

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Warum ist Energie so wichtig? 1

Was ist Energie? 5

Energie für Energie 8

Grenzen von Technologien 15

Fossile Energieträger 15

Kernenergie 26

Wege in die Zukunft 49

Wasserkraft 53

Biomasse 63

Geothermie 70

Sonne 75

Wind 94

Speicher 104

 Mechanische Speicher 106

 Chemische Speicher 111

 Elektrische Speicher 115

 Wärmespeicher 118

 Mobile Speicher 122

Energieverteilung 125

Optimierte Prozesse 130

 Energiesparen 130

 Kältemaschine mit Wärmeantrieb 137

 Solarthermische Prozesse 139

 Hybridanlagen 140

Wasserstoff 141

 Regenerative Energien und Wasserstoff 142

Fadenscheiniger Vergleich	145
Kein Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen	146
Herstellungsverfahren	147
Speicherung und Sicherheit	149
Silicium	153
Langfristige Verfügbarkeit	155
Wirtschaftlichkeit	158
Innovative Ansätze	168
Wärme­kraft­ma­schin­en	168
Solar-Konzentratoren	170
Brennstoffzellen	171
Windkraftanlagen	171
Andere Verfahren	174
Nutzungskonzepte	176

Nachwort 183

Glossar 185

Energieformen	185
Bewegungsenergie	185
Potenzielle oder Lageenergie	185
Chemische Energie	186
Thermische Energie	186
Elektrische Energie	186
Äquivalenz von Energie und Masse	186
Exergie und Anergie	187
Regenerative Energie	188
Enthalpie	189
Entropie	190
Energieerhaltung	191
Perpetuum Mobile erster Art	191
Perpetuum Mobile zweiter Art	192
Plasma	192

Literatur und weitere Quellen 193

Literatur	193
Weitere Quellen	198

Sachwortverzeichnis 199

Wege in die Zukunft

Wo rührt unser Energieproblem eigentlich her? Wie kommt es, dass natürliche Prozesse davon nicht auch betroffen sind?

Frühere Gesellschaften kannten die Nutzung des Feuers für thermische Zwecke und Beleuchtung, sie waren für mechanische Arbeiten jedoch zunächst allein auf Muskelkraft angewiesen. Aber bereits in der Antike war die Nutzung natürlicher Energiequellen – im heutigen Sprachgebrauch: *regenerative Energien* – gebräuchlich. Wasserräder, die zunächst nur zum Schöpfen von Wasser für Bewässerungsanlagen dienten, wurden bereits vor mehr als 3.000 Jahren in Mesopotamien verwendet. Im Römischen Reich ist auch der Antrieb von Mühlen durch Wasserkraft belegt. Auf eine ähnlich lange Tradition kann die Entwicklung von Segelschiffen zurückblicken. Ihre Geschichte beginnt zur Zeit der Pharaonen in Ägypten mit Segelbooten auf dem Nil. Um 1.500–200 vor unserer Zeitrechnung segelten die Vorfahren der Polynesier vom asiatischen Festland bis zu den Osterinseln. Windräder wurden vor rund 1.400 Jahren erfunden. Zunächst wurden sie in Persien, später auch in Asien zum Mahlen von Getreide genutzt. Vom 12. Jahrhundert an kam diese Technologie dann auch in Mitteleuropa



Bild 10 Heronsball (Aeolipile).

zum Einsatz. Sogar erste mit Wasserdampf betriebene Gerätschaften waren schon in der Antike bekannt. Sie dienten jedoch keinerlei technischem Zweck und waren vielmehr künstlerische Spielerei (Heron von Alexandria, 1. Jahrhundert: Aeolipile).

Einfache Maschinen wie Hebel und Flaschenzug waren bereits wesentlich früher bekannt, diese verringern die zu leistende Arbeit jedoch nicht, sondern erleichtern sie lediglich: Der Kraftaufwand verringert sich, während der Weg, entlang dem diese Kraft aufzuwenden ist, proportional größer wird. So wurden für das Errichten von Bauwerken im antiken Ägypten Seilwinden genutzt. Der Hebel dürfte sogar in der Jungsteinzeit bekannt gewesen sein. Bis vor rund zweihundert Jahren mussten die meisten Tätigkeiten mit – menschlicher oder tierischer – Muskelkraft verrichtet werden.

Erst mit der Erfindung der Dampfmaschine Ende des 17. Jahrhunderts und den Verbesserungen durch James Watt in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts war eine leistungsfähige Maschine verfügbar, deren Wirkungsgrad mit gerade einmal 3 % noch eher bescheiden ausfiel. Mit anderen Worten: 97 % der im Brennstoff enthaltenen Energie wurden ungenutzt zum Schornstein hinaus befördert oder in Form von Abwärme an die Umgebung abgestrahlt. Doch existierte nun erstmals eine Maschine, die unabhängig von natürlichen Ressourcen wie Wind oder fließendem Wasser – und eben auch unabhängig von Muskelkraft – mechanische Arbeiten verrichten konnte. Im Jahre 1801 wurde das erste Straßenfahrzeug von Richard Trevithick mit einem Antrieb durch eine Dampfmaschine ausgerüstet, drei Jahre später die erste Dampflokomotive in Gang gesetzt. Obwohl mit der Dampfmaschine nicht nur eine technische Revolution und der Beginn einer neuen Ära ausgelöst wurden, blieb der Wirkungsgrad dieser ersten *Kraftmaschinen* bis zum Ende der mehr als 150-jährigen Entwicklungsgeschichte mit kaum 10 % sehr niedrig.

Schon 1837 – und damit mehr als zwanzig Jahre vor den ersten Verbrennungsmotoren – wurde der erste Elektromotor zum Patent angemeldet. Für den technischen Einsatz mangelte es zunächst an einer ganz entscheidenden Größe: hinreichenden Mengen an elektrischer Energie. Dies änderte sich erst 1866 durch die Erfindung der Dynamomaschine, des ersten elektrischen Generators, durch Siemens. Zuvor war man auf galvanische Zellen angewiesen, denn leistungsfähige Akkumulatoren zum Speichern elektrischer Ladungen waren erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts verfügbar.

Mitte des 19. Jahrhunderts kamen dann Gas- und kurze Zeit später auch erste Otto-Motoren auf. Sie bildeten die Basis für die ersten Kraftfahrzeuge in den achtziger Jahren desselben Jahrhunderts. Kurze Zeit später wurde auch der Dieselmotor erfunden.

Damit sind die Archetypen der bis heute wichtigsten Kraftmaschinen bereits genannt. Allen gemeinsam ist der Umstand, dass sie für das Bereitstellen ihrer motorischen Leistung zunächst auf Energieträger – Kraftstoffe, elektrischen Strom – angewiesen sind, die ihrerseits zunächst erzeugt oder bereitgestellt werden müssen.

Blickt man zurück in die Vergangenheit, so scheint es, als ob der Segen der industriellen Revolution – die Befreiung von schwerer und unangenehmer körperlicher Anstrengung durch den Einsatz von Maschinen – unmittelbar auch seine Schattenseiten offenbart. Die Unabhängigkeit von lokalen Gegebenheiten und der zeitlich schwankenden Versorgung durch Wind- und Wasserräder wurde durch die nun benötigten fossilen Energieträger teuer erkauft. Denn die konstante und kontinuierliche Motorkraft der Dampfmaschine erfordert eine ebenso konstante und kontinuierliche Zufuhr von Brennstoff sowie im Falle der Dampfmaschine zusätzlich hinreichende Mengen an Wasser. Erschienen die Vorräte von Kohle und Erdöl zunächst grenzenlos groß, so zeichnen sich inzwischen deutlich sichtbare Nutzungshorizonte ab. Und gerade die Sorge vor unzureichenden Lieferungen lässt die Rohstoffpreise von einem Rekordniveau zum nächsten steigen. Immerhin hat diese Situation auch ihre positiven Seiten: Zum einen gewinnen bislang als unwirtschaftlich betrachtete Vorkommen und Abbauverfahren an Attraktivität, zum anderen bekommen aber auch gerade alternative Konzepte eine reelle Chance, sich gegenüber den etablierten Nutzungsszenarien und Prozessketten zu behaupten. Das darf jedoch nicht zu der Annahme verleiten, dass Erdöl – sofern man bereit ist, beliebig hohe Preise zu akzeptieren – immer zur Verfügung stehen wird.

Doch nicht nur der Brennstoff hat seinen Preis, auch die mit der Nutzung der fossilen Energieträger einhergehenden Folgen dürfen nicht unbetrachtet bleiben. Wie hoch der Preis dafür tatsächlich ist, kann bestenfalls geschätzt werden. Die Folgen der durch die Verbrennung von Kohle und Öl verursachten Umweltbelastung – direkt in Form von Staub und Abgasen, mittelbar mit Klimaschwankungen und extremen Witterungsereignissen – sind, falls überhaupt zu beziffern, astronomisch hoch. Wäre nicht unsere Energieversorgung auf Grund

der sich abzeichnenden Erschöpfung der Kohle-, Erdöl- und Erdgasvorkommen schon bedroht, allein die sich andeutenden Klimaänderungen machen ein Umdenken dringend erforderlich. Erst wenn der weltweite Ausstoß an Schadstoffen und Treibhausgasen merkbar sinkt – was angesichts der aufstrebenden Industrien in Schwellenländern wie Brasilien, Indien oder China eher fraglich erscheint –, besteht die Chance, dass sich unsere Biosphäre über einen längeren Zeitraum wieder zu regenerieren beginnt, angefangen beim sich permanent vergrößernden Ozonloch über den Polkappen bis hin zur fortgesetzten Erwärmung der Ozeane.

Zuletzt bleibt noch eine wesentliche Frage offen: Wie gelangte die Energie einst in die Energieträger? Die Antwort mag verwundern, ist sie doch geradezu erschreckend einfach. Der weit überwiegende Anteil der heute genutzten Energie, insbesondere die der fossilen Energieträger, basiert auf der Sonneneinstrahlung. Mittelbar sind auch Biomasse, Wind und Wasserkraft von ihr abhängig (lokale Erwärmung führt zu Wind und Verdunstung, die Wolken regnen über dem Kontinent ab, am Ende der Wirkungskette steht die Wasserkraft der Flüsse). 2 % der auf die Erde eingestrahltene Solarenergie reichen für den Antrieb sämtlicher Windsysteme aus. Die Photosynthese der Pflanzen lässt mit Hilfe von nur 0,1 % der eingestrahltene Energie jährlich weit über 100 Mrd. t Biomasse entstehen [46]. Die Sonne ist unser wichtigster Energielieferant – und wird es auch immer bleiben.

Soweit sich die Gedanken weiterhin auf ein Auffinden und *Ausbeuten* von Lagerstätten fossiler Energieträger konzentrieren, anstatt auf ein *Ernten* regenerativer und damit auch *kontinuierlich* verfügbarer Energiequellen, solange kann es keinen Ausweg aus einer eskalierenden Energiekrise geben. Biologische Prozesse, die seit Urzeiten im Zuge der Evolution immer weiter optimiert wurden, können zudem als wichtiges Vorbild dienen: Hohe Effizienz und 100 %iges Recycling von »biologischen Abfällen« – was in der Konsequenz letztlich bedeutet: Es gibt überhaupt keinen Abfall; wie weit ist unser *way of life* davon entfernt! Ebenso wie das Vermeiden von Abfall wird auch das Prinzip *ernten* anstelle von *fördern/ausbeuten* verwirklicht. Das als Ernte zur Verfügung stehende Energieangebot ist riesig; nicht nur für biologische Prozesse, sondern auch für technische Anwendungen. Neben der Sonneneinstrahlung und deren mittelbaren Auswirkungen Wind, Biomasse und Wasserkraft (Flüsse) existieren zudem ebenso unererschöpfliche Ressourcen wie beispielsweise Erdwärme (Geothermie)

und bislang wenig beachtete Formen der Wasserkraft (Meeresströmungen, Gezeiten, Wellengang).

Wasserkraft

Weltweit wird derzeit knapp ein Fünftel der elektrischen Energie mit Wasserkraftwerken erzeugt. Damit ist Wasserkraft die wichtigste der aktuell genutzten regenerativen Energiequellen. Je nach den geographischen Gegebenheiten ist der Anteil auch deutlich höher: Norwegen deckt fast seinen gesamten Elektrizitätsbedarf mit Wasserkraft, Brasilien und Island jeweils zu rund 80 %. In Deutschland beträgt die Wasserkraftquote nur rund 5 %. Österreichische Wasserkraftwerke liefern hingegen mehr als die Hälfte der landesweiten Stromproduktion.

Das weltweit wirtschaftlich nutzbare Potenzial wird erst zu einem Drittel ausgeschöpft; insbesondere in Afrika, Südamerika und Asien existieren noch große Reserven. Beim weiteren Ausbau von Großanlagen sind jedoch auch soziale und ökologische Auswirkungen der Dammbauten zu bedenken. Die Überflutung großer Landstriche führt im Vorfeld der Bauvorhaben zu teilweise erheblichen Zwangsumsiedelungen – beim kürzlich in China in Betrieb genommenen Drei-Schluchten-Staudamm waren rund 2 Millionen Menschen davon betroffen. Zudem führt die Überschwemmung vormals mit Wald und Grünland bewachsener Flächen durch das Verrotten der Biomasse zu einer – wenn auch nur einmaligen – Emission von klimaschädlichem Kohlendioxid und Methan. Für Fische stellen speziell Großanlagen eine unüberwindliche Hürde dar. Entsprechend ist der Fortbestand lokal ansässiger Arten gefährdet. In einer Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit* wird festgehalten [47]:

Der Aufstau eines Gewässers stellt einen massiven Eingriff in sein Ökosystem dar. Der natürliche Geschiebe- und Schwebstoffhaushalt wird gestört. Die Durchgängigkeit für Fische und andere aquatische Lebewesen wird behindert. Durch die Errichtung einer Stauhaltung wird aus dem Fließgewässer ein See mit geringer Durchströmung, d. h., es tritt eine Veränderung des Gewässercharakters ein. Durch Stauhaltungsdämme erfolgt eine Abtrennung des Gewässers von seiner Auenregion. Bei Ausleitungskraftwerken

wird dem Mutterbett Wasser entzogen, was zu einer Beeinträchtigung der Abflussdynamik führen kann.

Etliche Staudämme haben darüber hinaus mit einer raschen Versandung während des Betriebs zu kämpfen. Alle diese Faktoren schränken den nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft ein, so dass zukünftige Projekte eher im mittleren Leistungsbereich liegen werden. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sieht für den Neubau von Wasserkraftwerken mit einer Leistung unter 500 kW eine Reihe ökologischer Vorgaben vor. Anlagen, die ab 2008 neu in Betrieb genommen werden, erhalten nur noch dann die volle Einspeisevergütung [48], *wenn sie im Zusammenhang mit einer Verbesserung des ökologischen Zustandes des Fließgewässers errichtet wurden oder wenn der anzustrebende ökologische Zustand bereits vorher erreicht wurde und durch die Neuanlage nicht verschlechtert wird.* Bislang ein einmaliger Vorgang: Mit dem Betrieb von Kraftwerken soll der ökologische Zustand sogar verbessert werden!

Ein in diesem Zusammenhang viel versprechender technologischer Ansatz – gerade auch für Anlagen im kleineren und mittleren Leistungsbereich – betrifft Gewässerströmungen. Im Gegensatz zu konventionellen Wasserkraftwerken wird nicht die Fallhöhe, sondern die Fließgeschwindigkeit des Wassers im natürlichen Verlauf genutzt. Dadurch entfallen große Dammbauten und der Eingriff in die Ökosysteme reduziert sich auf ein Minimum. Entsprechende Anlagen können längs des Flusslaufs in gewissen Abständen immer wieder platziert werden. Einzige Voraussetzung für die dezentrale und kontinuierliche Versorgung: Der Fluss muss ganzjährig über einen hinreichenden Wasserpegel verfügen.



Bild 11 Flow Converter für Gewässerströmungen (Andreas Tausch, Christian Synwoldt).