

Die Energiewende aus fachdidaktischer Sicht

Oliver Schwarz, Christian Deitersen

Didaktik der Physik, Universität Siegen, Adolf-Reichweinstraße 2, 57076 Siegen
schwarz@physik.uni-siegen.de, deitersen@physik.uni-siegen.de

Kurzfassung

Alle Formen der sogenannten regenerativen Energien werden hauptsächlich unter technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekten betrachtet. Fachleute führen eine detailverliebte Diskussion, die Bevölkerung steht entweder abseits oder fühlt sich getäuscht. Zu voreilig hat man regenerative Energien als umweltfreundlich bezeichnet oder sie als effektives Allheilmittel für den immer weiter steigenden Energiebedarf der Menschheit stilisiert.

Wir erleben in Deutschland gerade, wie sich viele Menschen von der an sich alternativlosen Nutzung regenerativer Energien abwenden, weil sie überrascht von den Konsequenzen der sogenannten Energiewende sind. Das ist im Grunde dramatisch, denn langfristig gibt es keine Alternative zum immer intensiveren Einsatz regenerativer Energie. Doch um die Menschen „mitzunehmen“ haben wir die didaktische Aufgabe die naturgesetzlichen Rahmenbedingungen und ihr Auswirkungen zu verdeutlichen. Ohne die Einbeziehung des bewussten Handelns sehr vieler Individuen wird die Zivilisation in einen „energetischen Abgrund“ laufen. Auch eine elementarisierte Diskussion kann dies herausarbeiten.

Der Flächenbedarf für die Gewinnung regenerativer Energien ist bei Wind- und Wasserkraft enorm. In Ländern, in denen kaum freie Flächen zur Verfügung stehen, kommt es zwangsläufig zur Flächenkonkurrenz mit anderen zivilisatorischen Nutzungsvarianten. In dicht besiedelten Staaten ist die Solarenergie eine wichtige Alternative im Bereich der regenerativen Energieformen.

1. Einleitung

Im Physik oder „NaWi“-Unterricht werden verschiedene Nutzungsformen der regenerativen Energie gegenwärtig zumeist unter technischen Gesichtspunkten erörtert. Dabei spielen Fragen, etwa der Effizienz von Windrädern oder der Energieumwandlung in Pumpspeicherwerken, also vergleichsweise detaillierte Problemstellungen, eine zentrale Rolle. Doch jenseits von fachspezifischen Untersuchungen zu speziellen technischen Nutzungsformen der regenerativen Energie müssen unbedingt auch allgemeinere Gesichtspunkte im Unterricht diskutiert werden. Die Gründe hierfür liegen auf der Hand: Mit der Erschöpfung fossiler Energielagerstätten wird die Menschheit zukünftig gezwungen sein nahezu ausschließlich auf regenerative Energien zurückzugreifen (vorläufig bleibt die Nutzung der Kernfusion eine wissenschaftlich-technische Vision, Brütertechnologien im Rahmen der Kernspaltungskraftwerke bleiben politisch und technologisch fragwürdig, sodass insgesamt auch die Kernenergie keine nachvollziehbare Zukunftsperspektive eröffnet).

Doch werden wir in der Lage sein die gesamte Menschheit mit regenerativer Energie zu versorgen? Können wir im globalen Maßstab alle Menschen gleichberechtigt an einem Energiekonsum teilhaben

lassen, der sich ausschließlich aus Sonne, Wasser und Wind speist und der den jetzigen Lebensstandard der entwickelten Industriegesellschaften sicherstellt? Hierzu einige Fakten:

- Die menschliche Zivilisation wächst, wächst und wächst. Während sich die Weltbevölkerung von 1850 bis 1997 um das Vierfache vergrößerte, wuchs im gleichen Zeitraum ihr Energiebedarf um das 1000-fache (vgl. [1]).
- Der gesamte Primärenergiebedarf der Menschheit betrug im Jahr 2011 mehr als 515 EJ (Exajoule, also 10^{18} Joule) oder 16,3 TW (vgl. [2]).
- Gegenwärtig haben 1,3 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität und 2,6 Milliarden Menschen steht keine saubere Kochgelegenheit zur Verfügung. Im Jahre 2030 werden sich diese Zahlen vermutlich nicht drastisch geändert haben. Auch dann werden rund eine Milliarde Menschen keinen elektrischen Strom nutzen und 2,6 Milliarden Menschen keine saubere Kochgelegenheit verwenden können. Dies hängt vor allem mit der bis zur Mitte des Jahrhunderts weiter wachsenden Weltbevölkerung zusammen (vgl. [3]).

Die oben teilweise genannten zivilisatorisch verursachten Rahmenbedingungen unseres zukünftigen Energieumsatzes müssen in Bezug gesetzt werden zu den durch die planetare Physik naturgesetzlich fest vorgegebenen Limits jedweden Energie- und Leistungsumsatzes auf der Erde. Doch über diese Grenzen machen wir uns viel zu wenig Gedanken, sodass die meisten Menschen irrtümlich davon ausgehen, die regenerative Energienutzung wäre die Lösung all unserer Energieprobleme. Typischerweise lassen sich dabei folgende Fehlvorstellungen feststellen:

- Man hält die regenerative Energie für unerschöpflich.
- Man glaubt, diese könne zukünftig noch viel, viel weiter ausgebaut werden.
- Man geht davon aus, dass nach einer gewissen Übergangsphase alle Menschen auf der Welt problemlos und auf dem Niveau des hohen Lebensstandards in Industriegesellschaften mit regenerativer Energie versorgt werden können.
- Man denkt, Deutschland könne im Sinne einer Insellösung mit Hilfe regenerativer Energienutzung unabhängig von den Energielieferungen anderer Länder werden, ja sogar Energie exportieren.

Doch sind all diese Erwartungen berechtigt?

2. Regenerative Energie aus planetarer Perspektive

Von den regenerativen Energien werden wir lediglich die Solar-, die Wind- und die Wasserenergie näher betrachten. Die Biomassenenergie hat in den Flächenländern der Erde und darüber hinaus auf regionaler Ebene durchaus größere Potentiale. Im globalen Maßstab und in den entwickelten Industrieländern kann sie jedoch keine nennenswerten Beiträge zur Energieversorgung erbringen, denn von der Strahlungsleistung der Sonne, welche die Pflanzen durch Photosynthese in chemische Energie überführen, werden im Langzeitmittel lediglich rund $1\text{W}/\text{m}^2$ in organischen Substanzen gespeichert.

Ein Beispiel: Rechnerisch hat damit ein kleiner Kaminofen mit 5000W Heizleistung ungefähr einen minimalsten Flächenbedarf in der Größenordnung von 5000m^2 ! Den absurd großen Flächenbedarf moderner Großstädte bei alleinigem Heizen mit Biomasse kann man daraus leicht abschätzen - die Bereitstellung technischer Nutzenergie und technischer Prozesswärme in Größenordnungen käme hinzu und wäre in Industriegesellschaften unmöglich.

Ähnliches gilt im globalen Maßstab für die geothermische Energienutzung. Hierzu sei kurz die entscheidende Zahl genannt: Der aus dem Erdinnern stammende geothermische Wärmestrom beträgt $4,4 \cdot 10^{13}$ Watt für die gesamte Erdoberfläche, man

vergleiche diese Zahl mit dem in der Einleitung genannten Leistungsumsatz der Menschheit für das Jahr 2011.

Die globale Analyse von Solar-, Wind- und Wasserenergie muss vom thermodynamischen Gleichgewicht unseres Heimatplaneten ausgehen:

Die thermische solare Einstrahlung von der Sonne auf die Erde und die thermischen Ausstrahlung von der Erde in den Weltraum müssen in gleichen Zeiteinheiten auch gleich groß sein. Für ein globales Gleichgewichtsmodell müssen wir die je Sekunde auf der Querschnittsfläche πR^2 der Erde ankommende Energie gleichmäßig auf die gesamte Erdoberfläche verteilen, mithin auf die Fläche $4\pi R^2$ (**Abb. 1**).

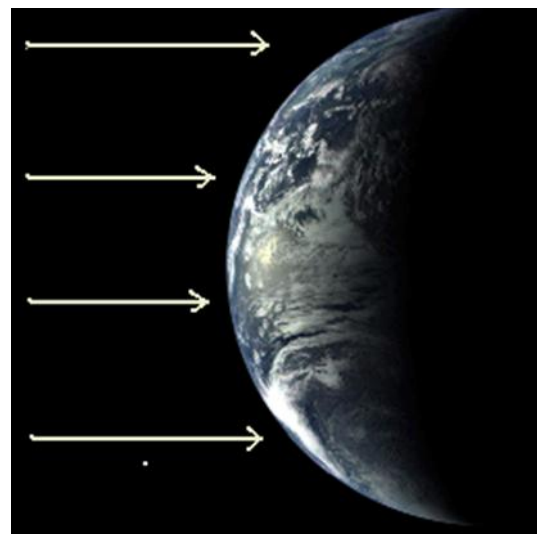


Abb. 1: Die auf der Querschnittsfläche der Erde ankommende Strahlungsmenge wird infolge der Erdrotation gleichmäßig verteilt und von der gesamten Erdoberfläche abgestrahlt.

Die Erde streut einen Teil der zu ihr gelangenden Sonnenstrahlung sogleich wieder ins All zurück. Das Rückstreuvermögen eines Himmelskörpers bezeichnet man als Albedo A . Die Albedo der Erde beträgt $0,3$, d.h. rund 30% der Sonnenstrahlung gelangen wieder ins Weltall, ohne dass sie auf der Erdoberfläche oder in der Erdatmosphäre absorbiert werden. Berücksichtigt man diesen Effekt, so erhält man für die im Mittel je Quadratmeter und Zeiteinheit auf die Oberseite der Erdatmosphäre treffende Strahlungsenergie S den Zusammenhang:

$$S = \frac{1}{4}(1-A)s = 240\text{W}/\text{m}^2 \quad (1)$$

mit der Solarkonstante $s = 1370\text{W}/\text{m}^2$.

All unsere nachfolgenden Überlegungen beziehen wir auf den globalen Mittelwert des Strahlungseintrages von 240Watt pro m^2 . Diese 240Watt , die die Erde pro Quadratmeter empfängt, muss sie im zeitlichen Mittel auch pro Quadratmeter wieder ins All abstrahlen.

Bei jeglichen Formen der technischen Energienutzung und -bereitstellung, aber auch bei natürlichen Energieumsätzen, kommt es zu einer Kette aufei-

einanderfolgender Schritte der Energieentwertung. Für die Nutzung von fossilen oder atomaren Energieträgern wird diese Energieentwertungskette bereits am Startpunkt technisch gesteuert und ausgelöst: Man „erzeugt“ mit dem jeweiligen Energieträger thermische Energie, die man mit möglichst hoher Temperatur in ein Reservoir (z.B. einen Behälter mit heißen Wasser, Dampf usw.) einspeist. Aus diesem Reservoir lässt man dann Wärme herausströmen. Während diese Wärme strömt – und nur dann – lässt sich eine gewisse Menge an mechanischer Nutzenergie abzweigen, die man dann ihrerseits in andere Energieformen, etwa elektrische Energie, umwandeln kann. Da es aber unabdingbar ist, den Wärmestrom aufrecht zu erhalten und da man grundsätzlich aus diesem Wärmestrom immer nur einen gewissen Anteil in andere Energieformen überführen kann, kommt es zu Verlusten. Ein großer Teil der strömenden Wärme wird in die Umgebung abgegeben und dissipiert dort. Aber auch die geschöpfte mechanische Arbeit, gleich ob man sie direkt nutzt oder in elektrische Energie umwandelt und erst dann verwendet, wird am Ende einer beliebigen Prozesskette wieder als Wärme in die Umgebung entweichen. Immer steht am Ende thermische Energie bei relativ niedriger Temperatur, die man kaum oder gar nicht mehr in Wärme-Kraft-Maschinen nutzen kann.

Prinzipiell ebenso verhält es sich mit den in den Geosystemen ablaufenden Energieumsätzen: Die von der Sonne zur Erdoberfläche gelangende Wärmestrahlung, die aufgrund ihrer großen Strahlungstemperatur von 6000 K unter thermodynamischen Gesichtspunkten sehr hochwertig ist, wird über natürliche Schritte der Energieentwertung in relativ geringwertige thermische Energie der Temperatur 288K (die mittlere Temperatur der Erde in Bodennähe) umgewandelt. Wäre die Erde eine (carnotsche) Wärmekraftmaschine, dann könnte sie infolge der soeben bezifferten Temperaturwerte einen sehr hohen Wirkungsgrad für die Verwandlung von Wärme in mechanische Arbeit von

$\eta = (6000K - 288K)/6000K = 0,95$ erreichen! Doch die Erde „arbeitet“ wesentlich uneffizienter. Die größte Menge der Sonnenstrahlung wird vom Erdboden absorbiert, erwärmt diesen im Mittel auf die besagten 288K und entzieht sich damit schlagartig einer Umwandlung in mechanische Energie.

Allerdings kommt es bei dieser Erwärmung des Bodens (einschließlich der Erwärmung der unteren Erdatmosphäre) zu vergleichsweise geringfügigen Temperaturunterschieden, die hauptsächlich durch die Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung von der geographischen Breite, durch die unterschiedliche Beschaffenheit der Erdoberfläche (mit „Oberfläche ist natürlich auch die Wasseroberfläche der Erde gemeint) und durch den Tag- und Nachtwechsel infolge der Erdrotation bedingt sind.

Für eine Umwandlung von thermischer Energie der Temperatur 288 K in mechanische Energieformen stehen deshalb vergleichsweise geringe Temperaturunterschiede in der Größenordnung von $\Delta T=10$ K zur Verfügung (z.B. die Temperaturunterschiede zwischen hohen und niedrigen geographischen Breiten oder an der Grenze von Land- und Wassermassen).

Mithin kann sich von der in Luft, Wasser und Erdboden vorhandenen thermischen Energie allerhöchstens der Anteil $\eta = 10K/288K = 0,035$ in mechanische Energieformen umwandeln.

3. Der potentielle Flächenbedarf regenerativer Energieformen

Im globalen Mittel gelangen je Quadratmeter Erdoberfläche etwa 240 Watt an Sonnenstrahlung zum Erdboden, insgesamt können davon also höchstens $240W/m^2 \cdot 0,035 = 8W/m^2$ mechanischen Energieformen, also zum Beispiel den natürlichen Wind- und Wasserströmungen, zufließen. Die tatsächlichen Wirkungsgrade sind freilich geringer. Insgesamt ergibt sich aus dem berechneten Wert von maximal 8 Watt pro Quadratmeter ein Leistungswert von rund $4 \cdot 10^{15}$ Watt für die gesamte Erdoberfläche.

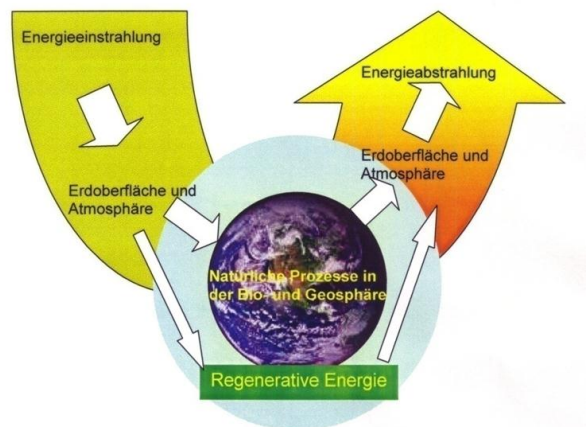


Abb. 2: Regenerative Energie wird aus den natürlichen Energieströmen abgezweigt. Die Frage ist, wie viel dieser Energie und wo man sie ohne größere Umweltbeeinflussungen entnehmen kann.

Auf der Grundlage eines Vergleiches zwischen diesem Zahlenwert und dem gegenwärtigen Primärleistungsbedarfs der Menschheit (der etwa 2 Zehnerpotenzen geringer ist) wird in der Literatur immer wieder die scheinbare Unerschöpflichkeit von Wind- und Wasserkraft hervorgehoben. Doch viel entscheidender als der globale Wert ist der auf den Quadratmeter Erdoberfläche bezogene Leistungswert. Nur er kann als zuverlässiger Parameter für den zu erwartenden Flächenverbrauch in einem bestimmten Land oder in einer bestimmten Region der Erde herangezogen werden.

Zur Veranschaulichung eine Abschätzung mit den globalen Mittelwerten: Wollte man die gesamte in Deutschland installierte elektrische Leistung von 170 GW allein mit Windenergie abdecken, dann entstände ein Flächenbedarf von $1,7 \cdot 10^{11} \text{ W} / 8 \text{ W} = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$, etwa 6 Prozent der Fläche Deutschlands, sofern alle technisch nachgeschalteten Prozesse den Wirkungsgrad 1 hätten. In der Realität käme man freilich auf einen Flächenbedarf, der merklich höher liegen würde. Solche Abschätzungen sollten unser Misstrauen im Hinblick auf Behauptungen erwecken, Deutschland könne allein auf seiner Fläche nur von „selbsterzeugter“ regenerativer Energie leben. Genauere Überlegungen und Analysen bestätigen unsere einfachen Berechnungen (man vgl. z.B.: [4]). Unsere lediglich auf dem Wirkungsgrad eines Carnotprozesses fußende Abschätzung lässt sich durch detailliertere Betrachtungen verfeinern (Für Windenergie s. [5], für Wind und weitere Energieformen s. [6]).

Beispiel	Flächenbedarf	Gemittelte Leistung	Leistung pro Quadratmeter
Itaipu-Staudamm	1350 km ²	10,8 GW	8 W/m ²
Bleilochtal-sperre	9,2 km ²	80 MW	9 W/m ²
Hohenwartetal-sperre	7,3 km ²	63 MW	9 W/m ²
Goldisthal (Pumpspeicherkraftwerk)	0,55 km ²	1060 MW (Spitzenlast)	1927 W/m ²
Offshore-Park „alpha ventus (Nordsee)“	4 km ²	30,5 MW	8 W/m ²
Sarnia Solar Farm, Ontario	0,97 km ²	13,7 MW	14 W/m ²
El Dorado & Copper Mountain Solar Project	0,72 km ²	14,2 MW	20 W/m ²

Tab. 1: Vergleich der Leistungsausbeute pro Quadratmeter verschiedener Kraftwerksanlagen (s. [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].)

Für den Schulunterricht sollten die physikalischen Überlegungen durch eigene Recherchen belegt und gefestigt werden. Hierzu kann man im Internet den Flächenbedarf von großen Wasser- und Windkraftwerken ermitteln und die dazugehörige mittlere Leistungsabgabe dieser Kraftwerke feststellen. Mit

diesen Zahlenwerten lässt sich die Leistungsausbeute pro Quadratmeter Oberfläche für jedes Kraftwerk bestimmen und mit der soeben berechneten Angabe von 8 W/m² vergleichen (vgl. **Tab. 1**). Bei Wasserkraftanlagen ist dabei die mit Wasser bedeckte Fläche heranzuziehen, bei Solar- und Großwindkraftanlagen die jeweiligen Stellflächen, auf denen diese installiert sind.

Schnell erkennt man aus den Zahlenwerten auch spezielle Kraftwerkstypen oder Energiespeicheranlagen. Das Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal ist dafür ein schönes Beispiel. Die große Leistungsausbeute von über 1900 Watt pro Quadratmeter kann nur über einen kurzen Zeitraum hinweg aufrechterhalten werden. Auffällig sind in der Tabelle 1 außerdem die deutlich höheren Leistungswerte für Solarkraftwerke. Neben technischen Details hat dies vor allem thermodynamische Gründe.

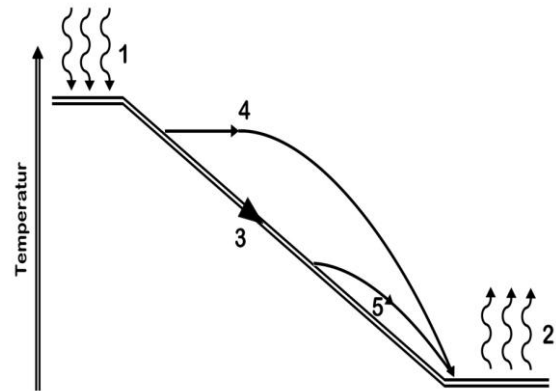


Abb. 3: Die natürliche Energieentwertung in den Geosystemen und das Einschalten der regenerativen Energienutzung in die Entwertungskette:

- 1) Ankommende Wärmestrahlung der Sonne ($T = 6000 \text{ K}$),
- 2) Wärmestrahlung der Erde in das All ($T = 288 \text{ K}$),
- 3) Natürliche thermische Entwertung der Energie in der Geosphäre,
- 4) Technische Nutzung und Entwertung der Sonnenenergie,
- 5) Technische Nutzung und Entwertung der Wind- und Wasserenergie.

Die direkte Solarenergienutzung schaltet sich in die natürlich ablaufende Energieentwertungskette an einem viel früheren Punkt als „Wind“ und „Wasser“ ein. Hier wird die Strahlungsleistung des Sonnenlichtes im Moment ihres Eintreffens auf der Erde abgefangen. Damit ist die Leistungseingangsgröße am Beginn des technischen Prozesses 240 Watt pro Quadratmeter und nicht 8 Watt pro Quadratmeter (im Sinne unserer soeben gemachten global gemittelten Flächenbetrachtung, natürlich nicht für ein bestimmtes Windrad oder eine bestimmte Wasserturbine). Damit steigt ihr globales Leistungspotential auf rund 10^{17} Watt – freilich ein nicht zu erreichender oberer Grenzwert, bei dem wir die Erde lückenlos mit Solarzellen des prinzipiell unerreichbaren Wirkungsgrades 1 tapezieren müssten.

Unabhängig von Problemen der technischen Realisierung ergibt sich dennoch für die Solarenergie ein Vorteil gegenüber Wasser- und Windkraft: Aufgrund der um fast zwei Zehnerpotenzen höheren Flächenleistung hat die Solarenergie das Potential, mit einem gegenüber Wind- und Wasserkraft deutlich kleineren Flächenbedarf die gleiche Menge an technisch nutzbarer Energie bereit zu stellen.

Inwieweit sich dieses Potential auch ausschöpfen lässt, bleibt gegenwärtig noch teilweise offen, doch die bislang realisierten – sowohl solarthermischen als auch photovoltaischen – Anlagen bestätigen den deutlich geringeren Flächenbedarf gegenüber Wasser- und Windkraftanlagen bei gleichem Energieertrag.

4. Der Zwang zur Speichertechnologie und das Flächenproblem von Pumpspeicherwerken

Wie wir soeben gesehen haben, eint alle Formen der regenerativen Energiebereitstellung, dass sie sich in die Abfolge der natürlich in den Geosystemen vorkommenden Energieentwertungsketten einschalten.

Bei herkömmlichen Formen der Energiebereitstellung wird die Energieentwertungskette hingegen bereits am Prozessbeginn technisch gesteuert. Wird am Ende der Kette – beim Verbraucher – mehr oder weniger Energie benötigt, dann wird dies einfach dadurch geregelt, dass man am Beginn der Prozesskette mehr oder weniger Primärenergie zuführt.

Die regenerative Energiebereitstellung muss hingegen mit den zufälligen, täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen in den natürlichen Energieentwertungsketten zu Recht kommen und darüber hinaus auch die Bedarfsschwankungen beim Verbraucher ausgleichen. Möglich ist dies nur, wenn man die herkömmliche Energiebereitstellung am Prozessbeginn (zumindest teilweise) imitiert – und zwar, indem man nach der Entnahme der Energie aus der natürlichen Kette große Energiereservoirs anlegt, die man dann bei Bedarf regulierend anzapfen kann.

Physikalisch-technisch stehen viele Speichertechnologien zur Verfügung, doch unter all diesen Technologien kommt gegenwärtig vor allem die ausgereifte Technologie der Pumpspeicherwerke zur Anwendung und in Betracht. Hier spielen auch finanzielle Aspekte eine bedeutende Rolle, denn die Kosten pro gespeicherter Kilowattstunde sind vor allem bei dieser Technik gegenwärtig in akzeptabler Größe.

Bei einem Pumpspeicherwerk wird zunächst elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt indem man Wasser auf ein größeres Höhenniveau pumpt, dann bei Bedarf von diesem Niveau ausströmen lässt und dabei über Turbinen die elektrische Energie zurückgewinnt. Lehrreich ist das folgende Beispiel zur Veranschaulichung:

Man stelle sich den Speichersee eines Pumpspeicherwerkes mit realistischen Annahmen so vor: Mittlere Wassertiefe 10 m, Fallhöhe bis zum Mittel-

punkt der Wassersäule 36m. Pro Quadratmeter Wasseroberfläche ergibt das eine potentielle Energie von $E = mgh = 10000 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 36 \text{ m} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ (2). Würde man diese mechanische Energie verlustlos in elektrische Energie umwandeln, ergäbe sich ein Wert von 1 kWh. Mit dieser in Privathaushalten üblichen elektrischen Nutzenergie kann man z.B. einen Backofen eine Stunde lang beheizen oder größenordnungsmäßig andere typische Haushaltsarbeiten durchführen – Waschen, Bügeln usw. Doch auf der Seite des Pumpspeicherwerkes bedeutet dies, dass in einer Stunde die gigantische Menge von 10 Tonnen Wasser aus dem Speichersee strömt!

Wollte man die gesamte gegenwärtig in Deutschland installierte elektrische Leistung von etwa 170 GW in Pumpspeicherwerken für nur eine Woche deponieren, um Phasen des für regenerative Energien ungünstigen Wetters (bewölkter Himmel, Windstille usw.) auszugleichen, dann würde man mit den soeben gemachten Annahmen eine Energie von $7 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Ws} = 10^{17} \text{ Ws}$ zwischenspeichern und es entstünde ein Flächenbedarf von $2,8 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$. Dieser Wert entspricht etwa 8% der Fläche Deutschlands für die in den Pumpspeicherwerken oben liegenden Wasserspeicher, hinzu kämen noch einmal 8% der Fläche Deutschlands für die talwärts liegenden Auffangbecken – insgesamt rund 16% Flächenbedarf, eine illusorische Größe (Anmerkung: Die Größenordnung des Flächenbedarfs für die regenerative Bereitstellung der Energie über Windkraft und die regenerative Speicherung genau dieser der Energie über Wasserkraft stimmt – wie man sich anhand der vorgehenden Betrachtungen überlegen kann – nicht nur „zufällig“ überein). Allerdings dienen alle bisherigen Pumpspeicherwerke immer nur dazu, sehr kurzfristige Spitzenlasten im Stromnetz abzufangen, keineswegs über viele Stunden und Tage hinweg die Grundlast aufrecht zu erhalten.

Es resultiert aus dieser Überlegung ein klarer Auftrag an die Grundlagenforschung zur Entwicklung effizienterer und kostengünstigerer Speichertechnologien mit geringem Oberflächenbedarf. Dazu ist die Erhöhung der Energiedichte der Speichermedien erforderlich. Es dürfte in naher Zukunft ausgeschlossen sein, sehr große Mengen der erzeugten elektrischen Energie über Tage oder Wochen zwischen zu speichern, woraus sich eine potentiell mögliche Anfälligkeit der Stromversorgung ergibt, sofern die Grundlast nicht mehr „klassisch“ abgesichert wird.

Tatsächlich kann man davon ausgehen, dass es - bei aller Unwägbarkeit im Eingangsumsatz der regenerativen Energien – innerhalb der Fläche Deutschlands zu Kompensationseffekten kommt, dass etwa bei fehlendem Sonnenschein der Wind merklich bläst usw. Hieraus entsteht bei intelligenter Umverteilung von Strom die Möglichkeit, den Bedarf an Zwischenspeichern zu reduzieren. Gleichzeitig erfordert dieser Ansatz aber dann auch, dass bei unter-

schiedlichen Formen der regenerativen Energiebereitstellung Überkapazitäten bewusst geplant und eingerechnet werden, damit diese Kompensation im Bedarfsfall erfolgen kann. Damit vergrößert sich klar das zuvor dargelegte Flächenproblem. Eine Grundlastabsicherung über andere Energieträger ist unausweichlich. Der Ausbau großräumiger Verteilungsnetze wird zwingend erforderlich, wobei die dabei erzielte elektrische Verteilungskapazität aus den genannten Gründen die Einspeisekapazität deutlich übersteigen muss.

5. Zusammenfassung:

Der Flächenbedarf für die Gewinnung regenerativer Energien ist bei Wind- und Wasserkraft enorm. In Ländern, in denen kaum freie Flächen zur Verfügung stehen, kommt es zwangsläufig zur Flächenkonkurrenz mit anderen zivilisatorischen Nutzungsvarianten. In dicht besiedelten Ländern scheint nur die Solarenergie eine leistungsstarke Alternative im Bereich der regenerativen Energieformen zu sein. Ihr Flächenbedarf ist vergleichsweise gering. Als weiteres Problem ist die Zwischenspeicherung der Energie anzusehen. Mit Lernenden der Abiturstufe lassen sich die wesentlichen Überlegungen mit Hilfe einfacher Abschätzungen nachvollziehen.

Abschließend sei betont, dass die obige Zusammenfassung nur allgemein physikalische und geophysikalische Überlegungen umfasst. Hinzukommen müssen natürlich technische, ökonomische und gesellschaftliche Betrachtungen – aber in dem eingangs formulierten Sinn gilt, dass diese Aspekte den naturgesetzlichen Bezugsrahmen nicht verändern können.

Für den Schulunterricht betreffen diese fächerübergreifenden Aspekte einen wesentlichen Punkt: Die Umstellung auf regenerative Energienutzung wird zukünftig unvermeidlich sein. Um die Energieversorgung – auch im globalen Maßstab – gerecht zu organisieren, kommt dem Einsparen von Energie in allen Industrienationen eine große Bedeutung zu. Physikalisches Verständnis der Zusammenhänge und umweltbewusstes Handeln als erzieherische

Aufgabe müssen dabei in angemessener Weise zusammen wirken.

6. Literatur

- [1] Danilov-Danil'yan, V.; Losev, K. S.; Reyf, I.E.: Sustainable Development and the Limitation of Growth. In: Future Prospects for World Civilization, Springer, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK 2009.
- [2] BP Statistical Review of the World Energy 2012.
- [3] World Energy Outlook 2012.
- [4] Heinloth, Klaus (2011) Energie für unser Leben: Nahrung, Wärme, Strom, Treibstoffe (früher, derzeit, künftig), In: W. Martienssen, D. Röß (Ed.): Physik im 21. Jahrhundert, Springer-Verlag, 2011.
- [5] Kleidon Axel (2012), Thermodynamik des Erdsystems - Was leistet die Erde? In Phys. Unserer Zeit, 3/2012 (43), S. 136-144, 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [6] Kessels, Winfried; Die Erneuerbaren Energien und die Energiespeicherung, in DGG Mittellungen 1/2013, S. 5-16.
- [7] <http://www.itaipu.gov.br/en/energy-home>
- [8] [http://www.seen.de/seebi/seedetails/Bleilochtal sperre.html](http://www.seen.de/seebi/seedetails/Bleilochtal Sperre.html)
- [9] <http://www.vattenfall.de/de/wasserkraft.htm>
- [10] <http://www.seen.de/seebi/seedetails/Hohenwart etalsperre.html>
- [11] [http://www.alpha-ventus.de/fileadmin/user_ upload/Broschuere/av_Broschuere_deutsch_web_bmu.pdf](http://www.alpha-ventus.de/fileadmin/user_upload/Broschuere/av_Broschuere_deutsch_web_bmu.pdf)
- [12] [http://www.firstsolar.com/en/Projects/~~/media/ Files/Completed/Sarnia%20Solar%20Farm/ DatasheetSarnia01201dsashx.ashx](http://www.firstsolar.com/en/Projects/~~/media/Files/Completed/Sarnia%20Solar%20Farm/DatasheetSarnia01201dsashx.ashx)
- [13] [http://www.firstsolar.com/Projects/~~/media/ File s/Downloads/PDF/Projects/DatasheetElDorado CopperMtndsnafstkProjectsOutgoingDatasheet ElDorado.ashx](http://www.firstsolar.com/Projects/~~/media/Files/Downloads/PDF/Projects/DatasheetElDorado CopperMtndsnafstkProjectsOutgoingDatasheet ElDorado.ashx)

Stand 05/2013