine Zehnerpotenz unter dem derzeitigen Welt-Energieverbrauch. Da es sich um Resonanzschwingungen innerhalb der Meeresbecken handelt, die bei zu starker Dämpfung zum Erliegen kämen, liegt die vermutete geophysikalische Nutzungsgrenze nochmals beträchtlich tiefer. – Die aktuelle Nutzung ist noch ausserordentlich klein. Dies hat damit zu tun, dass die Nutzung des Gezeitenhubs durch Staubecken oft mit der Zugänglichkeit wichtiger Schiffshäfen interferiert. Die Nutzung der Gezeitenströme durch Unterwasserturbinen ist erst im Versuchsstadium, könnte aber ein beträchtliches Steigerungspotenzial aufweisen.

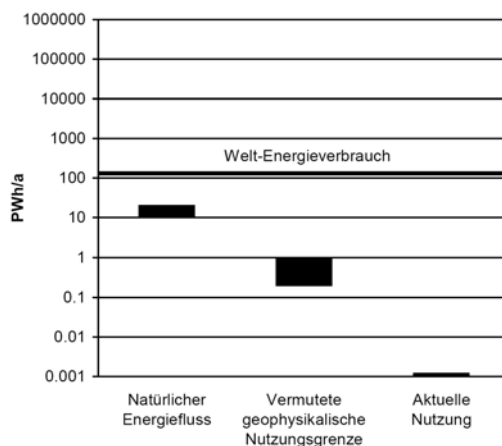


Abb. 10 Gezeitenenergie
Grösse der Ressourcen sowie aktuelle Nutzung (nach [1] und [5])

4. Ausblick

Die Ressourcen der fossilen und nuklearen Energierohstoffe sind relativ gut bekannt. Dies dank Jahrzehnten (nuklear) oder gar über einem Jahrhundert (fossil) systematischer Forschung und Explorationsarbeiten. Zwar braucht es für die Erschliessung neuer Ressourcen weiterhin laufender Forschungsanstrengungen, doch die Methodik dafür ist grundsätzlich bekannt. Grosse Kreativität ist indessen bezüglich der Abfallproblematik gefordert, insbesondere auf dem Gebiet der fossilen Energieträger (z.B. CO₂-Sequestrierung).

Beim breiten Feld der erneuerbaren Energieressourcen bestehen jedoch viele Wissenslücken. Diese betreffen sowohl die genauere Bezifferung der geophysikalischen Nutzungsgrenzen, wie auch die detaillierte Kenntnis der geografischen Ressourcenverteilung. Letztere ist für die jeweilige Beurteilung der technischen und ökonomischen Nutzbarkeit unerlässlich. – Es ist zu hoffen, dass die Lücken durch entsprechende Forschungsanstrengungen weiter geschlossen werden.

5. Quellen

- [1] Max Blatter: Geografie der erneuerbaren Energien (Energie-Atlas GmbH, 2006)
Teilaktualisierung auf CD-ROM (Energie-Atlas GmbH, 2008)
ISBN: 978-3-033-00724-6 und 978-3-9523352-1-5
- [2] World Energy Council: 2007 Survey of Energy Resources (WEC, London, 2007)
Internet: <http://www.worldenergy.org>
- [3] BP: Statistical Review of World Energy 2008 (BP, London, Juni 2008)
Internet: <http://www.bp.com>
- [4] United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Resources
(UN Economic Commission for Europe, Februar 2004)
Internet: <http://www.unece.org/ie/se/pdfs/UNFC/UNFCemr.pdf>
- [5] Max Blatter: Erneuerbare Energien – der Begriff der geophysikalischen Nutzungsgrenze
in: «Facility Management Solutions» Nr. 3-2007
Internet-Download: <http://dx.doi.org/10.2434/2007-1>