

# **Wachstum und Energie**

Ein Beitrag zur fundierten Diskussion in Unterricht und Lehre auf  
naturgesetzlicher Grundlage

DISSERTATION

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Philosophie

vorgelegt von

Christian Josef Deitersen

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität Siegen

Siegen 2017

Gutachter der Dissertation      Prof. Dr. Manfred Bodemann      Universität Siegen  
   Prof. Dr. Oliver Schwarz (Betreuer)      Universität Siegen  
Tag der mündlichen Prüfung:      19.04.2018

Standardlizenz: Typ CC by-nc-nd 4.0

# Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Kurskonzeptes, bestehend aus mehreren Lernmodulen, welches die aktuelle Energiediskussion aus einer bisher wenig berücksichtigten Perspektive untersucht. Anders als bislang betrachten wir die Grenzen jeglicher Form der Energiebereitstellung für zivilisatorische Prozesse anhand von Überlegungen, die sich aus den grundlegenden Gesetzen der Physik und der Geowissenschaften einschließlich der Astronomie ergeben. Der Kurs richtet sich hauptsächlich an Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe, Teilaspekte können jedoch auch schon in vorangehenden Klassenstufen unterrichtet werden. Begleitet werden die Lernmodule einerseits von fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Vorbetrachtungen und andererseits von ausgewählten Aufgaben zur Festigung des Erlernten jeweils am Ende einer Lehreinheit. Mehrere Erprobungen flossen in die Entwicklung der Lernmodule ein.

Unbestreitbar ist die gesellschaftliche Bedeutung eines Unterrichts, der das beschriebene Themenfeld zum Inhalt hat. Diese Arbeit liefert detaillierte Beiträge zur Legitimation eines solchen Unterrichtsstoffes. Es wird der Lehrplan für die gymnasiale Oberstufe in NRW analysiert, flankierend erbringt eine vergleichende Studie gängiger Schulbücher den klaren Hinweis auf die Tatsache, dass umweltphysikalische Themengebiete im Schulunterricht zwar in Hinblick auf die Energiedebatte angesprochen werden, die naturgesetzlich fixierten Handlungsspielräume leider zu kurz oder überhaupt nicht zur Sprache kommen. Durchgeführte Umfragen sollen die Notwendigkeit eines neuen Kurses zum Themenfeld Energie – Wachstum – Umwelt unterstützen. Von essenzieller Bedeutung ist allerdings dabei, dass die fundamentalen Prozesse und ihre Dynamik nach entsprechender Elementarisierung im Lernprozess adäquat abgebildet werden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit widmet sich die vorliegende Untersuchung dabei der Abschätzung planetarer Wachstumsgrenzen, dem Strahlungsgleichgewicht der Erde, dem Begriff des Strahlungsantriebs, den Potenzialen regenerativer Energien und der Einsicht in deren geringe Wirkungspotenziale anhand von Abschätzungen der Flächenleistungsdichte.

# Abstract

This thesis aims for a development of a course containing several teaching modules, in which the energy revolution is researched from a rarely used perspective thus far. In a break from tradition we examine the limits of any energy supply for civilizing processes based on considerations which arise as results of fundamental laws of physics and geophysics including astronomy. This course is mainly directed at pupils of senior classes in secondary schools, however partial aspects can also be taught in preceding classes. The teaching modules are accompanied on the one hand by scientific and didactical previews and on the other hand by selected tasks at the end of the modules to consolidate the previously acquired knowledge. The teaching modules have been tested through several trials at school.

The social importance of a class which contains the described subject is indisputable. This thesis provides detailed contributions for a legitimization of this kind of teaching subject. The curriculum of NRW is analyzed, accompanied by a comparing study of common school books which clearly stresses the fact that environmental physical subjects at school are addressed in view of the energy revolution, but that the nomological scope is being rarely discussed or not at all. Conducted surveys shall support the necessity of a new course about energy – growth – environment. Of essential importance is however that the fundamental processes and dynamics are presented adequately in the learning process. Without the demand of completeness, the present investigation attends to the estimation of planetary limits, the radiative equilibrium of the earth, the term of radiative forcing, the capabilities of renewable energies and the realization of their low potential effectiveness based on surface power density assessments.

# Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, ohne deren Unterstützung, Betreuung und Begleitung diese Arbeit kaum entstanden wäre.

Mein besonderer Dank gilt Frau Ingrid Kuhn, ohne deren finanzielle Unterstützung meine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Didaktik der Physik und somit die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ich werde mich immer nach bestem Wissen bemühen, die wissenschaftliche Arbeit im Sinne Wilfried Kuhns fortzusetzen.

Ebenso danke ich insbesondere Herrn Prof. Dr. Schwarz für die Betreuung dieser Arbeit. Auch allen weiteren Mitarbeitern der Arbeitsgruppe der Didaktik der Physik, Prof. Dr. Manfred Bodemann, Prof. Dr. Wolfram Winnenburg, Dr. Henrik Bernshausen, Lenka Bzduskova, Dr. Volker Heck, Sascha Hohmann, Dr. Simon Kraus, Dr. Eduard Krause, Sebastian Launer, Dr. Ina Milischenko, Philipp Raack, Sabine Schirm-Springob, Cornelia Schulte, Christoph Springob, Dr. Tran Ngoc Chat und Adrian Weber sei an dieser Stelle mein herzlicher Dank ausgesprochen. Frau Dr. Pia Breuer danke ich für ihre Unterstützung und das sorgfältige Korrekturlesen.

Zum Schluss möchte ich mich bei meinen Eltern sowie Geschwistern für die Unterstützung während meines Studiums und der Promotion bedanken.

Siegen, im Dezember 2017

Christian Deitersen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Energiewende als fachdidaktische Herausforderung . . . . .	1
1.2	Überblick über die zentralen Fragestellungen und Forschungsmethoden . . . . .	4
1.3	Legitimation aus Sicht der Schule - Zum Stand der Kernlehrpläne	6
1.4	Zielgruppe und Anforderungsniveaus . . . . .	9
1.5	Struktur der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Die gegenwärtige Situation der Energiedebatte im Kontext Schule</b>	<b>12</b>
2.1	Bildung für nachhaltige Entwicklung . . . . .	12
2.2	Warum ist eine Beschäftigung in der Schule sinnvoll? . . . . .	15
2.2.1	Allgemeinbildung als Auftrag von Schule . . . . .	17
2.2.2	Fächerübergreifender Unterricht als eine Möglichkeit zur Gestaltung . . . . .	18
2.3	Befragungen zur Erhebung vorhandener Vorstellungen zur Energiediskussion . . . . .	21
2.3.1	Fehlvorstellungen als wesentlicher Einflussfaktor . . . . .	21
2.3.2	Präsentation der Fragebögen . . . . .	22
2.4	Umweltphysik und Energiewende im Schulunterricht – eine Schulbuchanalyse . . . . .	29
2.4.1	Auswahl der Schulbücher und Beschreibung der Methodik . . . . .	29

---

2.4.2	Ergebnisse der Schulbuchanalysen . . . . .	31
2.5	Zusammenfassung der Teilergebnisse . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Andauerndes Wachstum als falsches Ziel gesellschaftlicher Entwicklung</b>	<b>40</b>
3.1	Fachdidaktische und fachwissenschaftliche Vorüberlegungen zum Wachstum – Ziele des Lernmoduls . . . . .	40
3.2	Lernmodul 1 . . . . .	45
3.2.1	Eine kurze mathematische Beschreibung des exponentiellen Wachstums . . . . .	45
3.2.2	Wie viele Menschen kann die Erde tragen? . . . . .	53
3.2.3	Gegenwärtige Situation und aktueller Energiebedarf . . . . .	58
3.2.4	Kosmische Wachstumsgrenzen . . . . .	62
3.2.5	Abschließende Betrachtung des Lernmoduls . . . . .	68
3.2.6	Aufgaben zu Lernmodul 1 . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Strahlungshaushalt, Strahlungsantrieb und Gleichgewichtstemperatur</b>	<b>71</b>
4.1	Fachdidaktische und fachwissenschaftliche Vorüberlegungen zum Strahlungshaushalt der Erde - Ziele des Lernmoduls . . . . .	71
4.1.1	Der Budgetgedanke als hilfreiches Konzept zur Untersuchung globaler Energie- und Stoffströme . . . . .	71
4.1.2	Herleitung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes . . . . .	74
4.2	Lernmodul 2 . . . . .	77
4.2.1	Möglichkeiten des Wärmetransports . . . . .	77
4.2.2	Das Wiensche Verschiebungsgesetz und die Leuchtkraft der Sonne . . . . .	80
4.2.3	Der Strahlungsantrieb und seine Auswirkungen . . . . .	82
4.2.4	Ein einfaches Atmosphärenmodell . . . . .	86
4.2.5	Nicht-anthropogene Strahlungsantriebe . . . . .	90

---

4.2.6	Anthropogene Strahlungsantriebe am Beispiel des „Fifth Assessment Reports“ des IPCC . . . . .	98
4.2.7	Schlussfolgerungen für die Hand des Schülers . . . . .	101
4.3	Abschließende Betrachtung des Lernmoduls . . . . .	102
4.4	Aufgaben zu Lernmodul 2 . . . . .	102
<b>5</b>	<b>Untersuchung globaler Energieströme in Hinblick auf die Potenziale regenerativer Energien</b>	<b>104</b>
5.1	Fachdidaktische und fachwissenschaftliche Vorüberlegungen . . .	104
5.1.1	Globale und lokale Betrachtungen . . . . .	104
5.1.2	Der Carnot-Wirkungsgrad im System Erde . . . . .	105
5.2	Lernmodul 3 . . . . .	109
5.2.1	Konventionelle Energieträger . . . . .	109
5.2.2	Regenerative Energieträger . . . . .	121
5.2.3	Zusammenschau der regenerativen Energieträger . . . . .	164
5.3	Aufgaben zu Lernmodul 3 . . . . .	175
<b>6</b>	<b>Erprobung der Lernmodule</b>	<b>177</b>
6.1	Allgemeines zur Erprobung . . . . .	177
6.2	Erprobung im Rahmen der Deutschen Schülerakademie . . . . .	178
6.2.1	Die Deutsche Schülerakademie . . . . .	178
6.2.2	Planung und Durchführung . . . . .	178
6.2.3	Ergebnisse der Umfrage . . . . .	183
6.3	Erprobung am Peter-Paul-Rubens-Gymnasium Siegen . . . . .	186
6.3.1	Allgemeines zu Erprobung am Peter-Paul-Rubens-Gymnasium . . . . .	186
6.3.2	Planung und Durchführung . . . . .	186
6.4	Reflexion der Erprobungen . . . . .	189
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Thesen</b>	<b>191</b>

<b>A</b>	<b>196</b>
A.1 Erstellung von Zufallspunkten mit exponentiellem Wachstum mit Hilfe von Geogebra . . . . .	196
A.2 Lösungen der Aufgaben . . . . .	198
 <b>Literaturverzeichnis</b>	 <b>213</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Die Energiewende als fachdidaktische Herausforderung

Seit Anbeginn der industriellen Revolution hat sich die Menschheit in ein fundamentales Problem hineinmanövriert, für das es zunehmend schwierig wird einen Ausweg zu finden. Wir sind energiehungrig und unsere Gier nach Energie wird im Wesentlichen durch zwei Antriebe bestimmt: die unaufhörlich wachsende Anzahl der Bewohner unseres Planeten und die damit verbundenen scheinbar grenzenlosen Wünsche der Menschen in Hinblick auf Konsum. Diese beiden mächtigen Antriebe werden auf absehbarer Zeit dazu führen, dass sich die Vorräte an fossilen Energieträgern erschöpfen; Öl schneller als Kohle. Gleichzeitig bewirkt die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid den anthropogenen Treibhauseffekt, so dass sich der Blick der Menschheit zunehmend weg von den fossilen hin zu CO<sub>2</sub>-freien Energieträgern richten muss. Eigentlich bleiben beim Verzicht auf jegliche fossile Energie nur zwei nennenswerte Energiequellen übrig: Kernenergie<sup>1</sup> und regenerative Energien.

Heutzutage findet man in den Medien, sei es im Fernsehen, in der Zeitung oder im Internet, eine Vielzahl von Berichten über die scheinbar unbegrenzt vorhandenen, nie erschöpflichen und sauberen regenerativen Energieträger. Insbesondere in jenen Ländern, welche die zweite der soeben genannten Energiealternativen –

---

<sup>1</sup>Nur mit Brütertechnologie oder dem in den Weltmeeren gelöstem Uran, da die Rohstoffvorräte an konventionell abbaubarem Uran auch eine begrenzte Reichweite besitzen.



Abbildung 1.1: Logo der Agentur für erneuerbare Energien auf der Homepage "unendlich-viel-energie.de", gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Quelle: [Age]).

nämlich die Kernenergie – zukünftig nicht ausbauen oder nutzen wollen, werden die Potenziale der regenerativen Energien ins Fantastische übertrieben.

Gerade während der Zeit nach dem Kernreaktorunglück in Fukushima Daiichi im März 2011 wuchs der Widerstand gegen die Kernkraft in der deutschen Politik und auch in der Bevölkerung (s. [Ham12]). Es folgten ein politisches Moratorium und Mitte des Jahres 2011 der Bundestagsbeschluss über die Stilllegung der Atommeiler in Deutschland bis zum Jahre 2022. Doch fossile Brennstoffe sind, wie bereits erwähnt, keine langfristige Alternative, auch weil dem anthropogen verursachten Klimawandel entgegengewirkt werden soll. Alle Fakten zusammen bedingen die Forderung nach einer CO<sub>2</sub>-neutralen Energieversorgung, was letztlich bedeutet, fast ausschließlich auf regenerative Energieversorgung zu setzen. Wie die Energiewende hin zu den regenerativen Energien von statten gehen soll, wird jedoch nicht aufgezeigt.

Wahr ist, dass Szenarien denkbar sind, bei denen die Menschheit auf einem vernünftigen Niveau mit regenerativen Energien wirtschaften kann, unwahr ist jedoch, dass uns regenerative Energien gewaltige Wachstums- und Konsummöglichkeiten hinsichtlich des „Verbrauchs“ eröffnen würden. Der Umbau unserer Gesellschaft in Richtung eines nachhaltigen Energieumsatzes bedeutet einen tiefgreifenden Wandel in fast allen Bereichen der Wirtschaft, des Handels und des zwischenmenschlichen Zusammenlebens. Nur wer das erkennt und wer insbesondere die Notwendigkeit dieses Wandels akzeptiert, ja sogar bereit ist, ihn aktiv mitzugestalten, wird in der Lage sein, die bevorstehenden Änderungen zu meistern. Kontraproduktiv und schädlich sind leider viele politische Äußerungen, die der Bevölkerung eine Problemlosigkeit des Umstiegs auf regenerative Energien suggerieren (vgl. Abb. 1.1).

Auch die meisten Medien sind weitgehend unkritisch, wenn es um erneuerbare Energieträger geht. Einige Autoren prophezeien eine glänzende Zukunft und

keinerlei Probleme bezüglich der Versorgung mittels regenerativer Energien. So wird suggeriert, regenerative Energien seien unendlich vorhanden, im Sinne von unendlich lange und unendlich viel. Nachteile dieser Energieträger oder Grenzen der „sauberen Energie“ werden selten bzw. gar nicht erörtert. Jegliche kritische Auseinandersetzung beschränkt sich im Wesentlichen auf ökonomische oder soziale Aspekte. Die naturwissenschaftliche Sicht, im Speziellen die physikalische bzw. geophysikalische Perspektive, fehlt gänzlich oder wird nicht befriedigend einbezogen. Diese Problematik der fehlenden naturwissenschaftlichen Betrachtung beschränkt sich jedoch nicht auf allgemein zugängliche Medien. Auch in der Schule und sogar in der Lehrerbildung spielt eine kritische Reflexion aus physikalischer Sicht kaum eine Rolle. Der Physikunterricht beschränkt sich lediglich auf technische Aspekte oder die Umwandlungsketten der Energie – wenn überhaupt. Daraus folgende Konsequenzen und Auswirkungen für die Erde bzw. die Menschen bleiben jedoch in der Schule meist unbehandelt.

Die hier vorliegende Arbeit ist daher auch ein Plädoyer zur Aufnahme von umweltphysikalischen Aspekten, speziell der physikalischen Betrachtung von regenerativen Energien, in die Physikausbildung an Schulen und Hochschulen. Die damit einhergehende fächerübergreifende Analyse unter Einbeziehung der Physik, der Astronomie, der Geographie und der Umweltwissenschaften soll in dieser Arbeit nachfolgend präsentiert werden. Diese Abhandlung soll keinesfalls eine Diffamierung oder Polemik gegen die Erneuerbaren sein. Sie hat vielmehr das Ziel durch typische fachdidaktische Methoden der Elementarisierung und Reduktion die Grenzen der regenerativen Energiebereitstellung aufzuzeigen. Die Hoffnung besteht darin, dass durch ein leicht nachvollziehbares Nachweisen und Aufzeigen diese Schranken persönliche Handlungsweisen überdacht und eventuell auch geändert werden. Die Energiewende kann nur gelingen, wenn sie von möglichst vielen Individuen durch die Bereitschaft zu extrem sparsamen Umgang mit Energie getragen wird, bis hin zum Verzicht auf liebgewordene Verhaltensmuster, etwa die jährliche Flugreise in den Süden. Es geht also um eine idealtypische Aufgabenstellung der wissenschaftlichen „Aufklärung“ der Bevölkerung, vor allem der zukünftigen Generationen, welche die Folgen von Energieknappheit und Klimawandel spüren werden. Die fachdidaktische Aufgabenstellung im engeren Sinn ist die Vermittlung der physikalischen Verständnisgrundlagen für nachhaltiges Denken und Handeln in Hinblick auf den Energiebegriff.

Die Notwendigkeit zur Nutzung von regenerativen Energien wird meist durch den anthropogenen Treibhauseffekt begründet. Nachfolgend wird die Betrachtung die-

## **1.2 Überblick über die zentralen Fragestellungen und Forschungsmethoden 4**

ses Treibhauseffektes nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Gründe hierfür sind vor allem fachdidaktischer Natur. Viele Vorhersagen zur globalen Erwärmung und zum Klimawandel resultieren aus aufwendigen Computersimulationen, die für Laien, Lernende und zumeist auch für die meisten der sogenannten Experten nicht nachvollziehbar sind. Dementsprechend gering ist die Veranlassung das persönliche Handeln zu ändern. Deutlich leichter zu durchschauen sind hingegen Abschätzungen zu den Reichweiten der Vorräte verschiedener Energierohstoffe. Das Interessante: die aus einfachen Abschätzungen folgernden Zeiträume bis zur Erschöpfung vieler Energierohstoffe sind fast identisch mit den Zeitskalen, die die Klimatologen für eine Umkehr im menschlichen Handeln wegen des Treibhauseffektes vorschlagen. Faktisch ist es deshalb genauso zwingend notwendig zu den regenerativen überzugehen, weil fossile Rohstoffe zur Neige gehen, wie es notwendig ist, weil der anthropogene Treibhauseffekt das Klima kippen lässt.

## **1.2 Überblick über die zentralen Fragestellungen und Forschungsmethoden**

Mit dieser Arbeit wird nicht angestrebt einen in sich geschlossenen Umweltphysikkurs zu entwickeln. Es sollen vielmehr Zugangsmöglichkeiten für Schulen und Hochschulen aufgezeigt werden. Der Lehrende hat also die Möglichkeit einen Kurs selbst zu gestalten und an die Gegebenheiten anzupassen (wie etwa das Niveau und die Gruppenstärke). Dies soll anhand von ausgewählten und selbstentwickelten Beispielen und Elementarisierungen, sowie durch gezielte fachdidaktische Aufbereitung verschiedener wissenschaftlicher Forschungsergebnisse anderer Autoren aus der Grundlagenforschung erreicht werden. Dabei wird innerhalb des Kurses versucht, sich auf wenige entscheidende Größen, wie etwa den Flächenbedarf oder die Betrachtung mittlerer Strahlungseinträge, zu beschränken.

Unmittelbar aus den beschriebenen Punkten und der geschilderten Zielsetzung ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

### **Welche realistischen und unrealistischen Vorstellungen zur Energiewende haben Lernende?**

Vorstellungen werden hauptsächlich durch das soziale und mediale Umfeld geprägt. Welche Prä- und Misskonzepte zur Energiewende bei Schülern und Stu-

## 1.2 Überblick über die zentralen Fragestellungen und Forschungsmethoden 5

denten<sup>2</sup> vorhanden sind, soll anhand von durchgeführten Schüler- und Studentenerbefragungen untersucht werden. Hierzu wurden Fragebögen für eine qualitative Analyse von vorherrschenden Fehlvorstellungen erstellt.

### **Welche Möglichkeiten gibt es aus Sicht der Schulbücher und Kernlehrpläne die Energiewende im Rahmen des Physikunterrichts zu behandeln?**

Der Unterricht in Schulen ist gekoppelt an die Kernlehrpläne des jeweiligen Bundeslandes. Daher ist es notwendig zu untersuchen, ob und inwiefern umweltphysikalische Themen dort vorgesehen sind. Da die in der Schule verwendeten Lehrmaterialien curricular angepasst sind, werden einige gebräuchliche Schulbücher der Oberstufe im Rahmen einer qualitativen Buchanalyse auf die zu diskutierenden Inhalte hin untersucht.

### **Welche elementaren Ansätze sind besonders geeignet, um die Zusammenhänge zwischen „Energiekonsum“ und Energiebereitstellung und die Auswirkungen auf die Umwelt zu verdeutlichen?**

Die Umweltphysik ist unverzichtbar, wenn es darum geht, Energie- bzw. Leistungspotenziale regenerativer Energieträger zu ermitteln.

Um diese abschätzen oder Folgen bei zu großem Eingreifen in die Geo- und Ökosysteme ausmachen zu können, ist es notwendig Zusammenhänge innerhalb des Planeten Erde und seiner näheren kosmischen Umgebung zu verstehen. Dabei ist darauf zu achten, schülergerechte Modelle zu entwickeln und Elementarisierungen vorzunehmen, um die ausgewählten Inhalte aufzuarbeiten. In der jetzigen Schulliteratur lassen sich solche wohl nur in Ansätzen vorfinden.

### **Wie kann verdeutlicht werden, dass das bisherige Wachstum im Leistungsumsatz der Menschheit nicht durch Einsatz regenerativer Energien oder durch Nutzung von Kernkraft aufrechterhalten werden kann?**

Gerade in der heutigen Wachstumsgesellschaft ist scheinbar alles, seien es Firmen, Finanzstrukturen o. ä., auf Wachstum ausgerichtet. Jedoch führt wirtschaftliches

---

<sup>2</sup>Zur besseren Lesbarkeit werden in dieser Arbeit nur die männlichen Formen verwendet, die weiblichen sind selbstverständlich mit eingeschlossen.

Wachstum zu einem Anstieg des Primärenergiebedarfs, weshalb unweigerlich der Leistungsumsatz der Menschheit wächst. Ein jährlich konstanter prozentualer Anstieg lässt sich gut durch eine exponentielle Funktion nähern, von welcher bekannt ist, dass sie schon nach kurzer Zeit jegliche Grenze überschreitet. Menschen haben kein intuitives Gefühl für einen solchen exponentiellen Anstieg, daher ist es notwendig entsprechende Beispiele zu finden und Modelle zu entwerfen, um die zeitliche Nähe bis zum Erreichen planetarer Schranken aufzuzeigen.

### **Welche Handlungsmöglichkeiten bieten sich für Menschen in der jetzigen Gesellschaft?**

Den Lernenden soll verdeutlicht werden, dass das momentane wirtschaftliche Verhalten und persönliche Konsumverhalten der Menschheit im Sinne der Nachhaltigkeit dauerhaft im Einklang mit den natürlichen gegebenen Gleichgewichtsbedingungen stehen muss. In dieser Arbeit wird dieser Aspekt vorwiegend durch die Betrachtung unumstößlicher Naturgesetze erläutert, beispielsweise durch Überlegungen zu energetischen Gleichgewichtsbedingungen, zum ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und zu den naturgesetzlichen Grundlagen der Strahlungsphysik.

## **1.3 Legitimation aus Sicht der Schule - Zum Stand der Kernlehrpläne**

Der Kernlehrplan für Gymnasien des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen ist ein kompetenzorientierter Lehrplan, in dem Kompetenzerwartungen für die zugehörigen Erwartungsbilder zu den sogenannten Basiskonzepten „Wechselwirkung“, „Energie“, „Struktur der Materie“ und „System“ (in der Sekundarstufe 1) beschrieben werden.

Die Basiskonzepte sollen Inhalte im Fach Physik strukturieren und weiter ausdifferenzieren. „Sie beinhalten zentrale, aufeinander bezogene Begriffe, Modellvorstellungen und Prozesse sowie damit verknüpfte Handlungsmöglichkeiten“ (s. [Min13]). Dadurch soll die Vernetzung von Wissen in verschiedenen Inhaltsfeldern besonders gefördert werden. Untersucht man den Kernlehrplan im Hinblick auf umweltphysikalische Aspekte, so wird im Basiskonzept „Energie“ beschrieben, dass „... ihre extensive Verwendung auch nachteilige Folgen für unseren Le-

bensraum [hat], wenn man etwa die globale Erwärmung betrachtet oder die begrenzten Ressourcen und das Problem der Umwandlungsprodukte in den Blick nimmt. Bedeutung und Auswirkungen der Energienutzung spielen in ökonomischen, gesellschaftlichen und damit auch in politischen Zusammenhängen eine besondere Rolle. Daher ist das konzeptuelle Verständnis von Energie wesentlicher Bestandteil naturwissenschaftlicher Grundbildung“ (s. [Min08] , S. 20).

In den Kompetenzen zum Basiskonzept Energie tauchen ebenfalls wichtige Aspekte auf:

Die Schülerinnen und Schüler

- „beschreiben, dass die Energie, die wir nutzen, aus erschöpfbaren oder regenerativen Quellen gewonnen werden kann,
- verschiedene Möglichkeiten der Energiegewinnung, -aufbereitung und -nutzung unter physikalisch-technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten vergleichen und bewerten sowie deren gesellschaftliche Relevanz und Akzeptanz diskutieren.“

Übergeordnete Fragestellungen, wie etwa nach der Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Umweltschutz tauchen ebenso in den beschriebenen Kompetenzen auf. Sie sollen nach Möglichkeit unter Zusammenarbeit der Fachkonferenzen, also nicht isoliert, nicht monoperspektivisch, betrachtet werden. Allerdings fällt direkt auf: implizit werden im obigen Abschnitt regenerative Energien mit unerschöpflichen Energiequellen gleichgesetzt. Allein diese Aussage schürt Fehlvorstellungen, nicht nur bei Schülerinnen und Schülern, sondern genauso bei Lehrpersonen.

Ein weiterer Bestandteil des Kernlehrplans sind die fachlichen Kompetenzen. Diese gliedern sich in die sogenannten Kompetenzbereiche, welche die Grunddimensionen des fachlichen Handelns repräsentieren, und die Inhaltsfelder auf, welche die zu unterrichtenden Gegenstände mit ihren jeweiligen inhaltlichen Schwerpunkten systematisieren. Diese beiden Felder werden in den Kompetenzerwartungen zusammengeführt bzw. verknüpft und beschreiben die fachlichen Anforderungen und angestrebten Lernergebnisse. Auch hier tauchen Gegenstände der Umweltphysik in allen drei beschriebenen Stufen auf. So heißt es im Kompetenzbereich „Bewertung [. . .] physikalischer Sachverhalte in verschiedenen Kontexten erkennen, beurteilen und bewerten“:

Die Schülerinnen und Schüler

- „nutzen physikalisches Wissen zum Bewerten von Chancen und Risiken bei ausgewählten Beispielen moderner Technologien,

- beschreiben und beurteilen an ausgewählten Beispielen die Auswirkungen menschlicher Eingriffe in die Umwelt“ (s. [Min08], S. 36) .

Die Betrachtung von umweltphysikalischen Aspekten, speziell die Physik zum Thema regenerative Energien, wird durch den Lehrplan also nahegelegt. Die oben genannten Formulierungen sind allerdings sehr offen gehaltenen, es bleibt dem jeweiligen Lehrer überlassen, wie diese Bereiche abgedeckt werden. Allerdings tun sich Spielräume zur Gestaltung eines umweltphysikalischen Kurses auf. Betrachtet man weiterhin die Inhaltsfelder im Lehrplan, so werden für die Klasse 7 bis 9 folgende Kontexte genannt:

- „Obligatorisch: Energie, Leistung, Wirkungsgrad
  - Energie und Leistung in Mechanik, Elektrik und Wärmelehre
  - Aufbau und Funktionsweise eines Kraftwerkes
  - regenerative Energieanlagen
  - Energieumwandlungsprozesse, Elektromotor und Generator , Wirkungsgrad
  - Erhaltung und Umwandlung von Energie
- Wahlbereich: Effiziente Energienutzung: eine wichtige Zukunftsaufgabe der Physik
  - Strom für zu Hause
  - Das Blockheizkraftwerk
  - Energiesparhaus
  - Verkehrssysteme und Energieeinsatz“

Es lässt sich deutlich erkennen, dass der Schwerpunkt auf die Technik gelegt wird (Kraftwerk, Energieanlagen, Elektromotor und Generator, Blockheizkraftwerk, Energiesparhaus. . .). Durch die Offenheit der Formulierungen der Kompetenzen, die Tendenz der Inhaltsfelder in Richtung Technik und auch die vielen frei verfügbaren Materialien zu diesem Bereich werden verständlicherweise häufig die Unterrichtsinhalte in die technische Richtung gelenkt<sup>3</sup>. Solche Aspekte sind natürlich nicht zu vernachlässigen. Allgemeine physikalische Gesichtspunkte – wie etwa die Fragen wo die regenerativen Energien herkommen, wie viel

---

<sup>3</sup>Näheres hierzu im Kapitel 2.4

Energie sich überhaupt nutzen lässt oder was der physikalische Leistungsbegriff mit der Energieversorgung zu tun hat – kommen hierbei zu kurz. Gerade aus solchen allgemeineren physikalischen Überlegungen heraus resultiert aber das zentrale Orientierungswissen, das benötigt wird, um langfristige Konsequenzen der Energiewende realistisch einschätzen zu können.

Des Weiteren stellt sich die Frage warum ein Kurs zur Umweltphysik durchgeführt werden sollte, trotz der im Lehrplan vorhandenen Anhaltspunkte und der enormen medialen Präsenz des Themas. Die Antwort darauf ist, dass sehr viele Schüler sowie Studenten Fehlvorstellungen bezüglich regenerativer Energien entwickelt haben und ihnen darüber hinaus die zentralen Begriffe, wie z.B. der Strahlungsantrieb, nicht hinreichend bekannt sind. Dies muss bei der Beurteilung der Nützlichkeit und der Potenziale von Alternativenergien hinderlich sein. Hierzu werden im nachfolgend mehrere Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, ausführlicher vorgestellt.

## **1.4 Zielgruppe und Anforderungsniveaus**

Mit dieser Arbeit sollen in erster Linie Lehrer angesprochen werden, welche umweltphysikalische Themen unterrichten. Die Anforderungsniveaus in den Bereichen Physik und Mathematik sind so gewählt, dass Schüler in der Qualifikationsphase der Oberstufe über voraussetzende Kompetenzen und das angemessene Vorwissen verfügen. Jedoch sollten auch Oberstufenschüler der Einführungsphase in der Lage sein, die meisten der Überlegungen nachzuvollziehen. Einige Inhalte der Lernmodule können auch gewinnbringend in die Sekundarstufe 1 eingebracht werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit richten sich allerdings nicht ausschließlich an Gymnasialschüler, sondern vielmehr an alle mündigen Bürger, die im besten Sinne der Aufklärung in die Lage versetzt werden sollen, vernunftgemäß Einfluss auf die Entwicklung unserer Gesellschaft zu nehmen und die infrage stehenden Zusammenhänge kritisch zu analysieren.

Als Vorkenntnisse werden Grundlagen der Mechanik, Thermodynamik, sowie der Astronomie vorausgesetzt, welche im Rahmen der Oberstufe behandelt werden. An einigen Stellen ist es erforderlich auf zusätzliches Wissen zurückzugreifen. Dieses wird in den jeweiligen Lernmodulen gesondert vermittelt.

## 1.5 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich insgesamt in fünf Teile.

In Kapitel 2 wird die gegenwärtige Energiediskussion im Kontext Schule dargestellt. Dabei wird zunächst die Auseinandersetzung mit diesem Gegenstand weiter bzw. tiefergehend legitimiert, indem mehrere Umfragen zu regenerativen Energien und den dazu vorhandenen Fehlvorstellungen präsentiert werden. Zusätzlich werden Schulbücher in Hinblick auf diese Thematik untersucht, inwiefern diese vorkommt bzw. ob sie zufriedenstellend behandelt wird. Es wird in diesem Kapitel ebenfalls exemplarisch beschrieben, welche Initiativen und Projekte zum Thema „Umweltschutz“ heutzutage existieren.

Den Hauptteil der Arbeit machen die drei Lernmodule (Kapitel 3, 4 und 5) aus. Diese untergliedern sich in fachliche bzw. fachdidaktische Vorüberlegungen, gefolgt von den eigentlichen Lernmodulen. Diese Module sollen dazu dienen, die Inhalte so aufzubereiten, dass sie direkt genutzt werden können.

Bevor die eigentliche Diskussion um regenerative Energieträger bzw. deren Grenzen beginnen kann, muss der zentrale Begriff des Wachstums näher erläutert werden. Grenzen in der Energieversorgung würden ohne Wachstum eine geringere Rolle spielen, da entsprechende Limits unter Umständen nicht erreicht werden würden. Da sich unsere Gesellschaft allerdings über das Wachstum definiert (siehe bspw. das Bruttosozialprodukt), ist es von Nöten sich zuerst mit den verschiedenen Arten von Wachstum zu beschäftigen. Es werden in Kapitel 3 ebenfalls der Anstieg im Energiebedarf bzw. im Leistungsumsatz der Menschheit diskutiert. Daraus folgen unmittelbar globale Problematiken in der energetischen Versorgung, der Größe des Lebensraumverbrauchs und für die Natur insgesamt.

In Kapitel 4 soll der zentrale Begriff des Strahlungsantriebs behandelt werden. Um Veränderungen in der Energiebilanz der Erde und damit Auswirkungen auf das Klima zu bestimmen, muss untersucht werden, welche Einflüsse externe Faktoren, wie etwa eine Änderung der Leuchtkraft der Sonne, oder aber auch Änderungen der Absorptionsfähigkeit von Strahlungsenergie haben würden. Dieser Zusammenhang zwischen der Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts und der damit einhergehenden Temperaturänderung wird in diesem Lernmodul näher betrachtet.

In der aktuellen Klimadiskussion werden die konventionellen Energieträger in Frage gestellt und die erneuerbaren Energien hervorgehoben. Daher soll in Kapitel 5 eine ausführliche Betrachtung von Energie- und Stoffströmen, sowie von

Energiereservoirs stattfinden. Es werden dabei zusammen mit den Ergebnissen der vorherigen Lernmodule Wachstumshorizonte des Leistungsumsatzes verdeutlicht, welche durch thermodynamische Gesetzmäßigkeiten des Planeten Erde vorgegeben sind. Als einer der zentralen Gesichtspunkte soll in diesem Abschnitt der Flächenbedarf erörtert werden, der zu befriedigen wäre, würde man Anlagen zu einer regenerativen Energiebereitstellung in großem Umfang ausbauen.

In Kapitel 6 werden die Erprobungen der in dieser Abhandlung erläuterten Schwerpunktinhalte dargestellt. Die Durchführung der Kurse fand im Rahmen der Deutschen Schülerakademie und eines fächerverbindenden Projekts an einem Gymnasium in Siegen statt. Die Resultate und Erkenntnisgewinne gingen in die abschließende Formulierung der Modultexte ein.

# Kapitel 2

## Die gegenwärtige Situation der Energiedebatte im Kontext Schule

In diesem Kapitel soll zunächst die Energiedebatte und der Umgang mit dieser Thematik unter allgemeinen didaktischen Gesichtspunkten betrachtet werden. Hier werden die in Kapitel 1 genannten wesentlichen Punkte nicht nochmal aufgegriffen, vielmehr soll der Fokus auf der gegenwärtigen Situation in der Schule liegen. Nachdem das allgemeine Konzept „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ und dessen Umsetzung im Bereich Schule vorgestellt wurde, wird diskutiert, warum eine Thematisierung der Energiewende in der Schule notwendig ist.

### 2.1 Bildung für nachhaltige Entwicklung

Das Weltaktionsprogramm „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BNE) wurde im Jahr 2005 von der UNESCO ins Leben gerufen. Dieses Konzept soll es jedem einzelnen Menschen ermöglichen, die Auswirkungen des eigenen Handelns auf die Welt zu verstehen und verantwortungsvolle Entscheidungen zu treffen. Gemeint ist also eine Bildung, die Menschen zu zukunftsfähigem Denken und Handeln befähigt (vgl. [Deub]).

Ursprünglich stammt der Begriff Nachhaltigkeit, welcher ein zentrales Leitbild des 21. Jahrhunderts werden muss, aus der Forstwirtschaft. So schrieb Hans-Karl von Carlowitz 1713 in seinem Buch über die Ökonomie der Waldkultur „*Silvicultura oeconomica*“ (s. [Car13]):

„Schlage nur so viel Holz, wie der Wald verkraften kann! So viel Holz, wie nachwachsen kann!“

Nachhaltigkeit ist in diesem Zusammenhang also im Wortsinn von „nachhaltend“ gemeint. Wer nachhaltig Forstwirtschaft betreibt, kann dem Wald immer wieder Holz entnehmen, ohne den Fortbestand der Pflanzenkultur in Frage zu stellen. Genau darum geht es auch in anderen Bereichen der Gesellschaft – in moderner Interpretation – nutze eine Ressource nur so intensiv, dass deren Regenerierung immer möglich ist. Gerade für Staaten mit hohem Konsum, umfangreicher Ressourcennutzung, Energiebedarf und Verkehr (was sich ohne Frage gegenseitig bedingt) muss der Gedanke der Nachhaltigkeit umfassend Raum greifen. So heißt es im Brundtland-Bericht mit dem Titel „Our Common Future“ von 1987:

„Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die die Lebensqualität der gegenwärtigen Generation sichert und gleichzeitig zukünftigen Generationen die Wahlmöglichkeit zur Gestaltung ihres Lebens erhält.“ (Übersetzung aus dem Brundtland-Bericht 1987, S. 51, s. [Deuc])

Die nachhaltige Entwicklung zielt also darauf ab, dass Weiterentwicklung und Wachstum stattfinden können, aber deutlich werden muss, wo die Grenzen liegen. Diese sind im globalen Maßstab gerade da zu sehen, wo der Übergang von regenerierungsfähigen Bio- und Geosystemen hin zur irreparablen Übernutzung dieser Systeme stattfindet. Die durch andere Menschen und Staaten gesetzten Rahmenbedingungen der Wirtschaft müssen identisch mit diesen natürlichen Grenzen der Nutzung sein.

Die Bildung für nachhaltige Entwicklung lässt sich als allgemeines Prinzip auf verschiedene Bereiche anwenden. Im Speziellen soll dieses Konzept in der Schule verankert werden. So heißt ein zentrales Ziel in den Empfehlungen der Kultusministerkonferenz (KMK) von 2007 zur „BNE in der Schule“ (s. [Kul]):

„Schüler zur aktiven Gestaltung einer ökologisch verträglichen, wirtschaftlich leistungsfähigen und sozial gerechten Umwelt unter Berücksichtigung globaler Aspekte, demokratischer Grundprinzipien und kultureller Vielfalt zu befähigen.“

Diese Zielformulierung hört sich natürlich sehr gut an, ihre konkrete Umsetzung stößt aber – nicht zuletzt wegen des allumfassenden Gesamtanspruches – auf vielfältige Schwierigkeiten. Wie eine ökologisch verträgliche, wirtschaftlich leistungsfähige und sozial gerechte Umwelt überhaupt auszusehen hat, ist ja noch nicht einmal in der gegenwärtigen Grundlagenforschung bekannt. Und der Konsens, ein solches Ziel anzustreben, bedeutet keinesfalls schon zu wissen, wie der Weg zur Erlangung der Zielvorstellungen verlaufen muss.

Anders herum gesagt, sollen Schüler in der Lage sein, nicht-nachhaltige Entwicklung zu erkennen und bewerten zu können und ihr Wissen über nachhaltige Entwicklung anzuwenden. Um dieses besagte Konzept in der Schule umzusetzen, gab es einige Ansätze: So wurden durch das Programm „Transfer 21“ der Bundesländer-Kommission Orientierungshilfen für BNE in der Sekundarstufe 1 gegeben, es gibt Unterrichtsmaterialien zu nachhaltigkeitsrelevanten Themen, wie etwa Energie oder Klimaschutz, außerschulische Bildungseinrichtungen im Bereich Umweltbildung wurden zertifiziert, Rahmenvorgaben für Lehrpläne entwickelt – um nur einige Initiativen zu nennen (s. [Tra]).

Obleich der Begriff der Bildung für nachhaltige Entwicklung schwammig erscheint, werden von der Kultusministerkonferenz Kriterien für die Auswahl von Themen der Nachhaltigkeit im Unterricht genannt (s. [Kul]). Laut Vorgaben der KMK gehören zu diesen thematischen Auswahlkriterien:

- langfristige Bedeutung,
- auf breitem und differenzierten Erkenntnissen in Wissenschaft, Forschung und Politik zum spezifischen Thema basieren,
- lebensweltlichen Bezug für Schüler und Ermöglichung einer globalen Welt-sicht,
- Relevanz für die Bildungsziele der Lernenden,
- Verbindung mit den im Unterricht zu erwerbenden Fachkompetenzen,
- aussichtsreiche Handlungsmöglichkeiten für den Einzelnen und/ oder die Gemeinschaft.

Überprüft man die Diskussion zur Energiewende mit diesen Kriterien, so lässt sich feststellen, dass diese Thematik sämtliche Merkmale erfüllt. Durch die Frage nach der Energiebereitstellung heute und in der Zukunft wird die **langfristige Bedeutung** erfüllt, speziell wenn der Ressourcenverknappung konventioneller

Energieträger und der Überbevölkerung ein zunehmend dominierendes Gewicht zukommen wird. Da die Energiewende nicht nur ein rein physikalisches oder rein ökonomisches Problem darstellt, müssen Erkenntnisse aus verschiedenen wissenschaftlichen Gebieten herangezogen werden, um ihre Ursachen und Konsequenzen zu verstehen, Kriterium 2 wird also ebenfalls erfüllt. Durch die fast tägliche Auseinandersetzung mit dieser Thematik in den Medien oder auch im alltäglichen Umfeld (Windräder auf Feldern, Solaranlagen auf Dächern, ...) lässt sich der **lebensweltliche Bezug** für Schüler herstellen. Führt man eine Unterrichtsreihe zur regenerativen Energie durch, so lassen sich genauso gut **Fachkompetenzen erwerben**, wie in einem reinen fachsystematischen Unterricht. Hier seien beispielsweise die experimentelle Bestimmung der Solarkonstante oder Abschätzungen zum Potenzial eines Wasserkraftwerks genannt (s. Kapitel 5). **Handlungsmöglichkeiten** werden durch eine kritische Auseinandersetzung mit der Energiewende ebenfalls aufgezeigt: auch wenn eine Einzelperson wenig Einfluss auf die globale Entwicklung hat, ist es umso wichtiger, die Erkenntnisse und Folgerungen für das eigene Handeln möglichst vielen Personen zugänglich zu machen, gerade um ein Umdenken in der Gesellschaft bzgl. Konsum und Energiebedarf zu bewirken. Die Relevanz der Bildungsziele wird in Kapitel 2.2 näher erläutert.

## 2.2 Warum ist eine Beschäftigung in der Schule sinnvoll?

Neben den Argumenten der Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule lässt sich die Beschäftigung mit dem Thema „Umwelt“ am Bildungs- und Erziehungsauftrag der Schule festmachen. So heißt es im Schulgesetz des Landes NRW:

„(...) [Die Schule] fördert die Entfaltung der Person, die Selbstständigkeit ihrer Entscheidungen und Handlungen und das Verantwortungsbewusstsein für das Gemeinwohl, die Natur und die Umwelt. Schülerinnen und Schüler werden befähigt, verantwortlich am sozialen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, beruflichen, kulturellen und politischen Leben teilzunehmen und ihr eigenes Leben zu gestalten.“  
(s. [Sch05])

Speziell im „Verantwortungsbewusstsein für das Gemeinwohl, Natur und Umwelt“ kann man den Nachhaltigkeitsgedanken im Sinne der BNE wiederfinden. Verfolgt man diesen Gedanken weiter, so lassen sich Schlussfolgerungen mit Relevanz für die Umwelt im Unterricht ziehen. Bereits 1980 hat die Kultusministerkonferenz das Konzept „Umwelt und Unterricht“ entwickelt, in dem Hinweise für die Umwelterziehung in der Schule dargelegt wurden (vgl. [Kul80]): Bei Schülern muss ein Bewusstsein für Umweltfragen geschaffen werden, sie müssen zu umweltbewusstem Verhalten erzogen werden, das nach Möglichkeit über die Schule hinaus wirksam bleibt. Und genau hier setzt der Bildungs- und Erziehungsauftrag der Schule an, Schule hat ihren Beitrag zur Lösung dieser Problematik zu leisten. Besonders sollte dabei ein Verantwortungsbewusstsein für die Folgen durch Eingriffe in die Ökosysteme klar gemacht werden, dies meint auch, dass Schüler lernen sollten, sich nicht allein am kurzfristigen Wohl der Menschen im Heute zu orientieren, sondern vielmehr Verantwortung für kommende Generationen zu übernehmen. Nur wenn ein gewisses Umweltbewusstsein entwickelt wurde, kann daraus Bereitschaft entstehen, Ressourcen und Naturgüter verantwortungsvoll zu nutzen. Dem Schüler muss klar werden, dass „zum Schutz der Lebensgrundlagen der Anspruch des Einzelnen sich individuell zu entfalten, mit dem Anspruch der allgemeinen Wohlfahrt in Einklang gebracht werden muss“ (s. [Kul80]<sup>1</sup>).

Des Weiteren werden für die Schule, um oben genannte Ziele zu erreichen, Feinziele erstellt:

- Die Schüler sollen zu einer gezielten Beobachtung und Untersuchung ihrer Umwelt geleitet werden,
- sie sollen einen Einblick in die ökologischen Zusammenhänge erhalten und die Auswirkung von Störungen kennenlernen,
- sie sollen Ursachen von Belastungen der Umwelt und den damit einhergehenden, teilweise irreversiblen, Veränderungen kennenlernen,
- die Erhaltung der Umwelt, insbesondere die Vielgestaltigkeit von Lebewesen und Landschaft, ist nicht nur zur Sicherung der Lebensgrundlagen für die heutige, sondern auch für zukünftige Generationen erforderlich,
- Umweltbelastungen sind ein internationales Problem und eine Existenzfrage für die gesamte Menschheit, also soll erkannt werden, dass es eine internationale Aufgabe darstellt, diese zu minimieren,

---

<sup>1</sup>Zitate wurden an die neue Rechtschreibung angepasst

- um den Menschen eine intakte Umwelt zu sichern, ist ein verantwortungsbewusstes Handeln jedes einzelnen und der Gesellschaft notwendig,
- ökonomische und ökologische Gesichtspunkte bedürfen einer sorgfältigen Abwägung, da es sich um eine Auseinandersetzung mit verschiedenen Interessensgegensätzen handelt.

Da die Umwelterziehung sowohl den gesellschaftlichen als auch den naturwissenschaftlichen Bereich durchdringt, schlägt die KMK vor, die genannten Ziele an verschiedenen Inhalten in mehreren Fächern oder in fächerübergreifenden Unterrichtsveranstaltungen zu verwirklichen (s. hierzu Kapitel 2.2.2).

### 2.2.1 Allgemeinbildung als Auftrag von Schule

Neben den Zielen der Umwelterziehung ist die Allgemeinbildung der Lernenden eine zentrale Aufgabe der Schulen. Die Schule soll günstige Rahmenbedingungen des „Sich-Bildens“ schaffen. Dass die Thematik der Energiewende auch diesen Bereich von Schule tangiert, soll anhand der Kriterien allgemeinbildender Schulen nach H.-W. Heymann kurz dargelegt werden (vgl. [Hey97]):

#### **Lebensvorbereitung:**

Hier sollen lebensnützliche Qualifikationen (bzw. Schlüsselqualifikationen) erworben werden, wie etwa grundlegendes Wissen über wirtschaftliche, ökologische und politische Zusammenhänge; die Fähigkeit zur selbstständigen Informationsbeschaffung oder die Fähigkeit zur Artikulation des eigenen Standpunkts.

#### **Weltorientierung:**

Schule soll den Schülern helfen, einen Überblick über die erkennbare Welt zu gewinnen. Die Auseinandersetzung mit „epochaltypischen Schlüsselproblemen“, zu denen die Energiewende ohne Zweifel gehört, soll gefördert werden.

#### **Anleitung zum kritischen Vernunftgebrauch:**

Schüler sollen lernen, kritisch zu hinterfragen und sich ein Urteil mittels eigener Vernunft zu bilden. Eine Emanzipation von Bevormundung soll unterstützt werden.

### Entfaltung von Verantwortungsbereitschaft:

Die Schüler sollen Verantwortung als universelles ethisches Prinzip kennenlernen. Ziel soll sein, ein gesellschaftliches Miteinander zu bewirken, in dem nicht das Individuum im Vordergrund steht.

Man kann deutlich erkennen, dass viele der genannten Aufgaben schon an anderer Stelle bezeichnet werden. Dies ist aber nicht überraschend, da sich elaborierte Konzepte natürlich an allgemeinen Aufgaben von Schule orientieren und diese spezialisieren.

### 2.2.2 Fächerübergreifender Unterricht als eine Möglichkeit zur Gestaltung

In der Diskussion der Energiewende handelt es sich, wie bereits erwähnt, um eine sehr breit gefächerte Problematik. Hier greifen prinzipiell mehrere wissenschaftliche Disziplinen ineinander. Die angemessene Repräsentationsform im Unterrichtsgeschehen ist deshalb der fächerübergreifende Unterricht. Betrachtet man die verschiedenen „Zuständigkeiten“ der Schulfächer, so fällt auf, dass prinzipiell (fast) alle Fächer einbezogen werden können, wenn es um die Nutzung von regenerativen Energien geht. Die Eignung eines Standorts für ein Wasserkraftwerk kann im Geographieunterricht verortet werden; die Akkumulationszeit einer Windkraftanlage spiegelt ökonomische Aspekte wieder und spielt somit in den Sozialwissenschaften eine Rolle; sollen für den Bau eines Stausees Menschen umgesiedelt werden, so kann dies unter moralischen Gesichtspunkten im Philosophieunterricht behandelt werden usw. Diese Überlegungen legen nahe das Konzept des fächerübergreifenden oder fächerverbindenden Unterrichts bei der Behandlung der regenerativen Energien heranzuziehen.

„Fächerverbindender Unterricht meint ein mittleres Prinzip zur Organisation von Unterricht in der Schule, das – systematisch gesprochen – zwischen den durchgehend gefächerten und einen völlig ungefächerten Unterricht geschoben wird. Fächerverbindender Unterricht hebt den Fachunterricht zeitweise in der Art auf, dass er dessen Vorteile zu bewahren, dessen Nachteile zu überwinden trachtet. Er ist als **themenzentrierter integrativer Unterricht** angelegt, an dem mehrere Fächer gleichwertig beteiligt sind.“ (s. [Pet00])

Eine ähnliche Definition kann auch für den fächerübergreifenden Unterricht gefunden werden, mit dem Unterschied, dass im Vergleich zum fächerverbindenden

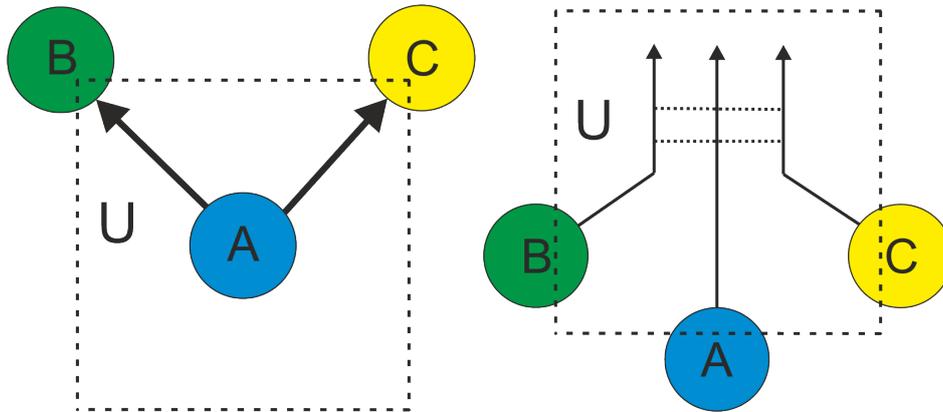


Abbildung 2.1: **Beim fächerübergreifendem Unterricht (U) (links) unterrichten mehrere Lehrer in ihrem eigenen Fach an einem gemeinsamen Thema, beim fächerverbindenden Unterricht unterrichten mehrere Lehrer gleichzeitig bzw. zusammen (eigene Darstellung, nach [Hub09]).**

Konzept, in dem mehrere Lehrpersonen gleichzeitig bzw. zusammen unterrichten, die Lehrer jeweils in ihrem Fach dieselbe Thematik mit ihren fachspezifischen Methoden behandeln (s. Abb. 2.1).

Eine Behandlung von Inhalten in Form eines fächerübergreifenden Unterrichtskonzepts macht in unserer heutigen Welt zunehmend Sinn. Durch gesellschaftliche Veränderungen, etwa die Globalisierung, wird die Lebenswelt immer komplexer. Dies bedingt „neue“ Bildungsanforderungen, wie beispielsweise den Umgang mit eben solchen komplexen Problemen. Auch die Wissenschaft und die Forschung haben sich verändert. Dies wird besonders deutlich, wenn man die verschiedenen Schulfächer und die zunehmende Spezialisierung der Teildisziplinen betrachtet (Astronomie, Astrophysik, Optik, Mechanik usw. als Teildisziplinen der Physik). Die moderne Wissenschaft ist häufig interdisziplinär (hier sei als Beispiel die Biogeophysik genannt). Dies kommt im normalen Fachunterricht kaum zum Tragen, da Verknüpfungen zu anderen Fächern nicht ersichtlich werden. So spiegeln die Schulfächer (teilweise zumindest) nicht mehr das wissenschaftliche Bezugsfach wieder. Komplexe Probleme werden häufig auf die Sichtweise eines Schulfaches reduziert.

Auch aus Sicht der Lehr-Lernforschung sollte eine zunehmende Tendenz von fächerübergreifenden Inhalten wünschenswert sein. Schülerinnen und Schüler verfügen häufig über ein ordentliches Sachwissen, das Anwenden des entsprechenden Wissens in konkreten Situationen fällt ihnen allerdings schwer, da das (träge)

Wissen an den jeweiligen Kontext des Erlernens gebunden ist (vgl. [Raf]). Ebenso kann man motivational begründen: Das Interesse am Lerngegenstand fördert das Lernen und die Leistungen. Folglich sollte sich Unterricht stärker an Problemen des Alltags orientieren, als an der Fachsystematik selbst (dies soll nicht heißen, dass reiner Fachunterricht nicht alltagsnah sein kann).

Für den Unterricht lassen sich so pädagogische Ansätze für ein fächerübergreifendes Vorgehen finden (vgl. [Raf]):

- **Ganzheitliches Lernen:**  
Der Fachunterricht spiegelt nur einen Ausschnitt der Realität wieder. So kann der Blick der Lernenden für das große Ganze blockiert werden.
- **Problemorientiertes Lernen:**  
Das Lernen muss sich an relevanten Problemen orientieren, dies sind gerade die Schlüsselprobleme, welche die Zukunft der Menschheit betreffen. Die Fächer werden hier als Instrumente eingesetzt um Verknüpfungen und Wechselbeziehungen der Teildisziplinen deutlich zu machen.
- **Reflexives Lernen:**  
Das Thema steht im Vordergrund, nicht das eigene Fach. So können unterschiedliche Perspektiven eingenommen und Zugänge geschaffen werden.

Für die Anforderungen eines erfolgreichen fächerübergreifenden Unterrichts lässt sich zusammenfassend festhalten:

- Der Unterricht ist themenzentriert.
- Es werden mehrere Fächer eingebunden, die vermittelten Inhalte sollten nicht additiv, sondern viel mehr integrativ zueinander sein.
- Als Ziel sollte das Verständnis für die Verknüpfung und den Gesamtzusammenhang stehen.
- Geeignete Themen sind solche aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler, die auch in der Wissenschaft interdisziplinär behandelt werden oder solche, die in der Schule sowieso in mehreren Fächern behandelt werden.

Fächerübergreifender Unterricht hat jedoch, ebenso wie der Fachunterricht, Probleme und Grenzen. Zum einen stoßen Lehrer fachlich schnell an ihre Grenzen,

denn auch ihr Studium ist zunehmend eine Spezialisierung, wodurch Wissen in anderen Fachdisziplinen nur vereinzelt oder gar nicht mehr vorhanden ist. Zum anderen muss zur Aufarbeitung des fehlenden Fachwissens (sowohl für Lehrer und Schüler) der fächerübergreifende Unterricht in besonderem Maße strukturiert und transparent gemacht werden. Dies bedeutet einen enormen zeitlichen und organisatorischen Aufwand. Daher ist eine Abschaffung des Fachunterrichts nicht durchführbar und vor allem auch nicht wünschenswert. Der Fachunterricht als historisch gewachsene Unterrichtsform gewährleistet das systematische Arbeiten und das systematische Fundieren der Grundlagen einer jeden Disziplin. Es werden Basiswissen, -kompetenzen und fachspezifische Methoden vermittelt, die für den sicheren Umgang innerhalb des Faches unabdingbar sind:

„Das Fachprinzip darf nicht gegen das Prinzip des fächerübergreifenden Lernens ausgespielt werden. Da Schule an dem Aufbau von Weltansichten und –bildern maßgeblich beteiligt ist, muß sowohl eine differenzierend-teilhafte, als auch eine komplex-fächerübergreifende Perspektive zur Wirklichkeit eröffnet und entsprechende Kompetenzen vermittelt werden“ (s. [Moe98]).

## **2.3 Befragungen zur Erhebung vorhandener Vorstellungen zur Energiediskussion**

### **2.3.1 Fehlvorstellungen als wesentlicher Einflussfaktor**

Alle Menschen haben durch Alltagserfahrungen, zumeist reflektiert in einer Alltagssprache, das Lesen von Zeitschriften und Büchern, das soziale Umfeld, die Nutzung von TV, Internet und weiteren sozialen Medien ein gewisses biographisch bedingtes Vorwissen. Die Physik ist im Alltag fast überall präsent, Eindrücke aus dem Umfeld werden verarbeitet und mit bereits Bekanntem vernetzt. So werden – bewusst oder unbewusst – eigene Ideen und Modelle entwickelt, um Phänomene des Alltags zu erklären. Die neu entstandenen Zusammenhänge werden für wahr gehalten und werden oft gefestigt und langlebig in den Köpfen der Schüler verankert, da sie häufig nicht im Widerspruch zu anderen Erfahrungen stehen. Gerade im Bereich der regenerativen Energien wird diese Festigung durch Medien forciert. Das Suggestieren von unendlicher Energie und die fast aus-

schließliche positive Berichterstattung über erneuerbare Energieträger tragen dazu entscheidend bei (s. Kapitel 1).

Sind Fehlvorstellungen einmal vorhanden, ist es sehr schwer diese zu korrigieren. Diese sind äußerst stabil und dauerhaft. Hinzu kommt, dass das vorhandene Vorwissen die Wahrnehmung beeinflusst. Schüler sehen nur Dinge, die mit ihren Vorstellungen vereinbar sind. Umso wichtiger ist es einerseits die vorhandenen Schülervorstellungen im Unterricht zu berücksichtigen um die individuellen Ansichten der Schüler festzustellen:

„Der wichtigste Einzelfaktor, der das Lernen beeinflusst, ist, was der Schüler schon weiß. Man berücksichtige dies und lehre entsprechend.“ (nach [ANH78])

Andererseits muss klar sein, welche der vorhandenen Schülervorstellungen gleichzeitig Fehlvorstellungen sind. Dies kann genutzt werden, um im Optimalfall einen „conceptual change“, also einen Konzeptwechsel bzw. eine Konzeptentwicklung zu erreichen. Um dies zu bewirken, müssen Lernende mit neuen Vorstellungen konfrontiert werden. Diese müssen einerseits verständlich und einleuchtend sein, andererseits muss eine Unzufriedenheit mit den vorhandenen Fehlvorstellungen ausgelöst werden. Wie genau ein Unterricht für den Konzeptwechsel aussehen könnte, ist in der einschlägigen Literatur beschrieben (s. z.B. [GHK06]).

### 2.3.2 Präsentation der Fragebögen

Das Hauptziel bestand darin, das Vorwissen und die Vorstellungen bei Schülern und Lehramtsstudenten zu regenerativen Energien zu erfragen. Insgesamt wurden zwei Fragebögen entworfen und ausgewertet. Die untersuchten Gruppen wurden für die Auswertung zweigeteilt. Die erste Gruppe hatte an keinem Kurs im Bereich der Umweltphysik teilgenommen, kann also als unvoreingenommene Befragungsgruppe angesehen werden, die zweite hatte einen solchen absolviert. Die Ergebnisse der zuletzt genannten Gruppe werden in Kapitel 6 vorgestellt, um zu zeigen, welchen Einfluss ein solcher Umweltphysikkurs auf die Vorstellungen und das Wissen der Schüler und Studenten hat.

Die vorgestellten Fragebögen erheben dabei allerdings nicht den Anspruch genaue quantitative Ergebnisse zu liefern. Es handelt sich um eine rein qualitative

1. Was ist das „EEG“?

---

---

---

2. Erklären Sie den Begriff „Strahlungsantrieb“

---

---

---

3. Was bedeutet der Begriff „IPCC“?

---

---

---

**Abbildung 2.2: Fragebogen zu grundlegenden Begriffen**

Befragung, die das Ziel verfolgt, Fehlvorstellungen zu identifizieren. Es existieren Befragungen zum Thema Umwelt und Klima bzw. den Klimafolgen, in denen Fehlvorstellungen bei Schülern näher untersucht werden (vgl. beispielsweise [Sch04]), jedoch ist der hier entwickelte Testbogen an den bereits erwähnten Umweltphysikkurs angekoppelt.

### **2.3.2.1 Erster Fragebogen und Ergebnisse**

Der erste Fragebogen wurde erstellt, um die Kenntnis einiger grundlegenden Begriffe der Energiewende und des Klimas abzufragen und eine Vorstellung darüber zu erhalten, in welchem Maße sich die Testgruppe für das Thema Umweltphysik überhaupt interessiert. Zu diesem Zweck wurden drei in den Medien sehr häufig vorkommende Bezeichnungen (teilweise auch in der Form von Kürzeln) abgefragt. Der Test wurde an der Universität Siegen in verschiedenen Kursen der Lehramtsausbildung für Physiker und Geographen mit 93 Studenten durchgeführt.

Der Begriff „EEG“ ist zweideutig. Einerseits kann er das „erneuerbare Energiesgesetz“ und andererseits die Elektroenzephalografie aus dem Bereich der Medizin bedeuten. Da der Kontext dieser Umfrage nicht eindeutig erklärt wurde, war zu erwarten, dass beide Antworten häufig vorkommen (24% Erneuerbare Energiesgesetz, 30% Elektroenzephalografie). Allerdings gaben 40 Studenten (43%) an,

diesen Begriff nicht zuordnen zu können, fünf Studenten gaben andere Antworten, wie etwa „elektronische Energiegewinnung“ oder das „Energieerhaltungsgesetz“. Der Begriff Strahlungsantrieb spielt besonders im Bereich des Klimas eine große Rolle (s. Kapitel 4). Er kommt grundsätzlich in jedem Bericht des IPCC („Weltklimarat“) als der zentrale Begriff vor, so dass es praktisch unmöglich ist, auch nur irgendein fachlich fundierteres Interesse an Klimaberichten zu besitzen, ohne diesen Begriff überhaupt zu kennen. Dennoch ist dieser bei Studenten kaum bekannt. Ein Großteil der Studenten (86%) konnte mit diesem Begriff nichts anfangen, 10% der Studenten ordneten diesen Begriff fortschrittlichen Antriebsmöglichkeiten für Raumschiffe zu, 4% hatten andere Ideen, wovon zumindest zwei dieser Antworten etwas mit Energie zu tun hatten („Irgendwas mit erneuerbaren Energien“). Eine korrekte Erklärung des Begriffs „Strahlungsantrieb“ fehlte ganz.

Bei der dritten Frage konnten 91% der Befragten nichts mit der Abkürzung „IPCC“ anfangen. Lediglich 9% konnten die Frage ansatzweise richtig beantworten („Klimabericht/ -ausschuss“). Dies ist verwunderlich, da der fünfte Bericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ im Jahre 2013, also kurz vor der Umfrage erschienen und in den Medien im zentralen Bereich präsent war.

### 2.3.2.2 Zweiter Fragebogen und Ergebnisse

Der zweite Fragebogen wurde sowohl an der Universität bei Lehramtsstudenten des Faches Physik (Stichprobe  $n=47$ ) als auch im Rahmen der Deutschen Schülerakademie (s. hierzu Kapitel 6.2) bei Schülern der Oberstufe mit einer Stichprobenanzahl von  $n=63$  eingesetzt.

Der Fragebogen besteht aus zwei Teilen (s. Abb. 2.3): die ersten 7 Aufgaben sind Multiple Choice Aussagen, mit den Möglichkeiten „Ja“, „Nein“ oder „k.A.“ anzukreuzen. Dieses Format hat den Nachteil, dass dieser geschlossene Fragetyp die Möglichkeit bietet, auch ohne Sachkenntnis oder ohne Verständnis der Frage durch Raten richtig zu antworten. So wird unweigerlich das numerische Ergebnis verfälscht, allerdings lassen sich Tendenzen, in welchen Bereichen Fehlvorstellungen vorhanden sind, gut erkennen.

Im zweiten Teil wurden offene Fragen gestellt. Diese beschränken sich auf Ursachen und Folgen der globalen Erwärmung (Fragen 8 und 9), sowie die erneuerbaren Energieträger (Fragen 10 und 11). Die letzte Frage bezieht sich auf die Quellen, woher die Schüler bzw. Studenten die Informationen bekommen haben, um grob abzuschätzen, welche Informationsquellen den größten Einfluss haben.

## 2.3 Befragungen zur Erhebung vorhandener Vorstellungen zur Energiediskussion

25

Studiengang	Semester

Beantworten Sie durch Ankreuzen folgende Fragen:

JA    NEIN...KA

- |   |                       |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. Radioaktive Stoffe entstehen nur in Kernkraftwerken.   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 2. Deutschland kann sich nach weiterem Ausbau selbst mit regenerativer Energie versorgen und sogar exportieren. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 3. Regenerative Energie ist unbegrenzt verfügbar.   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 4. Das Abschmelzen des Meereises führt zu keinerlei Anstieg des Meeresspiegels.                                 | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 5. Die Atmosphäre kann Strahlung gewisser Wellenlängen absorbieren.   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 6. Methan wird zu den Treibhausgasen gezählt.   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 7. Jahreszeiten können durch die elliptische Bahn der Erde um die Sonne erklärt werden.                         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Bitte beantworten Sie stichpunktartig folgende Fragen:

8. Nennen Sie Ursachen der globalen Erwärmung

---

---

---

9. Nennen Sie Folgen der globalen Erwärmung

---

---

---

10. Welche Formen von regenerativen Energiequellen kennen Sie?

---

---

---

11. Was sind die Vorteile und Nachteile des Umstiegs von fossilen auf regenerative Energiequellen?

---

---

---

Vielen Dank für Ihre Mühe!

### Abbildung 2.3: Zweiter Fragebogen

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Multiple Choice Aussagen vorgestellt. Diese werden getrennt nach den beiden Befragungsgruppen. Die richtigen Antworten sind im Säulendiagramm (s. Abb. 2.4 und 2.5) schwarz umrandet.

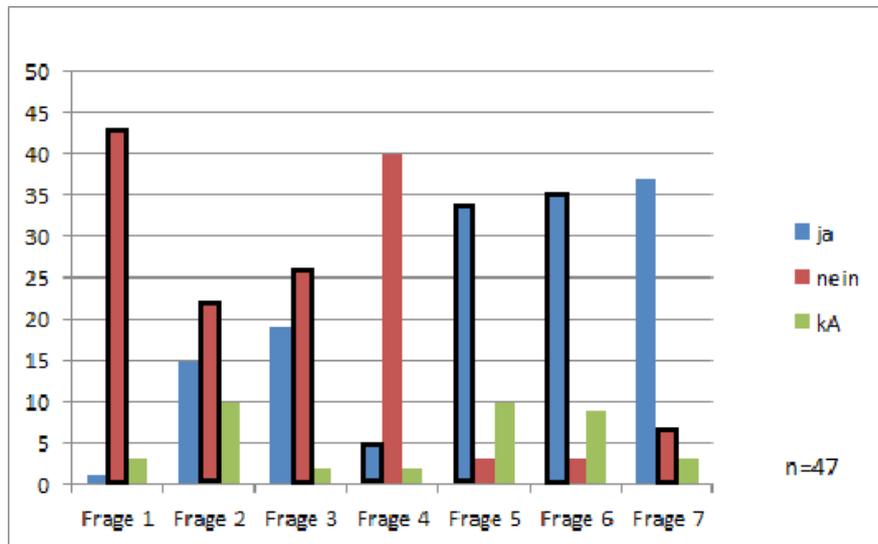


Abbildung 2.4: Umfrageergebnisse Universitätsgruppe

Es fällt auf, dass bei den Aussagen zu regenerativen Energien, die Meinungen nicht eindeutig in eine Richtung tendieren. Auch wenn eine kleine Mehrheit richtig geantwortet hat (47% bei Aussage 2, 55% bei Aussage 3), vertreten viele Studenten den Standpunkt, erneuerbare Energien seien unbegrenzt verfügbar bzw. mit ihnen könne Deutschland sich selbstständig versorgen oder sogar Strom exportieren. Bei Aussage 4 ist eine große Wissenslücke bei Studenten erkennbar. Lediglich 11% setzen das Kreuz richtig und geben an, dass das Abschmelzen von Meereis zu keinem Meeresspiegelanstieg führt. Ähnliche große Lücken im Wissen lassen sich bei Aussage 7 erkennen. Nur 15% Prozent der befragten Studenten kennen den Grund für die Jahreszeiten. Dies ist im Vergleich zu Aussage 4 gravierender, da dies eigentlich Allgemeinwissen ist, welches schon in der Unterstufe der Schule behandelt werden sollte.

Die Ergebnisse der Schülerbefragung sehen ähnlich aus. Bei den Aussagen 2 und 3 liegen hier die Tendenzen allerdings bei den falschen Antworten (57% bzw. 63%). Bei den Aussagen 4 und 7 liegt die Mehrheit der Schüler ebenfalls falsch, wobei prozentual mehr Schüler richtig angekreuzt haben (22% bei Aussage 4 und 38% bei Aussage 7).

Die Ergebnisse des zweiten Teils des Fragebogens werden für beide Gruppen zusammengefasst, da sie sich kaum unterscheiden.

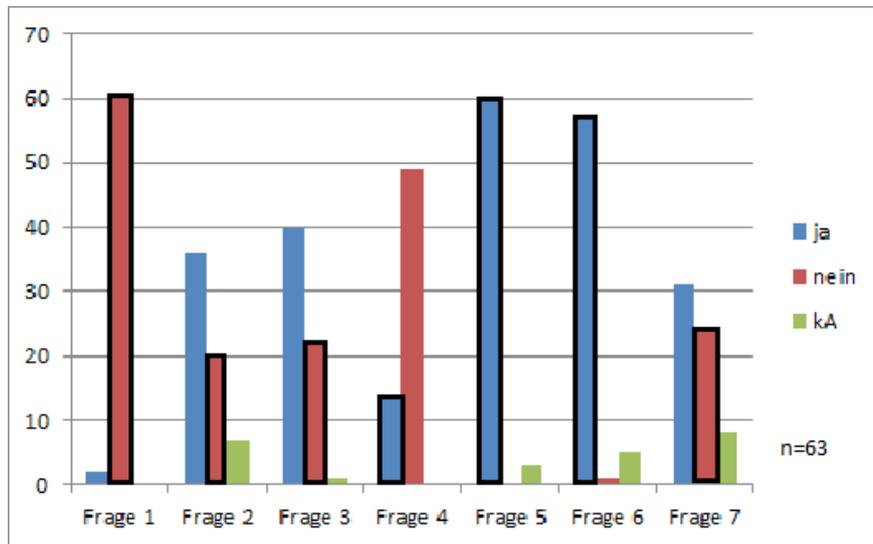


Abbildung 2.5: Umfrageergebnisse Schülergruppe

### Frage 8: Ursachen der globalen Erwärmung

Als Ursachen für die globale Erwärmung werden hauptsächlich zivilisatorische Einflüsse genannt. Zumeist angeführt werden hier generell Umweltverschmutzung sowie Luftschadstoffe (Abgase, Methan, Treibhausgase). Weitere genannte Ursachen sind mit hohen Lebensansprüchen verknüpft – vor allem werden genannt: Überbesiedlung, Energieverschwendung oder der falsche Umgang mit Ressourcen. Insgesamt nennen die Schüler und Studenten breitgefächerte Ursachen, der negative Umwelteinfluss der Privathaushalte beschränkt sich jedoch meist auf den Verkehrssektor.

### Frage 9: Folgen der globalen Erwärmung

Hier werden größtenteils das Schmelzen der Polkappen und der daraus resultierende Anstieg des Meeresspiegels genannt. Viele der Befragten nennen den Klimawandel, sowie damit einhergehende Trockenheit, Umweltkatastrophen oder das Eintreten einer Eiszeit. Auswirkungen auf Menschen und Tiere werden einzeln genannt. Das Abschmelzen der Gebirgsgletscher wird lediglich in der Schülergruppe sehr selten erwähnt, genauso wie soziale Folgeprobleme, wie etwa Wasser- und Nahrungsmangel, Armut, Migration oder Landnutzungskonflikte.

### Frage 10: Formen von regenerativen Energieträgern

Die meisten Nennungen erzielen hier die Energieträger Solarenergie, Wasser- und Windkraft. Energieträger wie Biomasse, Gezeitenenergie oder Wellenenergie werden weniger oft genannt.

Diese Aufteilung ist nicht verwunderlich, da die drei zuerst genannten Energieträger sowohl in der Alltagswelt als auch in den Medien sehr viel häufiger vertreten sind.

### Frage 11: Vor- und Nachteile regenerativer Energieträger

Die Antworten zu den Vorteilen lassen sich in drei übergeordnete Bereiche einteilen. Die regenerativen Energieträger seien umweltschonender bzw. nicht umweltschädlich, da weniger Abgase emittiert würden, somit trügen sie nicht zum Treibhauseffekt bei.

Ein weiterer häufig genannter Punkt ist die Sicherheit: Durch die Abschaltung von Kernkraftwerken passieren keine Unfälle mehr, die Erneuerbaren selbst sind sicherer.

Der am häufigsten genannte Aspekt ist jedoch die Verfügbarkeit: regenerative Energien können immer genutzt werden, verbrauchen keine „begrenzten Mittel“, sind unbegrenzt und sofort verfügbar.

Verfügbarkeit ist aber nicht durchgängig in einer Weise konnotiert. Andere Schüler und Studenten führen sie als nachteilig auf, da sie eben nicht unendlich verfügbar und sie zudem abhängig vom Wetter sei. Zwei weitere Kategorien der Nachteile beziehen sich einerseits auf die Flächenproblematik – regenerative Energieträger haben eine „geringe Kraft“, brauchen also eine große Fläche, zerstören Lebensraum und greifen in die Biosysteme ein – andererseits auf ökonomische Probleme (hohe Kosten durch Erbauung und Wartung der Kraftwerke).

### Frage 12: Informationsquelle

Wie zu erwarten war, sind die Hauptinformationsquellen das Fernsehen und die Schule. Weniger häufig wurden Zeitschriften, Bücher und Internet genannt. Selten wurden das soziale Umfeld (Freunde, Eltern) und das Allgemeinwissen erwähnt.

## **2.4 Umweltphysik und Energiewende im Schulunterricht – eine Schulbuchanalyse**

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels sollen einige ausgewählte Schulbücher in Hinblick auf umweltphysikalische oder die Energiewende betreffende Themen untersucht werden.

Schulbücher sind gerade in Hinblick auf guten Unterricht eines der wichtigsten Medien und Hilfen für Lehrer zugleich. Texte, Aufgaben, Bilder und Tabellen sind aufeinander abgestimmt, die wichtigsten Unterrichtsinhalte sind elementarisiert dargestellt. Durch die Zusammenschau sowohl auf Theorien als auch auf Aufgaben sollen verschiedene Lerntypen angesprochen werden. Durch differenzierte Aufgabenstellungen werden verschiedene Sozialformen, wie etwa Gruppenaufgaben oder Schülerexperimente, umfasst.

Motivierende Alltagsbezüge sollen die Schüler zum selbständigen Lernen anregen und das Interesse an Physik wecken, das Schulbuch ist angepasst an die kognitiven Fähigkeiten und so verständlich und lernbar (vgl. [Bam95]). Gleichzeitig haben Schulbücher eine gewisse gesellschaftliche Funktion, da sie den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung wiedergeben sollen und an den jeweils vorgeschriebenen Lehrplan angepasst sind (vgl. [Wia03]).

### **2.4.1 Auswahl der Schulbücher und Beschreibung der Methodik**

Für die Auswahl der zu untersuchenden Schulbücher wurde einerseits darauf geachtet, häufig in der Schule genutzte Exemplare zu benutzen<sup>2</sup>. So fiel die Wahl auf:

- Impulse Physik Oberstufe ([Bre])
- Metzler Physik ([Gre])
- Cornelsen Physik Oberstufe ([Cor])

---

<sup>2</sup>Dies stützt sich hauptsächlich auf eigene Erfahrungen und den Meinungsaustausch mit einigen Physiklehrern.

Zum anderen wurde darauf geachtet, dass die gesamte Oberstufenphysik durch die Bücher abgedeckt wird – entsprechend der in dieser Arbeit ins Auge gefassten Altersstufe. Die Analyse von „Metzler Physik“ besteht daher aus dem Buch der Einführungsphase und dem der Qualifikationsphase.

Alle untersuchten Bücher haben grob den gleichen Aufbau ihrer Kapitel. Jedes physikalische Teilgebiet wird durch verschiedene Beispiele, Erscheinungen oder Fragestellungen eingeführt und motiviert. Die Inhalte werden mit Experimenten untersucht oder plausibel gemacht, Formeln werden meist hergeleitet. In jedem Kapitel lassen sich thematische Ergänzungen in Form von Exkursen oder materialgestützten Aufgaben finden, welche anregende Bezüge zu physikalischen Aspekten der Alltagswelt und zu praktischen Anwendungen der Physik bieten. Am Ende jeden Kapitels befindet sich ein Rückblick mit Zusammenfassungen und Übungsaufgaben.

Die Bücher Impulse Physik und Metzler Physik orientieren sich beide an dem aktuellen Kernlehrplan NRW. Um einen Vergleich zu der Umsetzung des vorherigen Lehrplans zu ziehen, wurde das Buch Cornelsen Physik aus dem Jahre 2010 gewählt. Hierbei wird hauptsächlich das Fehlen des Teilgebiets der Thermodynamik in den neueren Büchern deutlich. Bücher der Sekundarstufe 1 wurden aus oben genannten Gründen nicht berücksichtigt.

Für die Untersuchung der Schulbücher wurde eine qualitative Inhaltsanalyse durchgeführt:

„[Das] Ziel der Inhaltsanalyse ist es, bestimmte Aspekte aus dem Material herauszufiltern, unter vorher festgelegten Ordnungskriterien einen Querschnitt durch das Material zu legen oder das Material aufgrund bestimmter Kriterien einzuschätzen“ (s. [May15], S.58).

Im Gegensatz zur quantitativen Inhaltsanalyse basieren die Messungen auf einer Nominalskala (vgl. [May15], S. 16-18). Es interessiert hauptsächlich, inwiefern bzw. ob Inhalte mit Bezug zur Umweltphysik oder zur Energiewende in den Büchern angesprochen werden. Eine genaue Quantisierung im Vergleich zu anderen Inhalten hätte keinen Mehrwert für diese Arbeit. Ohne auf Details einzugehen, soll hier nur grob das Vorgehen bei der Inhaltsanalyse geschildert werden. Zunächst wurden die Suchbegriffe identifiziert: Alle Begriffe, die den Themengebieten der Energiegewinnung oder der Umwelt-/ Geophysik zuzuordnen sind, wurden dabei erfasst. Dabei wurde nochmals differenziert, ob diese Kontexte/ Phänomene im Sinne dieser Arbeit „interessant“ sind (Kursivdruck in den Ergebnistabellen, s.

2.4.2). Zusätzlich wurde untersucht, ob es sich bei den aufgelisteten Inhalten um einen Exkurs handelt, losgelöst vom eigentlichen Inhalt des Buches, ob es zentraler Sachtext ist, oder ob qualitative oder quantitative Aufgaben zu dem beschriebenen Kontext/ Phänomen existieren (s. Bemerkung in den Ergebnistabellen).

### **2.4.2 Ergebnisse der Schulbuchanalysen**

Die Ergebnisse der Analyse der Schulbücher sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Diese wurde so gestaltet, dass in der ersten Spalte das physikalische Teilgebiet bzw. das Kapitel innerhalb des Buches steht. Die zweite Spalte gibt den Kontext bzw. das beschriebene Phänomen wieder. In der dritten Spalte finden sich Bemerkungen (s.o.). In der letzten Spalte stehen die Seitenzahlen für die entsprechenden Bücher.

Klett Impulse Physik Oberstufe

Inhalt/ Kapitel	Kontext/ Anwendung/ Phänomen	Bemerkung	Seiten
Kräfte bei Kreisbewegungen	Corioliskraft, Windablenkung		39
Gravitation	Gezeiten, Gezeitenkraftwerk	Exkurs, Sachtext mit groben Erklärungen	70
Elektrisches Feld – Kondensator	Blitze und Gewitter	Exkurs	111
Magnetisches Feld	Magnetische Flasche, Magnetfeld der Erde, Polarlichter		135
Wellen	Erdbeben und Tsunamis	Exkurs, Schalenaufbau der Erde	171
Wellenmodel des Lichts	Streuung von Licht, Himmelsfarben		211
Wellenmodel des Lichts	Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung – Wärmestrahlung, Solarkonstante	„Solarkonstante als Quotient der auf der Erde ankommenden Strahlungsleistung der Sonne und Querschnittsfläche der Erde“; „Bedarf der Menschheit 1/10000“	219
Kernphysik	Energie aus dem Atomkern, Leichtwasserreaktoren	Massendefekt, Exkurs: technischer Aufbau eines Reaktors	300 – 303

Metzler Physik Einführungsphase NRW

Inhalt/ Kapitel	Kontext/ Anwendung/ Phänomen	Bemerkung	Seiten
Bewegung und Kräfte	Die Physik von Windkraftanlagen	Materialgestützte Aufgaben, Exkurs: Ermittlung der Leistung einer Windkraftanlage	39
Energie- und Energieerhaltung	Pumpspeicherkraftwerk	Eine Aufgabe: Berechnung der gespeicherten Energie + Dauer der Aufrechterhaltung einer angegebenen Leistung	50
Energie und Impuls	Energie aus dem Meer, Wellen- und Gezeitenkraftwerke	Exkurs „Materialgestützte Aufgaben“: Prinzip der Energiegewinnung + Aufgaben (reflektierende Aufgaben)	64

Metzler Physik Qualifikationsphase NRW

Inhalt/ Kapitel	Kontext/ Anwendung/ Phänomen	Bemerkung	Seiten
Quantenobjekte – Elektronen	Polarlicht und Van-Allen'scher Strahlungsgürtel	Exkurs, keine Aufgaben	44/ 45
Energie	Energietransport über Freileitungen	Experimente, Berechnung Leistungsverluste, Aufgaben (qual. + quant.)	116-119
Struktur der Materie – Ionisierende Strahlung	Natürliche Strahlenbelastung	Strahlungsdosis, Quellen der Belastung, Folgen, Aufgaben (qual.)	162 – 165
Kernenergie	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kernfusion in der Sonne</li> <li>· Exkurs: „Energie aus Fusionsreaktoren“</li> </ul>	Aufgabe: aus Solarkonstante Rückschluss auf die Leuchtkraft der Sonne ziehen Wirkungsweise Fusionsreaktor	196 – 199

Cornelsen Physik Oberstufe Gesamtband

Inhalt/ Kapitel	Kontext/ Anwendung/ Phänomen	Bemerkung	Seiten
Felder – Gravitation	Gezeiten	Exkurs „Umwelt“, Aufgaben (qual.)	90/ 91
Felder – Elektrische Ladung und elektrisches Feld	Gewitter	Exkurs „Umwelt“, Aufgaben (qual.)	104/ 105
Felder – Magnetisches Feld	Magnetfeld der Erde	Exkurs „Geophysik“, Aufgaben (qual.)	120/ 121
Felder – Magnetisches Feld	Polarlicht	Exkurs „Umwelt“, Aufgaben (qual.)	131
Felder – Wechselstromkreis	Fernleitung elektrischer Energie	Exkurs „Technik“, Aufgaben (qual.+ quant.)	151
Felder – Elektrische Leitungsvorgänge	Solarzelle	Exkurs „Technik“, Funktionsweise+ Wirkungsgrad, reflektierende Aufgabe	161
Schwingungen und Wellen – Mechanische Wellen	Meereswellen	Exkurs „Umwelt“, Aufgaben (qual.)	220/ 221
Schwingungen und Wellen – Mechanische Wellen	Seismische Wellen	Exkurs „Geophysik“, Aufgaben (qual. + quant.)	225
Quantenobjekte und Struktur der Materie – Radioaktivität	Belastung durch ionisierende Strahlung	Exkurs „Umwelt“, natürliche und zivilisatorische Strahlenquellen, Aufgaben (qual.)	384/ 385

Quantenobjekte und Struktur der Materie – Kernumwandlungen	Moderne Kernkraftwerke	Exkurs „Technik“, Funktionsweise, Sicherheit und Leistung, Aufgaben (qual.)	402/ 403
Astrophysik – Unser Stern: die Sonne	Sonne, Leben, Energie	Exkurs „Umwelt“: Energiebedarf Menschheit (Nahrung u. Leistungsumsatz)	453
Astrophysik – Unser Stern: die Sonne	Solarkonstante, Leuchtkraft der Sonne	Rückschluss der Leuchtkraft durch die Solarkonstante	454
Thermodynamik - Wärmekraftmaschinen und Kreisprozesse	Wirkungsgrad	Technisch, ohne umweltphysikalische Anwendung	493-499
Thermodynamik - Wärmekraftmaschinen und Kreisprozesse	Wärmepumpen	Exkurs „Technik“: Prinzip einer Wärmepumpe, Aufgaben (qual.)	496/ 497
Thermodynamik – Kinetische Gastheorie	Osmosekraftwerk	Exkurs „Technik“: Wirkungsprinzip, Leistungspotenziale, Aufgaben (qual. + quant.)	506/ 507

Thermodynamik - Gesetze der Wärmestrahlung	<ul style="list-style-type: none"><li>· Strahlungs- und Energiehaushalt der Erde</li><li>· Strahlungseigenschaften der Erde</li><li>· Die Erde im Strahlungsgleichgewicht</li><li>· Exkurs: „Versiegt der Golfstrom?“</li><li>· Treibhauseffekt der Atmosphäre</li></ul>		510 - 517
--	--	--	-----------

Es fällt auf, dass die Bezüge zur Umwelt und Energie relativ selten sind, besonders bei den Schulbüchern, welche den aktuellen Kernlehrplan befolgen. Diese finden meist als Exkurs statt, gefolgt von qualitativen Aufgaben, die zum Verständnis der Physik der Erde beitragen sollen. Quantitative Rechenaufgaben sind rar.

Eine komplette Lehrreihe zu einem umweltphysikalischen Aspekt fehlt bei allen Büchern. Dies ist allerdings nicht verwunderlich: Schulbücher sollen in einem gewissen Rahmen die Fachsystematik vermitteln, Exkurse sollen Anwendungsmöglichkeiten oder Bezüge der Physik aufzeigen. In dem ohnehin schon engfassten Lehrplan bleibt daher wenig Zeit bzw. Platz für die Behandlung rein umweltphysikalischer Themen.

Das Buch Cornelsen Physik sticht bzgl. der Anzahl der Bezüge und vor allem der Inhalte heraus. Allerdings sind die Teilgebiete der Astrophysik und der Thermodynamik im aktuellen Lehrplan des Landes NRW nicht mehr vorgesehen. Aspekte die Energiewende betreffend, welche die Physik der Thermodynamik benötigen, tauchen dadurch nicht auf. Gerade dieses Gebiet der Physik ist für das Verständnis im Bereich der Energiebereitstellung durch regenerative Energieträger oder Auswirkungen für das Klima der Erde von essenzieller Bedeutung. So ist es nicht verwunderlich, dass teilweise sehr viele Fehlvorstellungen oder Wissenslücken bei Schülern und Studenten in diesem Bereich vorhanden sind (s. Kapitel 2.3).

## 2.5 Zusammenfassung der Teilergebnisse

Dieses Kapitel dient, wie anfangs erwähnt, als eine tiefergehende Legitimation, warum eine Thematisierung der Energiewende in der Schule notwendig ist. Die Ergebnisse sollen hier noch einmal kurz zusammengefasst werden.

Es bestehen bereits Konzepte zur Umwelterziehung, welche zu zukunftsfähigem Denken und Handeln befähigen sollen. Eines dieser Konzepte, welches insbesondere in der Schule greifen soll, ist „Bildung für nachhaltige Entwicklung“. Unterstützt durch Kriterien, welche von der Kultusministerkonferenz entwickelt wurden, soll Umwelterziehung separat in verschiedenen Fächern, im fächerübergreifenden oder im fachübergreifenden Unterricht verwirklicht werden.

Im Verlaufe dieses Kapitels wurde jedoch gezeigt, dass die bisherigen Maßnahmen nicht ausreichen:

- Die Auswertung der Fragebögen belegte, dass sowohl bei Schülern als auch bei Lehramtsstudenten teilweise eklatante Fehlvorstellungen oder Wissens-

lücken vorhanden sind. Diese erstrecken sich von grundlegenden Begriffen, über die Potenziale von erneuerbaren Energien, hin zu den Folgen für das Klima auf der Erde.

- Die Analyse der Schulbücher legt offen, dass Lehrwerke, welche dem aktuellen Kernlehrplan folgen, nur wenige Bezüge zur Umweltphysik haben und noch weniger die Energiedebatte betreffen. Durch das Fehlen der Thermodynamik und von Teilen der Astrophysik, werden grundlegende Begriffe (Wärmekraftmaschine, Strahlungsgleichgewicht etc.) nicht mehr behandelt, die nicht nur förderlich, sondern teilweise absolut notwendig sind, um sich selbst eine Meinung in der Energiedebatte bilden zu können.

Die Entwicklung eines Umweltphysikkurses, der selbständige Meinungsfindung auf der Grundlage naturgesetzlicher Zusammenhänge ermöglicht, ist also notwendig und geboten. Im Falle der völlig ausgeklammerten Themenfelder (z.B. Wirkungsgradbetrachtungen, Umwandlungsketten unter Einbeziehung thermodynamischer Vorgänge, Gesetzmäßigkeiten von Wärmeübertragung usw.) muss dieser Kurs nicht nur Zugänge schaffen, sondern voll umfänglich auch Übungsaufgaben, Modellbetrachtungen und dergleichen enthalten.

# Kapitel 3

## Andauerndes Wachstum als falsches Ziel gesellschaftlicher Entwicklung

### 3.1 Fachdidaktische und fachwissenschaftliche Vorüberlegungen zum Wachstum – Ziele des Lernmoduls

Immerwährendes Wachstum: das wünschen sich heutzutage viele Politiker, Ökonomen, Industrielle. Diese Einstellung ist nichts Neues. Schon im 18. Jahrhundert beschrieb Adam Smith (s. [Smi13]), dass eine Nation am besten zu Wohlstand und Reichtum komme, wenn jeder einzelne Bürger versucht, seinen eigenen Ertrag zu maximieren und sein wirtschaftliches Handeln effektiver zu gestalten. So soll jede Person möglichst seinen eigenen Vorteil sichern. Auch heutzutage ist diese Einstellung nichts Ungewöhnliches, Stagnation in der Wirtschaft wird als negativ angesehen. Betrachtet man Daten von Bevölkerungszahlen, dem Bruttoinlandsprodukt oder dem Energiebedarf der letzten Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte, erkennt man leicht, dass die meisten Werte stetig anstiegen.

Jedoch – ist dies der richtige Weg? Ist andauerndes Wachstum natürlich? Schaut man sich in der Natur um, findet man schnell eine Antwort: Nein! Pflanzen wachsen, hören aber bei einer bestimmten Größe damit auf. Menschen und Tiere wachsen, hören aber in einem gewissen Alter auf. Sogar nicht lebendige Dinge, wie etwa Gebirge wachsen in die Höhe, aber selbst dort ist irgendwann eine maximale Höhe erreicht. Begrenzt werden diese Vorgänge durch die in der Biologie,

Physik und Geologie bzw. Geophysik herrschenden Naturgesetze, welche durch nichts verletzt werden können – also auch nicht durch den Menschen. Dass auf der Erde Wachstum, besonders wirtschaftliches, nicht unendlich sein kann, lässt sich schnell deutlich machen. Die Erde ist endlich, also auch die auf ihr vorhandenen Rohstoffe und Energievorräte, genauso wie die Energie, die von der Sonne kommt. Es stellen sich „lediglich“ zwei Fragen. Wo liegen die Grenzen, die diese endlichen Ressourcen dem Wachstum setzen? Wann werden die Menschen diese erreichen?

Schon 1972 erkannte Meadows in seiner vom Club of Rome in Auftrag gegebenen Studie „Die Grenzen des Wachstums“, dass „[...][w]enn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, [...] die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht [werden]“ (s. [MMR92]). Dies würde mit großer Wahrscheinlichkeit zu sinkenden Bevölkerungszahlen und industriellen Kapazität führen. Diese Arbeit erregte große Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit, führte allerdings zu keiner grundsätzlichen Trendwende im Konsumverhalten und im Energieumsatz der Menschen. Trotz der Kritik an Meadows bzw. an seinen verwendeten Computerprogrammen hinsichtlich Unzulänglichkeiten des mathematischen Modells, sollte die Hauptbotschaft des Buches gehört werden. Leider hat das Werk nur sehr begrenzt dazu beigetragen, die Endlichkeit der irdischen Ressourcen in das öffentliche Bewusstsein zu tragen. Ein weiterer Grund, warum diese Studie an Bedeutung verlor, war die Entwicklung ab den 70ern: Technologien wurden immer weiter verbessert, so dass die Ressourcenverknappung nicht so deutlich zum Tragen kam, wie prognostiziert. Ebenso wurden Werkstoffe immer wichtiger, welche 1972 noch keine große Rolle spielten. Hier sei z.B. das Silicium für die informationstechnologische Branche genannt. Zudem beruhten die mathematischen Vorhersagen des verwendeten Modells auf exponentiellem Wachstum, was allerdings nicht in allen Bereichen richtig ist (vgl. [JS14]).

Im Gegensatz zu Meadows gibt es allerdings auch die Position, dass es für Wachstum immer neue Möglichkeiten gebe. Hier sei beispielsweise Diane Coyle genannt. Neben nachhaltigem Verbrauch von Ressourcen sollen erschöpfliche Rohstoffe und Energieträger durch die scheinbar unerschöpfliche Sonnenenergie ersetzt werden. Zusätzlich dazu könne durch technologischen Fortschritt und innovative neue Produkte das Wachstum von der „Nutzung natürlichen Kapitals“ entkoppelt werden. Diese Sichtweise mag zunächst naheliegen, da in Industrie-

ländern momentan kaum etwas bzw. nichts von einer Ressourcenverknappung zu spüren ist. Dies liegt wohl auch daran, dass sowohl Nahrung, als auch verschiedene Rohstoffe unter hohem Aufwand von Primärenergie nutzbar gemacht werden können. Dadurch wird die Fehlvorstellung geschürt, dass auch zukünftig die Menschheitsprobleme mittels Einsatz von immer mehr Energie gelöst werden könnten. Diese grundlegend falsche Annahme begegnet uns gegenwärtig hauptsächlich in Gestalt eines nichtzutreffenden Argumentes für regenerative Energien. Dieses lautet, man könne das Problem der globalen Erwärmung und des steigenden Energiebedarfs lösen, indem man fossile Brennstoffe durch regenerative Energieträger ersetzt, wodurch quasi unendlich viel Energie zur Verfügung stehen könnte. Auch solche Fehlvorstellungen müssen korrigiert werden.

Ein exaktes Ermitteln von verschiedenen Wachstumsgrenzen ist allgemein sehr komplex, da viele Rückkopplungseffekte zwischen Geo- und Biosphären zu berücksichtigen sind. Astronomische Grenzen unterliegen solchen Rückkopplungen zumeist nicht. Es ist nicht anzuzweifeln, dass die Gesamtmenge der von der Sonne auf die Erde einfallenden Strahlungsleistung eine absolute und feststehende Obergrenze für die Nutzung regenerativer Energien darstellt, ebenso wenig ist in Frage zu stellen, dass Gezeitenkraftwerke prinzipiell nicht mehr Energie umwandeln können, als an Rotationsenergie auf unserem Heimatplaneten vorhanden ist. Dadurch werden Abschätzungen besonders durchsichtig. Das Wählen konkreter astronomischer Grenzen verfolgt somit auch den Zweck didaktischer Einfachheit. Marion King Hubbert beschrieb in den 1950er Jahren, dass das Ölfördermaximum, auch „Peak Oil“ genannt, in den USA in den 70er Jahren und weltweit im frühen 21. Jahrhundert erreicht werden würde (vgl. [JS14])). Allerdings merkt man heutzutage nicht viel von Verbrauchseinschränkung des Einzelnen, speziell in den USA, was die Frage aufwirft, ob M. King Hubbert mit seiner Prognose vielleicht falsch gelegen haben könnte. Es spricht viel dafür, dass Hubberts Vorhersage zeitlich etwa 30 Jahre für die gesamte Welt zu früh lag. Demnach hätten wir den Peak Oil gerade in der Gegenwart (s. Abbildung 3.1).

Bei der Frage, ob sich die Menschen selbst einen Verzicht auferlegen wollen, hängt die Antwort wohl stark von der Mentalität in den jeweiligen Ländern ab. Dies sieht man relativ deutlich bei Klimakonferenzen. Obwohl Belege und erste Anzeichen für schlechter werdende Lebensverhältnisse auf der Erde vorhanden sind, sei es durch zur Neige gehende Ressourcen oder die globale Erwärmung, verfolgen bei weitem nicht alle Staaten das Ziel mögliche Folgen zu reduzieren bzw. den Zeitraum zu vergrößern, bis deutlichere Auswirkungen zu spüren sind.

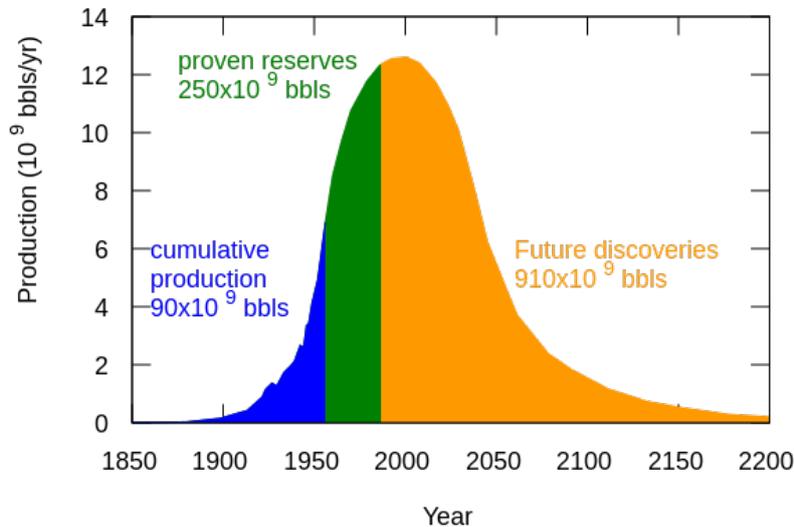


Abbildung 3.1: Weltweite Ölproduktion (Quelle: [Han]).

Gründe hierfür könnten sein:

1. Die Erwartung, dass mit steigendem Energie- bzw. Leistungsumsatz sich ebenfalls die Lebensqualität verbessert. Ob es einem Amerikaner mit 10.000 Watt Leistungsumsatz doppelt so gut geht, wie einem Deutschen mit etwa dem halben Leistungsbedarf, sei dahingestellt.
2. Das Beste für die Menschen bzw. die Gesellschaft ist nicht zwangsläufig das Beste für die Wirtschaft. Da jedoch die Industrie über eine relativ breite Lobby verfügt, kann sie entsprechend Druck auf die Politik und künftige Gesetze ausüben.
3. Gerade Schwellenländer wollen möglichst schnell den eigenen Energiebedarf steigern und zu den Industrienationen aufschließen. Am einfachsten geht dies immer noch mit den preiswerten konventionellen Energieträgern, wie Öl und Kohle.
4. Menschen neigen dazu bislang erfolgreiche Handlungsstrategien in die Zukunft zu projizieren. Nach diesem Schema versucht man die Probleme, die sich aus dem immer schwierigeren Zugang zu Energieressourcen ergeben, durch den Einsatz von noch mehr Energie zu lösen.

Generell sollte Kritik am jetzigen Wachstumsdogma nicht als „Aufhalten“ der Entwicklung interpretiert werden. Wachstum sollte auch nicht absolut verneint werden. In der Natur existiert allerdings kein immerwährendes Wachstum, viel mehr spielen dort mehrere dynamische Prozesse eine Rolle, so gibt es Phasen von Wachstum, aber auch Stagnation und Rückgang bzw. Schrumpfung. Dynamik sollte also nicht mit Wachstum gleichgesetzt werden (vgl. [JS14]). Diese Schlüsselerkenntnis eines nicht-immerwährenden Wachstums sollte intuitiv in der Lebenswelt der Lernenden aufzuspüren und in ihrem Denken fest zu verankern sein. Eine Übertragung der dabei gewonnenen Einsichten auf das wirtschaftliche (Konsum!) und energetische Wachstum wäre der nächste Schritt im Rahmen einer angestrebten Umstellung des individuellen Verhaltens. Vorschläge, wie diese Übertragung erfolgen könnte, sollen in diesem Lernmodul präsentiert werden.

Häufig wird in der Literatur der Energiebedarf der Menschheit pro Jahr angegeben, also Joule pro Jahr oder Kilowattstunden pro Jahr. Bei solchen Angaben ist es sinnvoll, gerade wenn man dieses Thema in der Schule behandeln will, den jährlichen Energiebedarf als eine Leistung aufzufassen. Leistungsangaben finden sich nämlich an vielen Stellen der Erfahrungswelt der Lernenden, sei es als Angabe auf einem Leuchtmittel, auf dem Smartphone oder als wesentliche Kennzahl des Motors eines PKW. Auch wenn zivilisatorische Leistungsangaben meist sehr große Zahlenwerte betreffen, ermöglichen Leistungskennzahlen die Anwendung der Vergleichsmethode. Es ist zu empfehlen mit der gängigen Einheit Watt zu arbeiten, da sie im Alltag der Lernenden stärker präsent ist. Der Umrechnungsfaktor von Joule pro Jahr auf Watt ergibt sich durch:

$$1 \frac{J}{a} = 1 \frac{J}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot s} = 3,17 \cdot 10^{-8} \frac{J}{s} = 3,17 \cdot 10^{-8} W. \quad (3.1)$$

Für die ebenfalls gebräuchliche Einheit Kilowattstunden pro Jahr ergibt sich analog:

$$1 \frac{kWh}{a} = 1000 \frac{Wh}{365 \cdot 24 \cdot h} = 0,114 W. \quad (3.2)$$

Daher sollen, soweit möglich, Betrachtungen in Bezug auf Leistungsangaben erfolgen.

Aus den Vorüberlegungen ergeben sich folgende fachdidaktische Aufgabenstellungen: Ein Ziel dieses ersten Lernmoduls besteht darin, eine allein auf elementarmathematischen Grundlagen beruhende Beschreibung von Wachstumsprozessen bereitzustellen. Zusätzlich sollen mit Hilfe von einfachen Betrachtungen erste Abschätzungen zu astronomischen Wachstumsgrenzen angestellt werden. Astronomische Wachstumsgrenzen haben den fachlichen und didaktischen Vorteil, dass sie als Absolutgrößen unabhängig vom Einfluss des Menschen sind und sich deshalb ohne zivilisationsdynamische Simulationen exakt festlegen lassen.

## 3.2 Lernmodul 1

### 3.2.1 Eine kurze mathematische Beschreibung des exponentiellen Wachstums

Wie kann man die immer raschere Zunahme in vielen Bereichen (beispielsweise das Bevölkerungswachstum, die Produktion von Nahrungsmitteln und anderen Gütern oder der Rohstoffverbrauch) mathematisch beschreiben? Wie schon oben angedeutet, folgt dieser Anstieg näherungsweise dem des exponentiellen Wachstums. Kleine Abweichungen hiervon sind durch die verschiedensten Einflüsse bedingt, wie etwa kurzfristig vorgenommene technische Optimierungen, Witterungseinflüsse, Kriege, Seuchen usw. Das exponentielle Wachstum ist im globalen sozialen System der Erdenbewohner tief verwurzelt (vgl. [MMR92]). Allerdings denken Menschen linear, exponentielle Zusammenhänge sind für die meisten nur schlecht bzw. gar nicht vorstellbar. Hierzu drei Beispiele:

1. Man stelle sich vor, man könne ein Blatt Papier 40-mal falten. Wie hoch ist der Papierstapel?

Ein Blatt ist ca. 0,1 mm dick (je nach Papiersorte kann die Dicke variieren). Pro Faltung wird die Stapeldicke verdoppelt. So erhält man nach der ersten Faltung eine Dicke von 0,2 mm, nach der zweiten verdoppelt sich die Dicke wieder, man hat also vier Schichten. Verallgemeinert erhält man für die Dicke  $d$  der  $n$ -ten Faltung:

$$d(n) = 0,1 \cdot 2^{n-1} \text{ mm}$$

Bei 40 Faltungen erhält man somit eine Dicke von

$$d(40) = 0,1 \cdot 2^{40-1} \text{ mm} \approx 550000 \text{ km},$$

was rund dem 1,5-fachen der Entfernung Erde – Mond entspricht.



Abbildung 3.2: **Diese Abbildungen zeigen deutlich die Verdopplung der Dicke nach jeder Faltung. Zu sehen sind 2, 5 und 6 Faltungen des Papiers. Verwendet wurde hier 80g-Papier der Größe DIN A4, wodurch eine siebte Faltung nicht mehr möglich war.**

Das exponentielle Wachstum ist der Grund, warum man ein Blatt Papier nur sieben bis acht Mal falten kann. Dieses Erlebnis der Undurchführbarkeit lässt sich sogar mit Grundschulkindern im „Experiment“ nachvollziehen.

2. Basierend auf einer Legende aus Persien, verschaffte ein Hofdiener seinem Schah ein edles Schachspiel. Dieser versprach seinem Untertan einen Wunsch zu erfüllen. Der Diener wollte als Belohnung Reiskörner haben, es sollten auf dem Schachbrett nach dem Prinzip der Verdopplung auf dem ersten Feld ein Reiskorn abgelegt werden, auf dem nächsten Feld zwei, auf dem dritten vier usw. Der Schah überlegte und war einverstanden, da auf dem vierten Feld lediglich 8 und auf dem Feld danach nur 16 Reiskörner liegen würden.

Betrachtet man allerdings den funktionalen Zusammenhang zwischen Feldnummer und Anzahl der Reiskörner, so ergibt sich analog zum ersten Beispiel:

$$\#Reiskörner = 2^{n-1}$$

Für das 40. Feld müsste der Schah schon  $10^{12}$  Reiskörner bezahlen, für das letzte Feld knapp  $10^{19}$  Reiskörner, was je nach Reissorte ungefähr  $2 \cdot 10^{14} \text{ kg}$  bzw.  $2 \cdot 10^{11}$  Tonnen Reis entspricht. Dies entspricht in etwa der 1000-fachen Menge, die weltweit pro Jahr geerntet werden müsste (rund  $5 \cdot 10^8$  Tonnen Reis).

3. Mit Hilfe der kostenlosen Software *Geogebra* lässt sich exponentielles Wachstum sehr gut darstellen. Hierzu erzeugt man auf der Oberfläche einen Kasten, in dem Punkte generiert werden. Die Anzahl dieser Punkte lässt sich an eine Funktion koppeln (für eine genaue Anleitung zum Programmieren siehe Anhang A.1). In der Abbildung 3.3 wird die Anzahl  $N$  der Punkte der diskreten Funktion

$$N(n) = 2^n \text{ mit } n = 1, 2, 3, \dots$$

grafisch dargestellt. Auch hier lässt sich erkennen, dass anfangs die Anzahl der Punkte nur langsam ansteigt, mit zunehmendem  $n$  geschieht dies jedoch immer schneller.

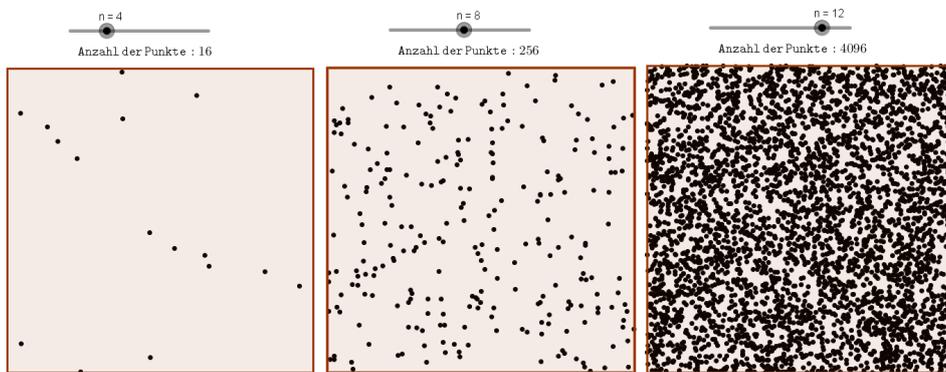


Abbildung 3.3: Darstellung von Punkten, deren Anzahl der Funktion  $f(x) = 2^n$  folgt (für  $n = 4; 8; 14$ ).

4. Im Jahr 2003 erschien in der Zeitschrift „Bild der Wissenschaft“ ein Artikel mit dem Titel: „Jeder kennt jeden über sechs Ecken“ (s. [Löf]). Dort wurde ein Sozialexperiment beschrieben, welches das Ziel verfolgte, 18 ausgewählte Personen aus mehreren Staaten mit Hilfe moderner Kommunikationsmedien bzw. „E-Mail-Ketten“ zu erreichen. Die Zielpersonen waren persönlich unbekannt, jeder der Startpersonen wählte den nächsten Adressaten selbst aus, mit der Vermutung, dass dieser der Zielperson näher sein könnte, als sie selbst. Es erreichten mangels Interesse der Teilnehmer zwar nur ein Bruchteil der Nachrichten die Zielpersonen, diese allerdings im Mittel nur über sechs Zwischenkontakte. Dieses Experiment beruht auf dem 1967 von S. Milgram und J. Travers beschriebenen „Kleine-Welt-Phänomen“, wonach alle Menschen über sechs Ecken miteinander bekannt seien. Trotz

der Einwände, dass jede zu erreichende Person einen Internetzugang bzw. eine Adresse haben müsste, kann man den Sachverhalt, mathematisch modelliert, auf Plausibilität prüfen:

Man kann der Einfachheit halber annehmen, dass von zwei miteinander bekannten Menschen wiederum jeder selbst 50 Personen „kennt“ (die Qualität des „Kennens“ soll hier niedrig gesetzt werden), die der andere nicht kennt. Dies ist in der heutigen Zeit von sozialen Medien und durch die Anzahl an Verwandten, Arbeitskollegen oder Vereinskameraden durchaus realistisch. Dann ergibt sich für eine Kette von sechs Personen eine Anzahl von

$$50^6 = 15\,625\,000\,000$$

Menschen, was etwa dem Doppelten der heutigen Bevölkerungszahl der Erde entspricht.

5. Ein weiterer Artikel beschreibt die Nachfahrenanzahl von Dschingis Khan, welche heute ca. 16 Millionen betragen soll (s. [Sta16]). Auch dies kann man mathematisch auf Plausibilität überprüfen: Dschingis Khan lebte im 12./13. Jahrhundert. Nimmt man an, dass alle 30 Jahre eine neue Generation heranwächst, so kann man bis zum heutigen Tag von etwa 26 Generationen ausgehen. Bei durchschnittlich 2 neuen Kindern pro Generation, die einen Partner aus dem „Rest“ der Bevölkerung finden, folgt die Anzahl der Nachkommen in der n-ten Generation:

$$\#Nachkommen = 2^{n-1}.$$

Für 26 Generationen ergibt dies  $2^{25} \approx 34$  Millionen Nachfahren. Diese Zahl klingt plausibel, allerdings könnte man auch annehmen, dass meist mehr als zwei Kinder gezeugt wurden. Geht man beispielsweise von 4 direkten Nachfahren pro Generation aus, so würde man nach 26 Generationen schon  $1,1 \cdot 10^{15}$  Nachkommen erhalten. Dies sind etwa hunderttausend mal so viele Menschen, wie es heute Erdenbürger gibt. Dieses Beispiel belegt eindrucksvoll, dass die Dynamik exponentiellen Wachstums sehr empfindlich auf Eingangsp Parameter reagiert – der Unterschied zwischen realistischer Vorstellung und unvorstellbar großem Resultat hängt nur von einer vergleichsweise geringfügigen Veränderung der Ausgangssituation ab.

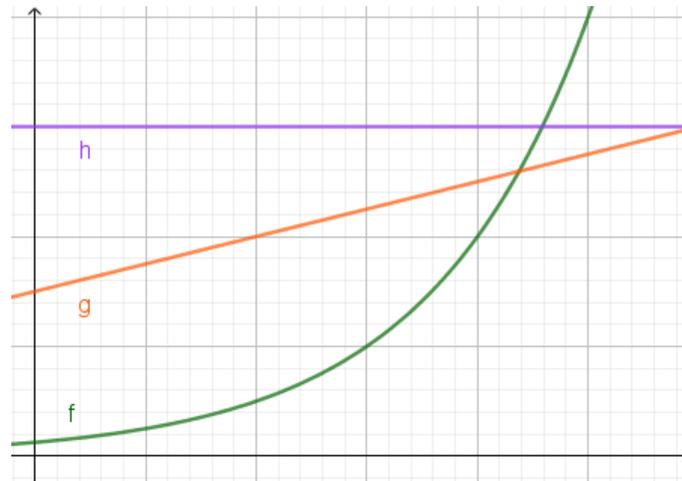


Abbildung 3.4: **Exponentielle Funktionen (f) überschreiten schon nach endlicher Zeit jede feste Obergrenze, sei es ein konstanter Wert (h) oder eine beliebige andere polynomiale Funktion (g).**

Allein an diesen fünf Beispielen kann man sowohl den enormen Anstieg des exponentiellen Wachstums erkennen als auch das vollkommene Versagen einer „empfindungsmäßigen“ Vorhersage des Resultates, so, wie uns das bei linearen Abhängigkeiten zumeist noch gut gelingt. Wir Menschen sind als biologische Wesen in einer Umgebung des Gleichgewichts sozialisiert, nicht in einer Umgebung permanenter Wachstumsprozesse. Wegen der schlechten Vorstellbarkeit von solchen Zusammenhängen müssen verschiedene Zugänge gewählt werden, damit Lernende einen Trainingsprozess durchlaufen, der es ihnen erleichtern soll, bei ähnlich gelagerten Problemsituationen keine Entscheidungen aus dem Bauch heraus zu treffen, sondern die mathematischen Denkwerkzeuge zu benutzen.

Mathematisch lässt sich leicht beweisen, dass eine exponentielle Funktion jede andere Polynomfunktion überschreitet, natürlich auch im konkreten Beispiel des Leistungsumsatzes der Menschheit, der langfristig exponentiell immer schneller wächst, als jede anderweitige Bereitstellung jährlich verfügbarer Energie – linear, quadratisch, kubisch usw. So wäre der Bedarf schon nach relativ kurzer Zeit größer als jede beliebige „Energieproduktion“ (s. Abb. 3.4). Gleichzeitig erkennt man auch an diesen Beispielen, dass der Mensch nur linear denkt bzw. denken kann, ihm fehlt das Vermögen exponentielles Wachstum abschätzen zu können.

Doch warum befolgen viele zivilisatorische Zusammenhänge exponentielles Wachstum? Dies liegt in den meisten Fällen an einer sogenannten positiven

Rückkopplung. Zwischen der Bestandsgröße und der Wachstumsrate besteht ein kausaler Zusammenhang. Je größer die Bestandsgröße ist, desto mehr Elemente entstehen bzw. umso schneller wächst die Bestandsgröße in absoluten Zahlen. In der Abbildung 3.5 werden solche Rückkopplungen veranschaulicht. In einem typischen Zinses-Zins-Beispiel erhält man umso mehr Geld an Zinsen, je größer das Guthaben ist. Da die Zunahme an Geld oder allgemein eines Elements eine Veränderung zur Folge hat, welche die ursprüngliche Zunahme verstärkt, handelt es sich ausschließlich um eine positive Rückkopplung (s. Abb. 3.5 (links)). Die absolute Geldmenge, die in den Industrienationen derzeit verfügbar ist, entwickelte und entwickelt sich nach diesem Beispiel. Möglich wurde dies ausschließlich durch die moderne Computertechnologie, die es gestattet, eine permanent anwachsende Geldmenge als elektronische Ziffern zu handhaben.

Beispiel: Vereinigte Staaten von Amerika

Die Vereinigten Staaten von Amerika besitzen eine Geldmenge von etwa  $1,3 \cdot 10^{13}$  Dollar (berücksichtigt sind hier allerdings nur Bargeld, Spareinlagen und Termineinlagen; Schuldverschreibungen oder Geldmarktpapiere sind nicht mit eingeschlossen). Würde man dieses Geld in 10-Dollar-Noten aufeinander stapeln, so wäre dieser Turm

$$1,38 \cdot 10^{12} \cdot 0,156 \cdot 0,066m^2 \approx 690000km$$

hoch. Dies entspricht etwas weniger als der 2-fachen Entfernung Erde – Mond.

Angesichts dieses Rechenbeispiels wird sofort deutlich, dass eine praktische Aufbewahrung in Tresoren im Grunde unmöglich wäre – die Anzahl der verfügbaren Tresore, ihr Raumbedarf und ihre Herstellungskosten, hätten in einer „realen“ Finanzwelt das exponentielle Wachstum längst negativ rückgekoppelt, d.h. in Form materieller Limits reduziert oder zurückgeführt. Genau dies (Rückkopplung) wird tatsächlich irgendwann passieren, wenn reale Menschen diese Geldmenge in reale Güter umsetzen wollen. Vorläufig geschieht dies noch nicht aufgrund der Geschicklichkeit der Zentralbanken, so dass man andere paradigmatische Beispiele für negative Rückkopplungen in Betracht ziehen muss.

Diese kann man etwa in der Bevölkerungsentwicklung finden. Die Zahl der „neuen Elemente“ entspricht dabei der Anzahl der Geburten. Hinzu kommt allerdings

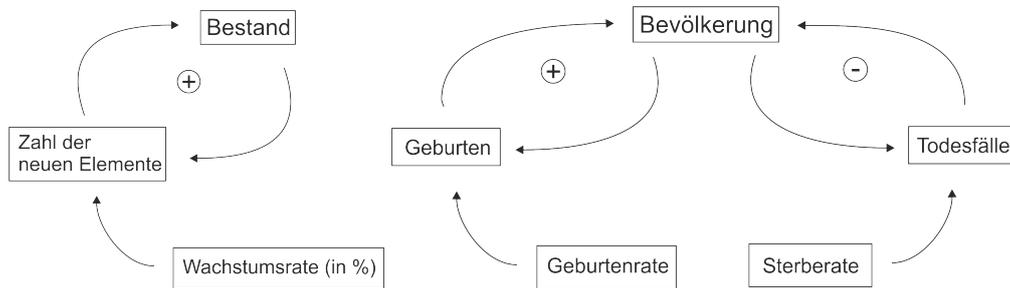


Abbildung 3.5: **Wachstumsprozesse ausschließlich positiver (links) und mit negativer Rückkopplung (rechts).**

als „negative Rückkopplung“ die Anzahl der Sterbefälle bedingt durch die Sterberate (s. Abb. 3.5 (rechts)). Durch negative Rückkopplung kann die Größe der Bevölkerung langsamer wachsen, konstant bleiben oder abnehmen. Bei einer natürlichen Population von Tieren wird die negative Rückkopplung durch die Anzahl der existierenden Individuen gesteuert: Je mehr von ihnen leben, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für Nahrungsmangel, Krankheit usw. Damit wird die Rückkopplung umso stärker, je mehr Tiere vorhanden sind.

Mathematisch lässt sich ebenfalls zeigen, dass durch eine einfache positive Rückkopplung ein exponentielles Wachstum entsteht:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der zu betrachtenden Größe  $N(t)$  und deren Änderung  $\dot{N}(t)$ . Dies entspricht einer Differentialgleichung:

$$\dot{N}(t) \sim N(t) \quad (3.3)$$

$$\text{bzw. } \dot{N}(t) = k \cdot N(t) \quad (3.4)$$

Dies lässt sich weiter umschreiben und umformen:

$$\frac{dN(t)}{dt} = k \cdot N(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{N(t)} dN(t) = k \cdot dt \quad | \int (\cdot) \quad (3.6)$$

$$\int \frac{1}{N(t)} dN(t) = \int k \cdot dt \quad (3.7)$$

$$\ln(N(t)) = k \cdot t + c_0 \quad (3.8)$$

Hieraus folgt:

$$N(t) = e^{k \cdot t + c_0} \quad (3.9)$$

$$\text{bzw. } N(t) = e^{k \cdot t} \cdot e^{c_0} \quad (3.10)$$

Mit  $c_1 := e^{k \cdot t}$  und der Anfangsbedingung  $N(t = 0) = N_0$  ergibt sich:

$$N(0) = c_1 \cdot e^{k \cdot 0} = c_1 = N_0 \quad (3.11)$$

Und damit die Gleichung:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{k \cdot t}. \quad (3.12)$$

Bei exponentiellem Wachstum ist eine weitere Information ebenfalls interessant. Sie betrifft die Frage, nach welcher Zeitspanne sich die betrachtete Größe verdreifacht hat, auch Verdopplungszeit genannt. Dies lässt sich leicht durch folgenden Zusammenhang berechnen:

Für eine exponentielle Funktion gilt allgemein:

$$N(t) = N_0 \cdot (1 + p)^t \text{ mit dem Wachstumsfaktor } (1 + p).$$

Um die Verdopplungszeit zu erhalten, muss also die Formel

$$2 \cdot N_0 = N_0 \cdot (1 + p)^t \text{ nach } t \text{ aufgelöst werden. Daraus folgt:}$$

$$2 = (1 + p)^t \quad (3.13)$$

$$\Rightarrow \ln(2) = t \cdot \ln(1 + p) \quad (3.14)$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln(2)}{\ln(1 + p)} \approx \frac{0,7}{p} \quad (3.15)$$

Wird das Wachstum  $p$  in Prozent angegeben, so ergibt sich für die Verdopplungszeit:

$$t \approx \frac{70}{p[\text{in}\%]} \quad (3.16)$$

Dadurch lassen sich leicht Abschätzungen und Prognosen für Wachstumsprozesse, wie etwa die Bevölkerungszunahme eines Landes anstellen. Bei solchen Berechnungen muss man sich stets darüber im Klaren sein, dass allenfalls Größenordnungen abgeschätzt werden können. Welche Prozesse und Entwicklungen tatsächlich ablaufen, ist im Allgemeinen nur sehr schwer vorherzusehen. Dies betrifft insbesondere Vorgänge in der menschlichen Zivilisation, bei denen die beteiligten „Objekte“ Individuen mit freiem Willen und intellektuellem Zugang zu verschiedenen Handlungsoptionen sind – die Palette möglicher Reaktionen reicht von bewusst organisierter Beschränkung im Ressourcenverbrauch (und damit Optimierung der negativen Rückkopplung) über chaotische Prozesse (Bürgerkrieg, Kriege zur Erzwingung anderer Ressourcenverteilungen) bis hin zur Auslöschung der Population (Beendigung des Ressourcenproblems).

### 3.2.2 Wie viele Menschen kann die Erde tragen?

Bevor die Diskussion innerhalb dieses Kapitels auf den Energiebedarf gelenkt wird, soll zunächst die Erdbevölkerung betrachtet werden. Mit Prognosen zur Entwicklung und einem möglichen Maximum der Weltbevölkerung beschäftigt man sich schon seit mehreren Jahrhunderten, nicht zufällig, denn die Anzahl von Konsumenten ist bei vielen Wachstumsproblemen der primäre Faktor. Für einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung von Voraussagen bzgl. der Tragfähigkeit der Erde sei auf den Artikel von Bernhard Köppen (s. [Köp08]) verwiesen.

Mit der Geburt des 7 Milliardsten Menschen, die offiziell am 31.10.2011 geschehen sein soll, sind die Debatten um die Probleme, die mit einer so hohen Bevölkerungszahl einhergehen, wieder neu in den Fokus gerückt. Um die Bewohnerkapazität der Erde näherungsweise zu ermitteln, kann man auf verschiedene Weisen vorgehen. Abschätzungen zu dieser Thematik wurden in den 70er Jahren häufig auf geographischer oder ökonomischer Ebene ausgearbeitet, in diesem Kapitel soll es jedoch um eine physikalische bzw. biophysikalische Betrachtungsweise gehen (s. hierzu auch [DK14]).

Die im Folgenden gemachten Abschätzungen sollen nicht den Anspruch erheben, genauer zu sein, als solche, die andere Vorgehensweisen verwenden. Hier soll das grundlegende Prinzip der Energieerhaltung benutzt werden. Ein Mensch benötigt Energie zum Leben, diese bezieht er über die Nahrung. Da die Erde ein begrenztes System ist (s. Abb. 3.6), kann sie den Menschen nur endlich viel Nahrungsenergie zur Verfügung stellen.

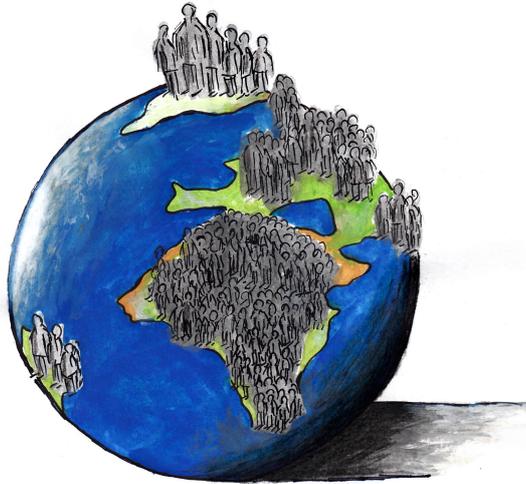


Abbildung 3.6: **Die Erde kann nur eine bestimmte Anzahl an Menschen tragen und auch dauerhaft versorgen (Grafik: Sandra Wagner).**

Um die Abschätzung anfangs möglichst unkompliziert zu halten, soll zunächst angenommen werden, alle Menschen würden sich nur von Pflanzen ernähren, also rein vegan. Tierische Produkte sind rein energetisch betrachtet ineffizient, da Tiere in der Nahrungskette zwischengeschaltet sind und einen sehr kleinen Wirkungsgrad in der Umsetzung von aufgenommener Energie in eigenes Zellwachstum haben. Um nun auf die den Menschen zur Verfügung stehende Nahrungsenergie zu gelangen, benötigt man einerseits den Nährwert der essbaren Pflanzen und andererseits die Fläche, auf der diese angebaut werden.

Da die Erde nicht nur aus Landflächen besteht, muss man zunächst den mit Wasser bedeckten Anteil der Oberfläche abziehen. Die Gesamtoberfläche der Erde beträgt rund 510 Millionen Quadratkilometer. Selbst auf dem Land können nicht überall Nahrungsmittel angebaut werden, geeignet sind beispielsweise Steppen, Gras- und Ackerland. Der Anteil der zu Verfügung stehenden Areale beträgt etwa 9% von der gesamten Erdoberfläche bzw. ca. 33% der Landfläche. Dies entspricht rund 4,9 Milliarden Hektar bzw.  $4,9 \cdot 10^{13} m^2$  (s. [Uni]). Um den für Menschen nutzbaren Energieanteil in Pflanzen zu bestimmen, existieren verschiedene Möglichkeiten. Ein Weg führt über den Nährwert der Pflanzen und den jährlichen Ertrag bei Ernten. Ein anderer führt über den Strahlungseintrag der Sonne und den Wirkungsgrad der Photosynthese. Diese Vorgehensweise wird detaillierter in Ka-

pitel 5 vorgestellt, sie führt von der Größenordnung auch zum gleichen Ergebnis.

Als Beispielnahrungspflanze soll der Winterweizen dienen. Wohl wissend, dass kein Mensch alleine von dieser Pflanze leben kann, dient sie uns trotzdem als Anhaltspunkt für numerische Rechnungen. Im Mittel liegt der Ertrag dieser Pflanze bei 3 Tonnen pro Hektar bzw. 0,3 kg pro Quadratmeter Weizenmehl (s. [Buna]). Der Nährwert von Mehl liegt bei etwa 300 kcal pro 100 Gramm bzw. 12,6 Megajoule pro Kilogramm (je nach Art und Standort variabel). Pro Quadratmeter werden also rund 3,8 Megajoule pro Jahr an Nahrungsenergie deponiert. Dies entspricht einer Leistung von etwa 0,1 Watt pro Quadratmeter. Die für Nahrung zur Verfügung stehende Leistung auf der Erde ergibt sich somit zu:

$$P = A_{\text{Landfläche}} \cdot P_1 = 4,9 \cdot 10^{13} \text{ m}^2 \cdot 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 4,9 \cdot 10^{12} \text{ W}. \quad (3.17)$$

Ein Mensch hat einen Grundumsatz von etwa 90 Watt, je nach Aktivität steigt dieser Umsatz. Wenn man im Mittel einen leicht arbeitenden Menschen zu Grunde legt, liegt der Leistungsumsatz bei rund 130 Watt (s. [DR14]). Dadurch erhält man die Anzahl der Menschen, die theoretisch mit Pflanzen ernährt werden könnten – es sind ca. 37,7 Milliarden Menschen.

Dieser Zahlenwert muss allerdings noch kritisch reflektiert werden. Er verringert sich nochmals, da man nicht in der Lage ist – und auch niemals sein wird – sämtliche potenziellen Agrargebiete so effizient wie beschrieben zu nutzen. Bei der beschriebenen Monokultur wird davon ausgegangen, dass sämtliche Gebiete ebenso gut mit Dünger und vor allem mit Wasser versorgt werden können, wie es hierzu möglich wäre. Die Idee auf allen potenziellen Flächen anzubauen, ist ebenfalls fraglich. Zweifellos müssen auch die Menschen in der Nähe der Anbauflächen wohnen und ihre Infrastruktur aufbauen, so dass die Landnutzungsfläche kleiner ausfällt. Zudem wurde hier nicht berücksichtigt, dass nur eine einseitige, vegane Ernährung betrachtet wurde. Realistischer (und auch gesünder) ist eine gemischte Ernährung, welche verschiedene Pflanzensorten (Obst und Gemüse mit deutlich geringeren Energiedichten) sowie den Fleisch- und Fischkonsum beinhaltet.

Zurzeit werden etwa 2/3 der vorhandenen Agrarflächen für Tiernahrung genutzt, wodurch das tatsächliche Ergebnis sehr viel kleiner ausfällt. Bei einem Kosten-Nutzen-Verhältnis von 16:1, d.h. für die Produktion von 1 Kilogramm Fleisch werden 16 kg Getreide benötigt, ergibt sich ein mittlerer Ertrag von etwa 19 Gramm Fleisch pro Quadratmeter und Jahr. Mit einem mittleren Nährwert von 150 kcal pro 100 g entspricht dies einer Flächenleistung von ca. 3,8 Milliwatt pro Quadratmeter. Auf die für die Tierzucht verwendeten Areale ergibt dies eine Leistung von

$1,2 \cdot 10^{11}$  Watt. Dies entspricht nur etwa einem Zehntel der Leistung, die durch den Getreideanbau für die direkte Nahrungsverwertung auf der restlichen Fläche abfällt (ca.  $1,6 \cdot 10^{12}$  Watt). Zusätzlich zur Fleischproduktion kann die Fischerei berücksichtigt werden. Könnte die jetzige Fangquote aufrechterhalten werden (was äußerst unwahrscheinlich ist), käme man auf etwa 60 Watt pro Person, würde somit insgesamt 16 Milliarden Menschen versorgen können.

Auch mit dieser sehr groben Modellierung lassen sich einige Schlüsse ziehen: Man erkennt, dass jede Fläche, die anderweitig genutzt wird, beispielsweise für den Anbau von Energiepflanzen für Biokraftstoffe, in direkter Konkurrenz zur Nahrung steht. Jede Pflanze, die nicht als Nahrungsmittel angedacht ist, verringert im wahrsten Sinne des Wortes das Bevölkerungsmaximum. Die Tragweite dieses Ergebnisses muss auch verdeutlicht werden: Es war nicht das Ziel eine genaue Zahl für das Maximum der Bevölkerung herauszufinden. Dies ist kaum möglich, da nicht hinreichend klar ist, wie das zukünftige Ernährungsverhalten der Menschen aussehen wird. Wichtiger ist es zu erkennen, dass überhaupt eine obere Grenze existiert und dass es daher auch kein ewiges Bevölkerungswachstum geben kann. Der eigentliche Wert des Maximums ist deshalb auch eher fiktiver Natur: Dieses Limit kann – wenn überhaupt – nur erreicht werden, wenn sämtliche Potenziale und Ressourcen völlig ausgeschöpft werden, was wiederum gravierende Probleme nach sich ziehen würde. Darüber hinaus kann man sich an diesem Beispiel eindrucksvoll verdeutlichen, wie mächtig das Gedankenwerkzeug einer energetischen Bilanzierung ist. Dies wird in den nachfolgend abgehandelten Lernmodulen noch an vielen Stellen zum Tragen kommen.

Da die gegenwärtige Weltbevölkerungszahl schon bedenklich nahe an der von uns abgeschätzten oberen Grenze ist, kann man die Frage erheben, ob die Nahrungsmittelproduktion noch mit dem exponentiellen Wachstum der Weltbevölkerung Schritt hält. Die Abbildung 3.7 deutet darauf hin, dass dies in den letzten Jahrzehnten gerade noch der Fall war, doch dürfen angesichts der komplexen Zusammenhänge Teileinsichten in statistische Entwicklungen nur mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden. Man verdeutliche sich dies an der weltweiten Maisproduktion (s. Abb. 3.8) bzw. der Sojaproduktion. Beide Pflanzen (Mais oder Soja) werden in den letzten Jahren immer mehr angebaut, um Tierfutter herzustellen. Die stagnierende Getreideproduktion deutet also wahrscheinlich nur zum Teil auf das Erreichen einer Grenze hin, denn offenbar gehen viele Menschen, die früher fast ausschließlich Getreideprodukte (Brot) zu sich genommen haben,

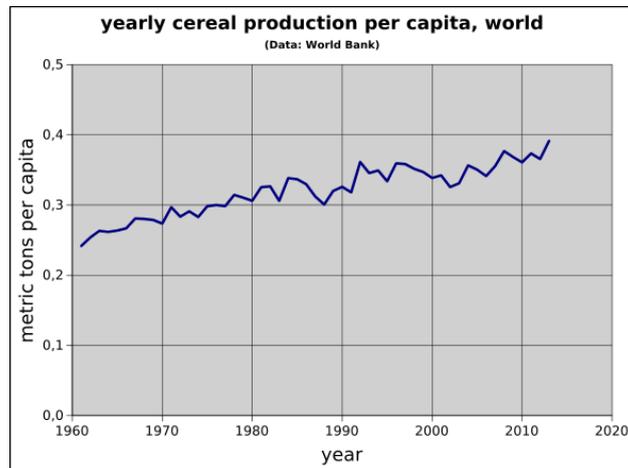


Abbildung 3.7: **Weltweite Getreideproduktion pro Jahr und pro Kopf** (Quelle: [Dom]).

zunehmend zum Fleischkonsum über.

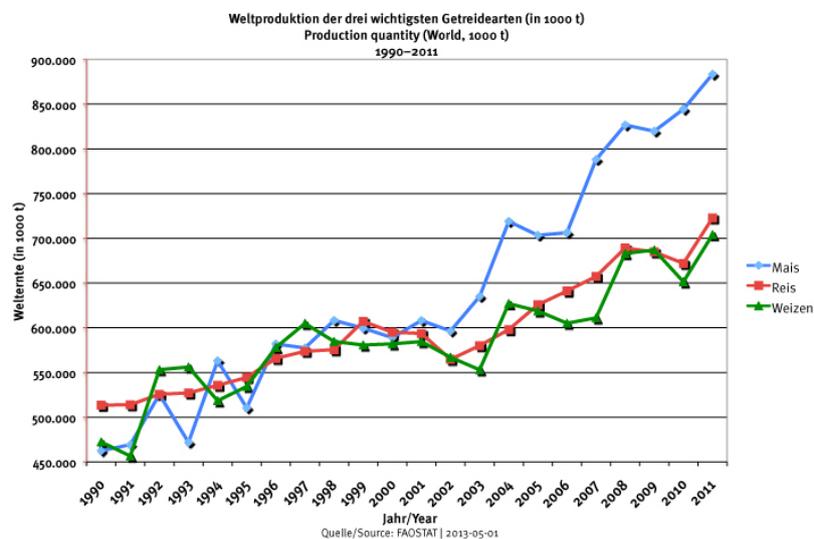


Abbildung 3.8: **Weltweite Produktion der wichtigsten Getreidesorten zwischen 1990 und 2011** (Quelle: [BMK]).

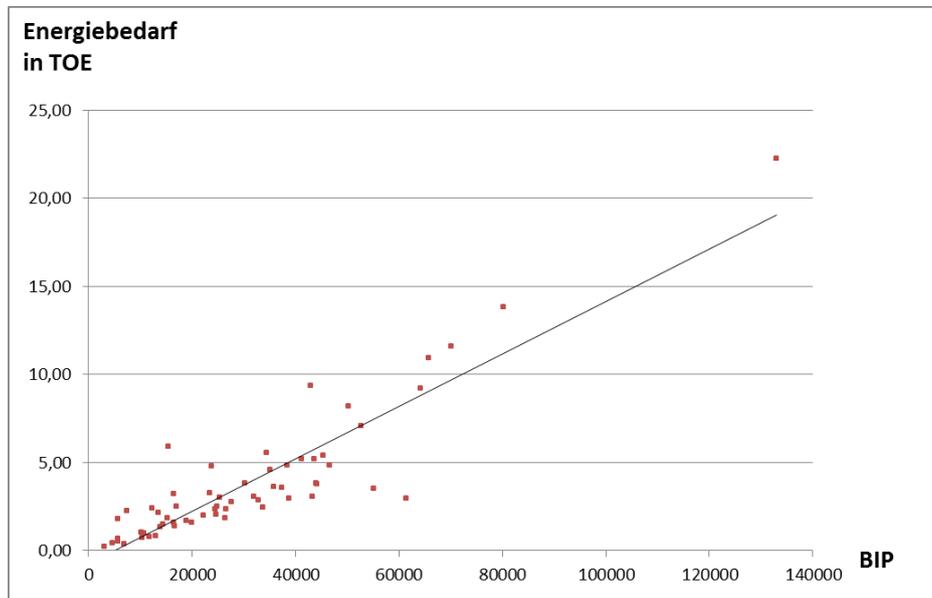


Abbildung 3.9: **Der jährliche Energiesumatz (hier in Tonnen Öläquivalent kann in einen direkten Zusammenhang mit dem Bruttoinlandsprodukt gebracht werden. Je höher dieses ist, desto größer ist der Leistungsbedarf eines Staates (eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von [Bri] und [Lex]).**

### 3.2.3 Gegenwärtige Situation und aktueller Energiebedarf

Im Folgenden soll das Hauptaugenmerk auf dem Energieumsatz der Menschen und seinem Wachstum liegen. Diese Sichtweise reicht für unser Anliegen aus, da man eine Korrelation zwischen dem Bruttoinlandsprodukt und dem Energiebedarf feststellen kann (s. Abb. 3.9). Je höher das Einkommen bzw. das BIP ist, desto höher ist auch der Lebensstandard, dadurch wird mehr Energie pro Person umgesetzt. Weiterhin entspricht die Produktion von Gütern de facto einer Umwandlung von Energie (vgl. [Mac13]). Beispielsweise wird bei allen Herstellungsprozessen Energie aufgewendet und dabei in Verformung, in chemische Energie oder in Abwärme umgewandelt. Ähnliches gilt für die Bevölkerung: wächst die Bevölkerung stark an, muss auch mehr Energie bereitgestellt werden. Daher reicht es für unsere Zwecke grundsätzlich den Energiebedarf zu betrachten. Dies erlaubt uns für viele Beispiele ökonomische Faktoren außer Acht zu lassen.

Betrachtet man die Entwicklung des Energiebedarfs, erkennt man schnell, dass dieser in den letzten Jahrzehnten rasant angestiegen ist (s. Abb. 3.10). Dies hat

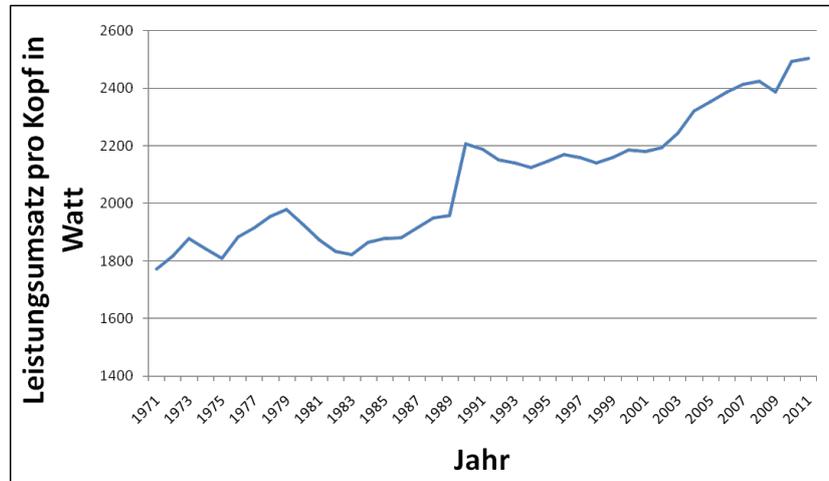


Abbildung 3.10: **Der jährliche, globale Leistungsumsatz der Menschheit ist in den letzten Jahren stetig angestiegen. Hier ist der Zeitraum ab den 1970er Jahren zu sehen (eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von [Wor]).**

hauptsächlich zwei Ursachen: zum einen ist die Zunahme auf das Bevölkerungswachstum zurückzuführen. Im Jahre 1950 lebten auf der Erde rund 2,5 Milliarden Menschen, heute liegt die Weltbevölkerung bei etwa 7,5 Milliarden Erdenbürgern, welche mit Energie versorgt werden wollen (s. [HK12]). Selbst wenn jeder Mensch konstant gleich viel Energie umsetzen würde, müsste die globale Bilanz ansteigen. Zum anderen ist der Energiebedarf pro Kopf im globalen Mittel ebenfalls in den letzten 40 Jahren um 40% angestiegen. Der gegenwärtige Weltenergiebedarf beträgt  $5,05 \cdot 10^{20}$  Joule (bzw. 505 Exajoule) pro Jahr. Wie eingangs bereits erwähnt, entspricht dies einer Leistung: Der sogenannte Leistungsumsatz beträgt somit zurzeit  $1,6 \cdot 10^{13}$  Watt, was im Mittel etwa 2100 Watt pro Person entspricht. Dies mag nicht viel erscheinen, jedoch trägt dieser Mittelwert. Ein durchschnittlicher Amerikaner hat einen Leistungsbedarf von ca. 10 000 Watt, in Deutschland liegt dieser Umsatz bei etwa 5000 Watt, während in Armutsländern, wie etwa Bangladesch, der Leistungsumsatz teilweise die 200 Watt-Marke gerade so überschreitet.

Betrachtet man aktuelle Daten zum Energiebedarf einzelner Staaten, fällt auf, dass manche Länder, zu denen auch Deutschland gehört, in den letzten Jahren keinen nennenswerten Anstieg zu verzeichnen hatten (s. Abb. 3.11 ). Doch es wäre vorschnell diesen Trend als Stillstand in der Entwicklung der Energiebedürfnisse zu



Abbildung 3.11: **Der jährliche Primärenergiebedarf in Deutschland zeigt in den letzten Jahren keinen nennenswerten Anstieg auf (eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von [Umw]).**

interpretieren. Wie wir wissen, wurden in den letzten Jahrzehnten sehr viele energieintensive Produktionszweige ins Ausland verlagert, so dass sich entsprechende Energieumsätze in den Bilanzen jener Länder und somit in der globalen Energiebilanz wiederfinden. Ebenso kann sich in Industrieländern durch Entwicklung sparsamerer Maschinen die Produktion effektiver gestalten, was zu einer Dämpfung im Leistungsumsatz führt.

Der Hauptgrund für den relativ starken Anstieg im globalen Energiebedarf sind jedoch tatsächlich der oben beschriebene Nachholbedarf von Schwellen- und Entwicklungsländern und das Bevölkerungswachstum in diesen Ländern (s. Abb. 3.12). So ergeben sich als Wachstumsraten im Durchschnitt etwa 2% pro Jahr als Prognose für die Jahre von 2000 bis 2030 (s. [Wor17]). Im Jahr 2004 betrug der Anstieg im Energiebedarf sogar 4,3% (s. [Bri]). Für weitere Rechenbeispiele sollen nun genau solche typischen Wachstumsraten von 2% und 4% als Standardwerte angenommen werden.

Durchschnittlich beträgt der Leistungsumsatz wie bereits erwähnt pro Person etwa 2 kW. In Europa liegt dieser Wert bei ca. 5 kW pro Person. Um die Lage in armen Ländern zu verbessern bzw. um eine Verteilungsgerechtigkeit anzustreben, müsste also Energie aufgewendet werden, um diese Diskrepanz zu mindern und so den globalen Mittelwert anzuheben. Wie lange würde es bei Wachstumsraten von 2%

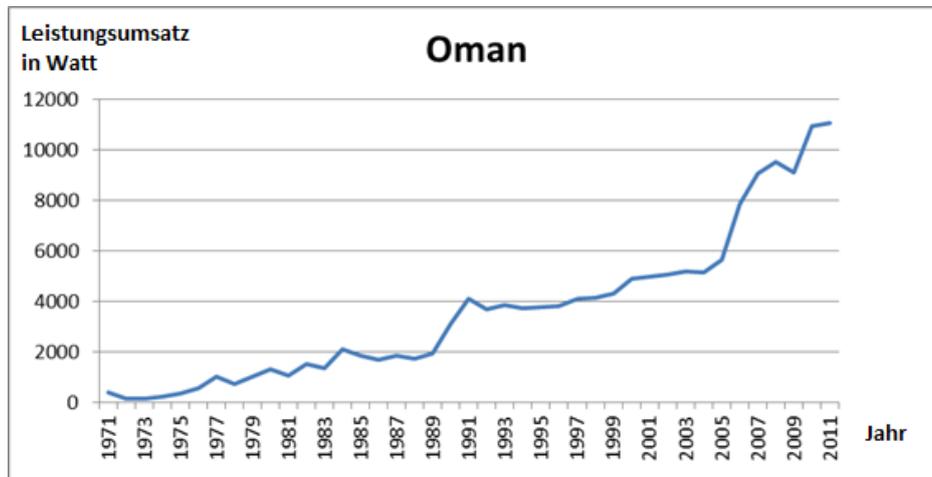


Abbildung 3.12: Der Leistungsumsatz pro Kopf im Oman stieg seit den 70er Jahren permanent an. Im Jahr 2011 betrug dieser knapp 11 000 Watt. (eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von [Wor]).

und 4% dauern bis das Niveau europäischer Industrieländer bzw. der USA erreicht würde?

Wir nehmen vereinfachend zunächst an, dass die Weltbevölkerung konstant bleibt:

$$\frac{2kW}{Pers.} \cdot 1,02^t = \frac{5kW}{Pers.} \quad (3.18)$$

$$\Rightarrow 1,02^t = \frac{5kW/Pers.}{2kW/Pers.} \quad (3.19)$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln(5) - \ln(2)}{\ln(1,02)} \approx 46a \quad (3.20)$$

Um einen globalen Leistungsumsatz von 10 kW pro Person bei 2%igem Wachstum zu erhalten, würde dies etwa 81 Jahre dauern, für 4% Wachstum entsprechend mit analoger Rechnung 23 bzw. 41 Jahre (für weitere Berechnungen mit anderen Wachstumsraten siehe Jacoby und Schwarz, [JS14] S.145).

Realistischer wird die Rechnung durch Einbeziehung der Tatsache, dass neben dem Energiebedarf des Einzelnen auch die Gesamtbevölkerungsanzahl anwächst. Die UNO schätzt in moderaten Modellen die untere Grenze der Weltbevölkerung Mitte des 21. Jahrhunderts auf etwa 9,5 Milliarden Menschen. Würden diese Menschen 5 bzw. 10 kW pro Person umsetzen, so ergäbe sich ein Gesamtleistungs-

umsatz von  $4,75 \cdot 10^{13}$  W bzw.  $9,5 \cdot 10^{13}$  W. Die entsprechenden Aufwuchszahlen lauten für zweiprozentiges Wachstum 55 bzw. 90 Jahre, für vierprozentiges Wachstum 28 bzw. 45 Jahre.

Eine solche Steigerung würde eine sehr große Menge an fossilen Brennstoffen verbrauchen, wodurch allein durch dieses Argument ein starker Ausbau von regenerativen Energien nahegelegt wird. Allerdings kann man hier schon vorweg nehmen, dass auch regenerative Technologien rund 10 Milliarden Menschen nicht mit 10000 Watt pro Person versorgen können (s. Kapitel 5). Ziel sollte es daher eher sein, alle Menschen an 2-3 Kilowatt anzupassen und eine weitere Anhebung des mittleren zivilisatorischen Bedarfs pro Kopf zu vermeiden.

Generell kann festgehalten werden, dass in der Menschheitsentwicklung große Erfindungen auch gleichzeitig große Energietreiber waren. Erfindungen wie etwa die Dampfmaschine, Dynamo und Generator oder der Computer brachten und bringen viele weitere Erfindungen und neue Geräte und Maschinen mit sich, die ebenfalls den Energiebedarf ansteigen lassen.

### 3.2.4 Kosmische Wachstumsgrenzen

Die Existenz vorhandener Grenzen soll nun mittels astronomisch-physikalischer Modellbetrachtungen veranschaulicht werden. Ein exaktes Ermitteln von verschiedenen Wachstumsgrenzen ist allgemein sehr komplex, da viele Rückkopplungseffekte zwischen Geo- und Biosphären zu berücksichtigen sind. Daher soll es nicht das Ziel sein, aufzuzeigen, wo genau diese Limits liegen, vielmehr soll deren Existenz vermittelt werden. Dafür ist es sinnvoll einen Bezugsrahmen zu wählen, in dem oben genannte gegenseitige Wechselwirkungen kaum eine bzw. keine Rolle spielen, was zum Beispiel bei planetaren Energieströmen der Fall ist. Dies macht eine Betrachtung aus der astronomischen Perspektive durchaus sinnvoll. Obwohl der Treibhauseffekt Folge des menschlichen Energieumsatzes, beispielsweise durch Nutzung fossiler Brennstoffe, ist, soll der durch Menschen verursachte Treibhauseffekt zunächst nicht betrachtet werden. Die angestellten Überlegungen sollen auf den Naturgesetzen der Thermodynamik aufbauen, so dass sie universellen Charakter erlangen.

Hinweise zu astronomischen bzw. kosmischen Wachstumsgrenzen lieferten schon Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts Freeman Dyson und Sebastian von Hoerner mit dem Resultat, dass eine Zivilisation über lange Zeit hinweg nicht mehr Energie umsetzen kann, als sie von der Sonne erhält (vgl. [Sch06]). Weiterhin

darf nicht die komplette ankommende Energie technische entwertet werden, da sonst keine Energie mehr für die Öko- und Geosysteme übrig bleibt – jedenfalls ist dies eine nachvollziehbare Forderung für alle Menschen, die sich die sogenannte natürliche Umgebung erhalten wollen. Es stellt sich nur die Frage: Sind diese kosmischen Wachstumsgrenzen noch in weiter Ferne oder näher als man denkt? Hierzu zunächst ein einfaches, hypothetisches Beispiel:

Man stelle sich vor, man würde sämtliche Energie, die von der Sonne abgestrahlt wird, einfangen. Eine „Möglichkeit“ dies zu erreichen, wäre der Bau einer sogenannten Dysonsphäre. Dies ist eine Kugel mit dem Radius von einer Astronomischen Einheit, also dem Abstand Erde-Sonne, welche komplett die Sonne einhüllt (s. Abb. 3.13). Dadurch würde die komplette Sonnenstrahlung eingefangen werden. Wann würde bei 4%igem Wachstum im Leistungsbedarf der Leistungsumsatz an der Dysonsphäre überschritten werden? Mit anderen Worten: Wann würden wir die gesamte Strahlungsleistung der Sonne benötigen? Wie würden die Lebensbedingungen in diesem Fall aussehen (Temperatur auf der Sphäre)?

Der Radius der Erdumlaufbahn ist eine Astronomische Einheit, der Radius der Sphäre beträgt also rund 150 Millionen Kilometer. Dadurch ergibt sich eine Oberfläche von:

$$O_{Dyson} = 4\pi r_{AU}^2 = 2,79 \cdot 10^{23} m^2 \quad (3.21)$$

Die Leuchtkraft der Sonne beträgt:

$$P_{Dyson} = L_{Sonne} = 3,8 \cdot 10^{26} W \quad (3.22)$$

Der jetzige Leistungsbedarf der Menschheit beträgt  $P_{Menschheit} = 1,6 \cdot 10^{13}$  Watt. Für einen jährlichen Anstieg um jeweils 4 % ergäbe sich die Leistung  $P$  nach  $t$  Jahren:

$$P = P_{Menschheit} \cdot 1,04^t \quad (3.23)$$

Für die Zeitspanne, bis zu der die Menschheit die komplette Strahlungsenergie der Sonne benötigen würde, ergibt sich also:

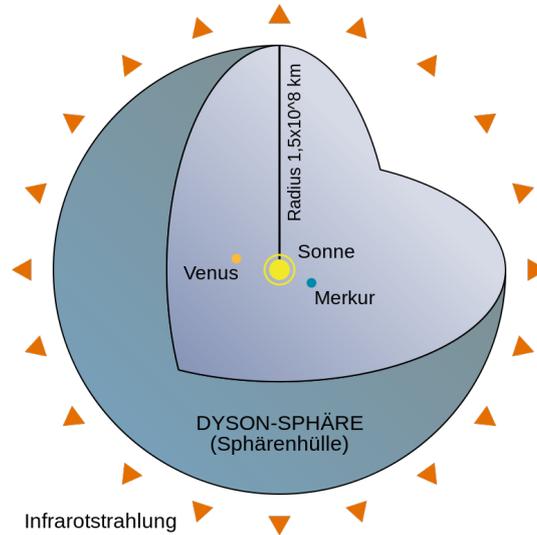


Abbildung 3.13: Dyson-Sphäre, deren Radius eine astronomische Einheit beträgt (Quelle: [Ed6]).

$$P_{Menschheit} \cdot 1,04^t = L_{Sonne} \quad (3.24)$$

$$\Rightarrow 1,04^t = \frac{L_{Sonne}}{P_{Menschheit}} \quad (3.25)$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln(L_{Sonne} - \ln(P_{Menschheit}))}{\ln(1,04)} \quad (3.26)$$

$$\Rightarrow t \approx 785a \quad (3.27)$$

Nach nur rund 785 Jahren hätte der menschliche Leistungsumsatz den der Sonne erreicht. An diesem Beispiel lässt sich leicht erkennen, dass selbst utopische Grenzen in historisch sehr kurzen Zeiträumen überschritten werden. Die Oberfläche der Sphäre würde jedoch schon lange vor Erreichen dieses Limits unbewohnbar sein. Dies lässt sich mit einer weiteren Rechnung veranschaulichen:

Betrachtet man die Dyson-Sphäre als schwarzen Strahler, so gilt das Stefan-Boltzmann-Gesetz, das die emittierte Strahlungsleistung

zur Oberflächentemperatur in Beziehung setzt (genauer hierzu siehe Kapitel 4):

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3.28)$$

mit der Fläche des Strahlers  $A$  und der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$ . Da die Dyson-Sphäre im Gleichgewichtsfall diejenige Leistung abstrahlt, die sie aufnimmt, lässt sich deren Temperatur ermitteln:

$$T = \sqrt[4]{\frac{L_{\text{Sonne}}}{\sigma \cdot O_{\text{Dyson}}}} = 394\text{K} \approx 121^\circ\text{C}. \quad (3.29)$$

Auch hier sieht man, dass bei einem solchen Leistungsumsatz das Bewohnen einer solchen Sphäre unmöglich ist.

Dieses Beispiel stellt zugleich eine absolute energetische Wachstumsgrenze unserer Zivilisation dar. Das angenommene Limit kann nicht überschritten werden.

Kann man diesem Szenario entgehen, in dem man den Planeten Erde verlässt und Menschen auf anderen Planeten ansiedelt, so wie es in einigen Science-Fiction-Filmen (beispielsweise „Interstellar“ aus dem Jahr 2014) vorgeschlagen wird? Sebastian von Hoerner (s.o.) hat eine ähnliche Situation, eine Reise zu „anderen bewohnten“ Planeten, in seinem Werk „The general Limits of Space Travel“ aus dem Jahr 1962 (zitiert in [Hoe64]) betrachtet:

Man nehme an, die reisende Besatzung würde über längere Zeit hinweg lediglich eine Schwerebeschleunigung von 1g vertragen, das Raumschiff mit einer kleinen Besatzung soll eine Gesamtmasse von rund 20 000 Tonnen haben. Da die Entfernungen zwischen der Erde und Planeten außerhalb des Sonnensystems sehr groß sind, ist eine Reisegeschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit notwendig, um diesen zeitlebens, zumindest aus Sicht der Besatzung des Raumschiffs, zu erreichen. Die Beschleunigung auf 10% der Lichtgeschwindigkeit benötigt eine Energie von ca.  $2,4 \cdot 10^{13}$  Kilowattstunden. Dies entspricht in etwa 17% des jetzigen jährlichen Energieumsatzes der Menschheit. Die Energie, die zum Beschleunigen des Raumschiffs auf höhere Geschwindigkeiten notwendig wäre (s. Tab. 3.1), wurde mit dem Energiebedarf der Menschen noch nicht

Geschwindigkeit in [ $\frac{v}{c}$ ]	Energiebedarf Schiff in [kWh]	Vielfaches Leistungs- umsatz Erde	Zeit bis zum Erreichen bei 2% (4%) in [a]
0,1	$2,4 \cdot 10^{13}$	0,17	-89 (-45)
0,5	$2,5 \cdot 10^{15}$	18	146 (74)
0,9	$7,7 \cdot 10^{16}$	550	319 (161)
0,99	$6,5 \cdot 10^{17}$	4603	1445 (730)

**Tabelle 3.1: Energiebedarf eines interstellaren Raumschiffes in Vergleich zum aktuellen Leistungsumsatzes der Menschheit**

überschritten. Allerdings werden diese Werte bei weiter ansteigendem Energieumsatz schon nach kurzen Zeiträumen erreicht. Um das Raumfahrzeug auf  $0,5c$  zu beschleunigen, wäre eine Energie nötig, welche ca. dem 18fachen des jetzigen Bedarfs entspricht. Bei 4%igem Anstieg im Energieumsatz, wird dieser Wert nach etwa 75 Jahren überschritten.

Die Idee von Hoerner lässt sich sinngemäß weiterführen, indem man zu höheren Geschwindigkeiten übergeht oder darüber nachdenkt, wie viele Menschen man von der Erde bringen könnte. Dies wird nachfolgend anhand eigener Rechnungen ausgeführt.

Aus energetischer Sicht macht es zurzeit offensichtlich keinen Sinn eine bemannte Raummission zu weit entfernten Planetensystemen zu starten. Interessant wird es allerdings, wenn die Fragestellung andersherum aufgezo-gen wird: Wann ergibt es Sinn die gesamte Menschheit mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ( $v = 0,99c$ ) von der Erde wegzuschicken, um andere Planeten zu besiedeln?

Will man 7 Milliarden Menschen mit obigen Bedingungen auf 99% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, ist eine Energie von  $3,8 \cdot 10^{26}$  Kilowattstunden notwendig. Dies entspricht in etwa dem  $2,7 \cdot 10^{12}$ -fachen des jetzigen Energiebedarfs pro Jahr. Betrachtet man nur die „Flugkosten“, ergibt eine solche Reise energetisch erst dann Sinn, sobald der Energieumsatz der Menschheit den Aufwand der Umsiedlung übersteigt. Nimmt man wieder 4%iges Wachstum im Energieumsatz an, so ergibt sich:

$$E_{Reise} = E_{Menschheit} \cdot 1,04^t \quad (3.30)$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln(E_{Reise}) - \ln(E_{Menschheit})}{\ln(1,04)} \quad (3.31)$$

$$\Rightarrow t \approx 730a \quad (3.32)$$

$$(3.33)$$

Vergleicht man diese Zeitangabe mit der aus dem vorangegangenen Beispiel, so erkennt man, dass beide in derselben Größenordnung liegen. Anders gesagt: Will man die komplette Menschheit umsiedeln, benötigt man eine Energiemenge in der Größenordnung, wie sie die Sonne abstrahlt.

Die obigen Szenarien sind natürlich sehr unrealistisch, die Zeiträume, die aus diesen utopischen Wachstumsgrenzen resultieren, scheinen sehr groß. Dennoch bleibt als zentrale Botschaft an Lernende: Es wird sinnlos sein, von der Erde zu fliehen, um ein zivilisatorisches Energieproblem zu lösen.

Realistischer wird es für Schüler, wenn man den direkten Bezug zur Erde und deren Grenzen herstellt. So kann zunächst als oberes Limit die von der Sonne auf die Querschnittsfläche der Erde ankommende Strahlung abgeschätzt werden.

Die Querschnittsfläche  $A_{Querschnitt} = \pi \cdot r_{Erde}^2$  der Erde entspricht einem Kugelschalenelement um die Sonne mit dem Radius  $R = 1AU$  (1 Astronomische Einheit, s. Dyson-Sphäre). Zusammen mit der Leuchtkraft  $L = 3,85 \cdot 10^{26}$  Watt der Sonne ergibt sich:

$$P_{Querschnitt} = \frac{L_{Sonne}}{A_{1AU}} \cdot A_{Querschnitt} \cdot (1 - A) \quad (3.34)$$

$$= \frac{L_{Sonne}}{A_{1AU}} \cdot \pi \cdot r_{Erde}^2 \cdot (1 - A) \quad (3.35)$$

$$= 1,2 \cdot 10^{17} W \quad (3.36)$$

(Berücksichtigt wurde hier noch die sogenannte Albedo  $A$ , sie gibt das Rückstreu- bzw. Reflexionsvermögen eines Körpers an und beträgt für die Erde im globalen Mittel  $A \approx 0,3$ ) Diese berechnete Leistungsangabe entspricht in etwa dem 10.000-fachen des jetzigen Leistungsumsatzes der Menschheit. Auch hier lässt

sich berechnen, nach welchem Zeitraum die komplette von der Sonne auf die Erde ankommende Strahlungsleistung benötigt werden würde:

$$P_{Menschheit} \cdot 1,04^t = P_{Querschnitt} \quad (3.37)$$

$$\Rightarrow 1,04^t = \frac{P_{Querschnitt}}{P_{Menschheit}} \quad (3.38)$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln(P_{Querschnitt}) - \ln(P_{Menschheit})}{\ln(1,04)} \quad (3.39)$$

$$\Rightarrow t \approx 229a \quad (3.40)$$

Bei 2%igem Wachstum erreicht man diese Grenze nach ca. 453 Jahren. Dieses Szenario entspricht prinzipiell dem Fall, dass die gesamte Erdoberfläche, inklusive aller Meere, mit Solarzellen mit dem Wirkungsgrad 1 bedeckt wäre. Hieran ist, gerade für Schüler, ersichtlich, dass die Zeiträume, um dieses Limit zu erreichen bzw. zu überschreiten, nicht mehr utopisch groß sind, sondern schon innerhalb der nächsten Generationen erreicht werden würden. Trotzdem scheint es, als ob für die jetzige Schülergeneration noch kein Handlungsbedarf notwendig sei, allerdings lassen sich die abgeschätzten Zeitspannen allein schon dadurch stark verkürzen, dass man beispielsweise technische Wirkungsgrade berücksichtigt oder kleinere Nutzflächen heranzieht, schließlich wird eine lebensfähige Zivilisation unmöglich den gesamten Planeten mit Solarzellen überdecken können.

### 3.2.5 Abschließende Betrachtung des Lernmoduls

Es wurde gezeigt, dass zivilisatorisches Wachstum im Energieumsatz durch verschiedene absolute obere Limits begrenzt wird. Diese werden bei anhaltendem Wachstum schon in relativ kurzen Zeiträumen überschritten. Wie kann also eine konkrete Lösung aussehen? Ein vermeintlicher Ansatz wäre es die Effizienz der vorhandenen Technik weiter zu steigern bzw. neue Technologien zu entwickeln, die immer weniger Energie benötigen. Jedoch wird oft nicht bedacht, dass eine „Produktion“, wie bereits erwähnt, nichts anderes ist als eine Energieumwandlung. Dies ist jedoch nur im Rahmen der Hauptsätze der Thermodynamik möglich, welche einen maximalen Wirkungsgrad erlauben (s. hierzu auch Kapitel 5).

Das heißt, die Effizienz kann nicht beliebig gesteigert werden. Selbst wenn also das Wachstum kurzzeitig durch Technologieentwicklung gebremst werden könnte, so würde es spätestens sobald man in die Nähe des maximalen Wirkungsgrades kommt, wieder erneut zum Tragen kommen.

Die in diesem Kapitel gemachten Abschätzungen und Beispiele zeigen deutlich, dass es prinzipiell nicht so weitergehen kann in der Entwicklung des Leistungsumsatzes der Menschheit wie bisher. Allerdings soll nicht versucht werden das menschliche Handeln durch Angstmachen und Aufzeigen von Gefahren zu verändern, wie es heutzutage in vielen populärwissenschaftlichen Büchern getan wird. Der beste Antrieb zu einer nachhaltigen Veränderung ist immer noch die eigene Einsicht, das Eigeninteresse und die Vernunft. Es stellt sich die Frage, ob der Mensch bzw. alle Menschen bereit sind, sich selbst einzuschränken, um aus dieser „Energiekrise“ herauszukommen. Gerade die westliche Bevölkerung scheint trotz unverkennbarer Anzeichen nicht zu realisieren, dass wir uns Grenzen des zivilisatorischen Wachstums nähern, in den westlichen Industriegesellschaften spüren wir bisher kaum einen Mangel an Gütern. Mit den Resultaten aus diesem Kapitel sind wir nun in der Lage weitere Abschätzungen zu Wachstumsgrenzen anzustellen, im Speziellen solche zu regenerativen und deponierten Energieträgern und -quellen.

### 3.2.6 Aufgaben zu Lernmodul 1

Die nachfolgenden Aufgaben verdeutlichen besonders eindringlich, welche Grenzen dem zivilisatorischen Wachstum gesetzt sind. Da die Dynamik der gegenwärtigen Gesellschaft nichts anderes zu kennen scheint, als die Lösung von Problemen durch Wachstum (Arbeitslosigkeit, Finanzsystem, Bildung usw.) darf man davon ausgehen, dass Lernende den Wachstumsgedanken als akzeptable Problembewältigungsstrategie tief verinnerlicht haben. Um dem entgegenzuwirken ist ein ganzes Set an von aufeinander abgestimmten Lehr- und Lernaufgaben erforderlich. Besonderer Wert wird auf die Darstellung der naturgesetzlich bedingten Unmöglichkeit permanenten Wachstums gelegt. Zur eindringlichen Verdeutlichung sollen insbesondere solche Beispiele dienen, bei denen physikalisch-mathematisch gezogene Konsequenzen einer Fortschreitung der gegenwärtigen Wachstumsideologie zu offenkundigen Absurditäten führen. Offene Aufgabenformate sollen die Aktivität der Lernenden fördern.

1. Man nehme folgendes Szenario an: Auf der Erde leben konstant 8 Milliar-

den Menschen, die Wachstumsrate im Energieumsatz betrage 2%. Was passiert, wenn sich nicht alle Menschen am Energiewachstum beteiligen?

- (a) Wie hoch ist die effektive Wachstumsrate, wenn sich 1 Milliarde Menschen vom Wachstum lossagen?
  - (b) In Deutschland beträgt der Leistungsumsatz im Mittel pro Person rund 5000 Watt, in den USA liegt dieser Wert bei etwa 10.000 Watt. Wie lange würde es dauern, wenn die restliche Welt bei 1,75%igem Wachstum bis zu diesen pro-Kopf-Werten anwachsen würde? Wäre eine solche Anpassung des Leistungsumsatzes sinnvoll?
2. Schätzen Sie ab, nach wie vielen Jahren der Leistungsumsatz der Menschheit bei zwei Prozentigem bzw. vier Prozentigem Wachstum das Potenzial der Gezeitenkraft überschreitet.
3. Rigel A ist im Sternbild Orion der hellste Stern und zwischen 650 und 900 Lichtjahren von der Erde entfernt. Seine Leuchtkraft ist rund 40 000 mal höher als die der Sonne.
- (a) Berechnen Sie die „Solarkonstante“ für einen Planeten mit Umlaufbahn um Riegel A, dessen mittlerer Abstand mit der Bahn von der Erde um die Sonne vergleichbar ist (die Größe von Rigel A von 62 Sonnenradien und die beiden anderen Sterne des Mehrfachsystems sollen hier vernachlässigt werden).
  - (b) Nach wie vielen Jahren erreicht der Leistungsumsatz der Menschheit bei vier Prozent Wachstum die Leuchtkraft von Rigel A bzw. der Sonne? Vergleichen Sie beide Ergebnisse miteinander.
4. (a) Angenommen man könnte die komplette Sonnenenergie, welche die gesamte Erdoberfläche in drei Stunden empfängt, verlustfrei speichern. Wie lange könnte die Menschheit bei ihrem aktuellen Leistungsumsatz von der gespeicherten Energie zehren?
- (b) Wann wird sich der gegenwärtige Leistungsumsatz der Menschheit verdoppelt haben, wenn er zukünftig weiter so anwachsen würde, wie in den letzten Jahren?

# **Kapitel 4**

## **Strahlungshaushalt, Strahlungsantrieb und Gleichgewichtstemperatur**

### **4.1 Fachdidaktische und fachwissenschaftliche Vorüberlegungen zum Strahlungshaushalt der Erde - Ziele des Lernmoduls**

In Kapitel 3 wurde zunächst nur diskutiert, wann einige Wachstumsgrenzen erreicht werden würden. Die Auswirkungen auf die Erde bzw. die Geo- und Ökosysteme haben bislang noch keine Rolle gespielt. Um diese genauer und zielgerichtet in den Blick zu nehmen, müssen vorab einige didaktische und fachwissenschaftliche Vorüberlegungen angestellt werden.

#### **4.1.1 Der Budgetgedanke als hilfreiches Konzept zur Untersuchung globaler Energie- und Stoffströme**

Will man Energie- und Stoffströme im System „Erde“ untersuchen, so kommt man ohne Zweifel um den Bereich der Klimatologie nicht herum. Ihr Gegenstand, also das Klimasystem, entzieht sich aber den klassischen Methoden der Experimentalphysik. Man kann Klimagrößen messen, mit dem Klima allerdings nicht

experimentieren. So steht prinzipiell vermehrt die Untersuchung von Daten als Laborversuche im Vordergrund. Dies ist für Lernende, die durch den klassischen Physikunterricht auf die Durchführung von Experimenten „konditioniert“ sind, eine prinzipiell neuartige Erkenntnissituation, die ihnen bewusst gemacht werden muss. Als Anknüpfungspunkt zu Bekanntem kann man dabei herausstreichen, dass auch die Klimatologie die Nutzung von Methoden der Physik, speziell der theoretischen und der angewandten Physik, kennt, ihr Methodenrepertoire ist lediglich weiträumiger aufgestellt als es die Schulphysik vermittelt (vgl. [BKRS01], S 311).

Da die Geosysteme im permanenten Austausch von Stoffen und Energie untereinander stehen und auch das planetare System „Erde“ sich im Energieaustausch mit der näheren astronomischen Umgebung befindet, beispielsweise stetig Energie von der Sonne empfängt, ist der Budget- oder auch Haushaltsgedanke hilfreich, um solche Vorgänge genauer zu untersuchen. Dadurch wird es ermöglicht, „Erhaltungs- und Umwandlungseigenschaften der Stoffe zusammen mit ihren Transportgrößen zu quantifizieren und miteinander in Beziehung zu setzen“ (s. [BKRS01], S 311). Ebenso möglich ist dies für Energieströme, ein Aspekt, der in diesem Kapitel deutlich im Vordergrund steht.

Als einfaches Beispiel für dieses Haushaltsprinzip lässt sich eine Badewanne heranziehen. Diese ist mit einer gewissen Wassermenge  $m$  in der Einheit  $kg$  befüllt, sie besitzt einen Zufluss  $Z$  und einen Abfluss  $A$  (s. Abb. 4.1). Die Flüsse, welche die zu- bzw. abfließende Menge pro Zeiteinheit angeben, haben die Einheit  $\frac{kg}{s}$ . Um die zeitliche Änderung der Wassermenge zu erhalten, muss man die Differenz von  $Z$  und  $A$  bilden:

$$\dot{m} = Z - A. \quad (4.1)$$

Durch diese Formel werden eine Zustandsgröße, hier die Wassermenge, mit Flussgrößen, hier dem Zu- und Abfluss, verknüpft.

Allerdings ist es durchaus möglich, dass aus dem System selbst ein „eigener Beitrag“ zur Freisetzung einer Substanz oder durch Freiwerden gespeicherter Energie kommt. Diese interne Quelle soll im Folgenden  $Q$  genannt werden. Im Bild der Badewanne ist diese sogenannte Quellstärke zu veranschaulichen, in dem man an kondensierendes ( $Q > 0$ ) oder verdampfendes ( $Q < 0$ ) Wasser am Badewannenrand denkt.

Berücksichtigt man die ebenso, so ergibt sich die Beziehung:

$$\dot{m} + (A - Z) - Q = 0. \quad (4.2)$$

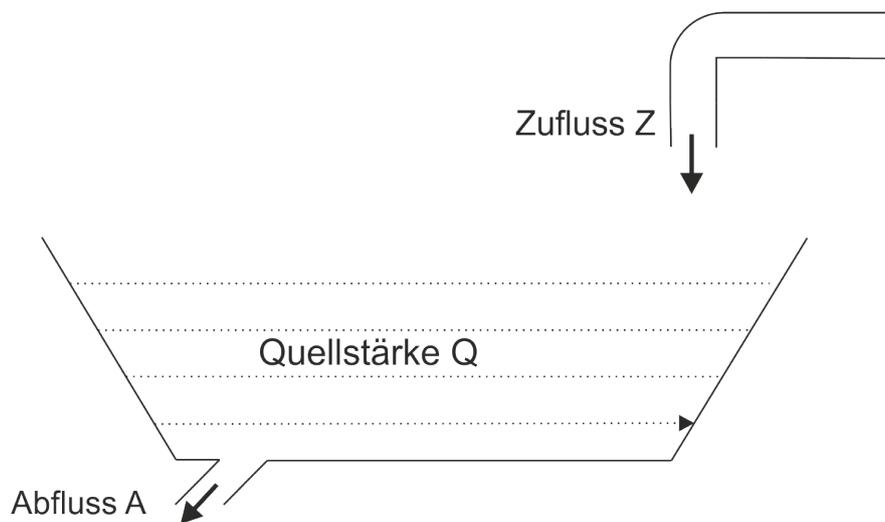


Abbildung 4.1: Die Badewanne als einfaches Beispiel für den Budgetgedanken (angelehnt an [BKRS01], S.337).

Mit dieser Gleichung lassen sich viele Fälle veranschaulichen:

- Für  $A - Z = 0$  sind Zu- und Abfluss gleich groß. Ist zusätzlich  $Q = 0$ , so ist die Änderungsrate von  $m$  ebenso 0. Das System hat einen stationären Zustand erreicht.
- Ist  $A > Z$  für  $Q = 0$ , so ist  $\dot{m} < 0$ . Das heißt: die Wassermenge nimmt ab. Für  $A < Z$  ergibt sich analog eine Pegelzunahme (vgl. [BKRS01], S 338f).
- Ist  $A - Z = 0$  und  $Q > 0$ , so erhält man  $\dot{m} > 0$ . Die Wassermenge würde also trotz ausgeglichenem Zu- und Abfluss zunehmen.

Wir werden in verschiedenen Kapiteln auf diese prinzipiellen Fälle zurückkommen.

Will man die obige Analogie auf Klimagrößen bzw. -elemente übertragen, muss zunächst verdeutlicht werden, welche Größen Zustandsgrößen und welche Flussgrößen sind. Hierzu ist folgende Tabelle gedacht, die einige für unsere Zielsetzung bedeutsame Größen enthält:

Zustandsgröße	Größe	Einheit
Energie	Temperatur	$K$
	Potentielle Energie	$J$
	Kinetische Energie	$J$
Impuls	Wind	$\frac{m}{s}$
	Strömungen im Ozean	$\frac{m}{s}$
<b>Flussgrößen</b>		
Wasserflüsse	Niederschlag	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$
Energieflüsse	Wärmefluss	$\frac{W}{m^2}$

Tabelle 4.1: Beispiele für einige wichtige Haushaltselemente

### 4.1.2 Herleitung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

Für viele Zwecke ist die gesamte Strahlungsflussdichte bzw. die Gesamtleistung pro Flächeneinheit der Wärmestrahlung interessant. Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Energiedichte bei einer gewissen Temperatur.

Will man nun die gesamte Strahlungsflussdichte erhalten (vgl. einschlägige Literatur), muss man über alle emittierten Wellenlängen summieren bzw. integrieren:

$$\rho = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda \quad (4.3)$$

Durch Substitution von  $x := \frac{hc}{k\lambda T}$  und  $\frac{dx}{d\lambda} = -\frac{hc}{kT\lambda^2} = -\frac{x}{\lambda} = -\frac{kx^2 T}{hc}$  ergibt sich:

$$\rho = \frac{8\pi k^4 T^4}{h^8 c^2} \int_0^{\infty} \frac{x^3}{\exp(x) - 1} dx = \frac{8\pi k^4}{h^8 c^2} \frac{\pi^4}{15} \cdot T^4. \quad (4.4)$$

Der Proportionalitätsfaktor ist die sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante:

$$\sigma := \frac{8\pi k^4}{h^8 c^2} \frac{\pi^4}{15} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}. \quad (4.5)$$

Damit erhält man das sogenannte Stefan-Boltzmann-Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen emittierter Strahlungsleistung und der Temperatur pro Einheitsfläche des emittierenden schwarzen Körpers herstellt:

$$P = \sigma \cdot T^4 \quad (4.6)$$

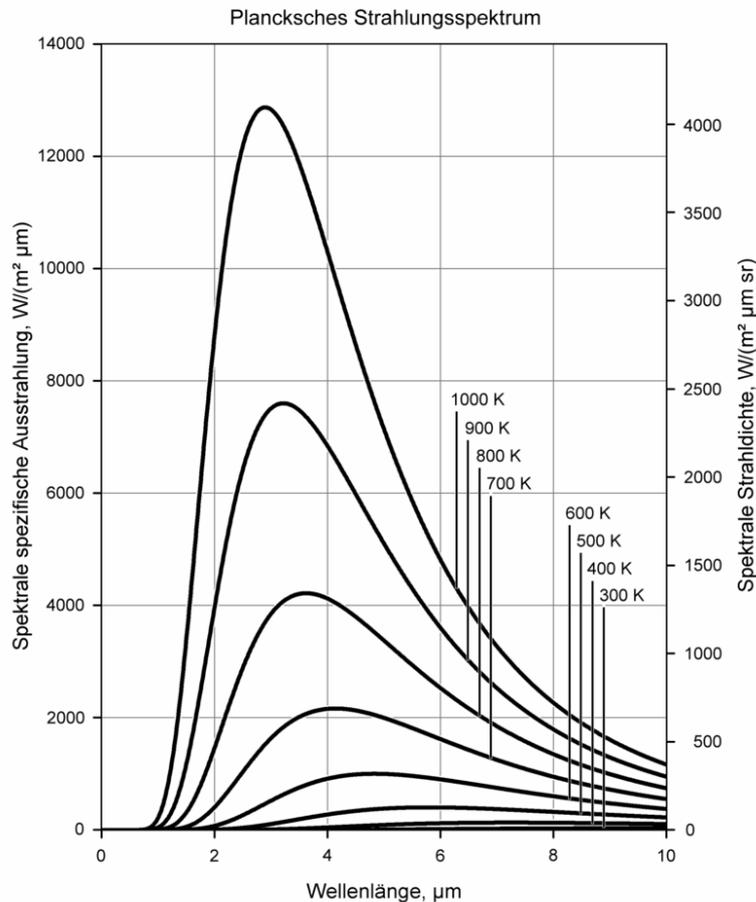


Abbildung 4.2: Plancksches Strahlungsspektrum (Quelle: [Pla]).

Da fast alle in der Natur vorkommenden Materialien annähernd schwarz strahlen, ist dieses Gesetz eine gute Möglichkeit, Abschätzungen betreffend die Temperatur bei bekannter Strahlungsleistung oder umgekehrt anzustellen (vgl. [Kra04]).

Historisch gesehen ist dieses Gesetz anders entwickelt worden. Da Max Planck sein Strahlungsgesetz erst im Jahre 1900 angab, kann das Stefan-Boltzmann-Gesetz nur auf einem anderen Wege aufgefunden worden sein.

Joseph Stefan analysierte in seiner Arbeit „Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur“ von 1879 die Messreihen von Dulong und Petit sowie die von de la Provostaye und Desains. Diese stimmten gut mit seiner Annahme überein, dass die Flächenleistung proportional zur vierten Potenz der Temperatur sei. Grund für diese Annahme waren Versuche von John Tyndall, welcher

die Strahlung von glühenden Platindrähten untersuchte. Die Intensität nahm von einer schwachen Rotglut (ca. 525°C) bis hin zur Weißglut (ca. 1200°C) um das 11,7-fache zu, das Verhältnis der Temperaturen in der vierten Potenz liegt bei 11,6 (vgl. [Sch78], S. 30).

Ludwig Boltzmann leitete 1884 unter Hinzunahme der Maxwellschen Elektrodynamik das Stefan-Boltzmann-Gesetz dann theoretisch her:

Maxwell zeigte in seiner elektromagnetischen Lichttheorie, dass Licht bzw. strahlende Wärme bei senkrechtem Auftreffen auf eine Fläche einen Druck ausübt. Man nehme einen absolut leeren Raum an, dessen Wände undurchlässig für Wärmestrahlung und von einer Temperatur  $T$  umgeben sei. Die infolge der Wärmestrahlung im Raum enthaltene Energie wird mit  $u$  bezeichnet<sup>1</sup>. Da nicht alle Wärmestrahlungen senkrecht auf die Gefäßwände auftreffen, kann man sich eine Analogie aus der Gastheorie zur Hilfe nehmen. Nimmt man an, dass je  $\frac{1}{3}$  der Wärmestrahlungen sich parallel zu den gedachten Koordinatenachsen fortpflanzen, so entspricht dieses Resultat am besten dem Mittelzustand. Auf jede Seitenfläche wirkt dann je ein Drittel der gesamten Strahlung. Daraus folgt für den Druck auf eine Flächeneinheit:

$$p = \frac{1}{3}u. \quad (4.7)$$

Das gleiche Resultat erhält man, wenn man Komponentenweise rechnet und über alle möglichen Auftreffwinkel der Strahlung integriert (vgl. [Sch78], S. 153). An dieser Stelle soll allerdings die obige einfache Betrachtung genügen.

Boltzmann entdeckte in einer seiner Arbeiten eine weitere Beziehung zwischen dem Strahlungsdruck  $p$  und der Energie  $u$ :

$$p = T \int u \frac{dT}{T^2} \text{ mit deren Differential } T dp - p dT = u dT \text{ (hier ohne Herleitung).}$$

Mit der oben gezeigten Beziehung  $p = \frac{1}{3}u$  folgt:

$$T \frac{du}{3} = 4u \frac{dT}{3} \text{ bzw. } \frac{du}{u} = 4 \frac{dT}{T}. \quad (4.8)$$

---

<sup>1</sup>In der originalen Arbeit wurde die Energie mit  $\Psi$  und der Strahlungsdruck (s.u.) mit  $f$  bezeichnet.

Durch Integration erhält man das bekannte Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$\int \frac{du}{u} = \int 4 \frac{dT}{T} \quad (4.9)$$

$$\Rightarrow \ln u = 4 \ln T + c \quad (4.10)$$

$$\Rightarrow u = \exp(\ln T^4 + c) \quad (4.11)$$

$$\Rightarrow u = \sigma \cdot T^4. \quad (4.12)$$

$$(4.13)$$

Die Integrationskonstante  $\sigma$  musste zunächst experimentell bestimmt werden. Durch die Quantenmechanik zeigte sich, dass sie sich aus fundamentalen Naturkonstanten zusammensetzt (s. Gleichung 4.5).

Wie sowohl die experimentellen als auch die theoretischen Herleitungen lehren, kann man das Stefan-Boltzmann-Gesetz offenbar nicht auf sehr elementare Weise aufspüren. Insbesondere im Schulunterricht verbleibt nur die Möglichkeit, den Zusammenhang zu veranschaulichen und über einfache Experimente nachzuvollziehen.

## 4.2 Lernmodul 2

### 4.2.1 Möglichkeiten des Wärmetransports

Wärme kann auf drei verschiedene, oft gleichzeitig wirkende Weisen übertragen werden. Da der Wärmetransport einhergeht mit Energieübertragung, müssen diese Vorgänge zunächst kurz betrachtet werden.

#### Wärmeleitung

Die Wärmeleitung lässt sich anhand der Abbildung 4.3 sehr gut veranschaulichen. Durch Erwärmung eines Teils eines Körpers bewegen sich die Atome bzw. Moleküle dort schneller. Diese geben ihre kinetische Energie an benachbarte Teilchen weiter, wodurch sich auch deren Geschwindigkeit erhöht. Da die mittlere quadratische Geschwindigkeit der Teilchen proportional zur Temperatur ist, steigt auch

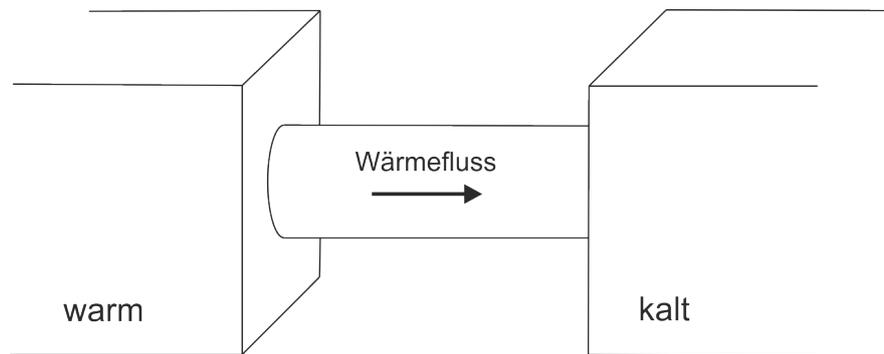


Abbildung 4.3: **Wärmeleitung zwischen zwei Flächen mit unterschiedlichen Temperaturen.**

diese an usw. Wärmeleitung kann man sich also als Effekt von molekularer Bewegung und „molekulare[n] Kollisionen“ vorstellen (vgl. [GE10], S. 675).

Damit Wärmeleitung überhaupt stattfinden kann, muss neben dem direkten Kontakt der Materie eine Temperaturdifferenz vorhanden sein. Wie gut ein Material Wärme leitet, ist materialabhängig.

### **Konvektion**

Flüssigkeiten und Gase sind keine guten Wärmeleiter, dennoch sind sie in der Lage Wärme mittels Konvektion zu transportieren. Damit ist ein Prozess gemeint, in dem Wärme durch die Bewegung von Teilvolumina von einem Ort zum anderen verbracht wird. Hier geben die Moleküle ihre Energie nicht an benachbarte Moleküle weiter, sondern sie werden vielmehr gemeinsam mit ihren benachbarten Molekülen in einem größeren Materiepaket über eine relativ große Distanz verschoben.

Am Beispiel eines Kochtopfes: an seinem heißen Boden erhitzt sich das Wasser, dehnt sich dabei aus und steigt in Folge seiner dadurch verminderten Dichte aufgrund des Auftriebes nach oben. Gleichzeitig wird es wegen der Massenerhaltung kontinuierlich durch kühleres, von oben nachströmendes Wasser ersetzt. Dadurch baut sich eine Konvektionsströmung auf. Da der Auftrieb schwerkraftabhängig ist, kann es nur in einem äußeren Schwerfeld zu Konvektionsbewegungen kommen.

Beispiele für konvektive Strömungen sind das Erhitzen von Wasser in einem Kochtopf (s. Abb. 4.4), die Heizung von Räumen durch Heizkörper oder der Land-See-Wind wie auch andere Wind- und Wetterphänomene.

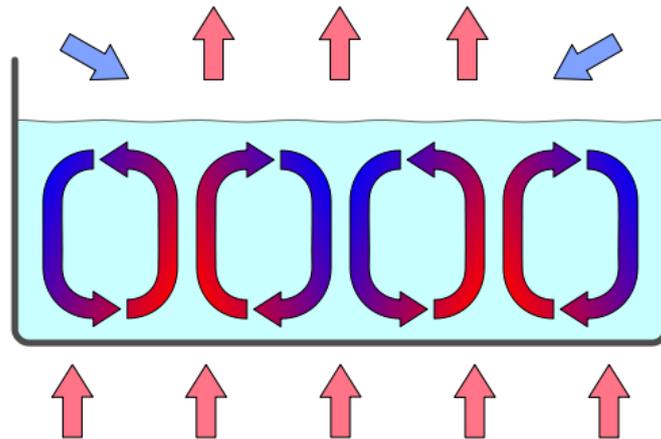


Abbildung 4.4: **Konvektion in einem Kochtopf** (Quelle:[Eyr]).

Dabei ist zu beachten, dass es gerade in der Atmosphäre viele Fälle von sogenannter erzwungener Konvektion gibt. Das bedeutet, dass Wärmetransport nicht in Folge von Schwerkraftkonvektion erfolgt, sondern weil beispielsweise ein horizontaler Wind über eine erwärmte Bodenschicht strömt, was letztlich Wärmeentzug im Boden und Wärmeeintrag in die Luft hervorruft.

### Wärmestrahlung

Während bei der Wärmeleitung und der Konvektion die Anwesenheit von Materie notwendig ist, kann sich Wärmestrahlung auch über den leeren Raum hinweg ausbreiten. So ist es möglich, dass die Sonnenenergie durch den Weltraum hindurch zur Erde übertragen werden kann oder dass ein Lagerfeuer trotzdem seitlich wärmt, obwohl die konvektive Luft nach oben entweicht. Die Wärmestrahlung basiert auf elektromagnetischen Wellen. Die Strahlungsleistung bzw. -rate ist proportional zur vierten Potenz der Temperatur und proportional zur Fläche des emittierenden Objekts. Hinzu kommt eine materialspezifische Zahl, der sogenannte Emissionsgrad  $e$ , welcher zwischen 0 (bei hell glänzenden Flächen) und 1 (bei absolut dunklen Flächen, z.B. Ruß) liegt:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A \cdot T^4 \quad (4.14)$$

Dies ist das in Kapitel 3 bereits verwendete Stefan-Boltzmann-Gesetz. Für die genaue Herleitung siehe Kapitel 4.1.2.

Betrachtet man einen Körper mit der Temperatur  $T_1$ , so emittiert dieser eine gewisse Strahlung  $e\sigma A \cdot T_1^4$ . Hat die Umgebung des Körpers eine Temperatur  $T_2$  (und einen hohen Emissionsgrad), so emittiert diese eine Strahlungsleistung proportional zu  $T_2^4$ , was gleichbedeutend damit ist, dass der Körper die Strahlungsleistung  $e\sigma A \cdot T_2^4$  absorbiert. Daraus ergibt sich die Nettostrahlungsleistung:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.15)$$

Das Gleichgewicht ist genau dann erreicht, wenn sich die Temperaturen ausgeglichen haben, also wenn  $T_1 = T_2$ . Die Erfahrung lehrt, dass dann keine Wärme mehr ausgetauscht wird. Dadurch ergibt sich, dass der Proportionalitätsfaktor  $e\sigma A$  sowohl für die Emission als auch für die Absorption der gleiche sein muss. Dies stimmt mit der Alltagserfahrung überein, dass ein guter Emittor auch ein guter Absorber ist. Befinden sich Körper und Umgebung in einem Gleichgewicht, so strahlen sie dennoch weiter wechselseitig Energie ab.

### 4.2.2 Das Wiensche Verschiebungsgesetz und die Leuchtkraft der Sonne

Betrachtet man die von einem Schwarzen Körper abgegebene Wärmestrahlung, so fällt auf, dass sich diese aus unterschiedlichen Wellenlängen mit unterschiedlicher Intensität zusammensetzt (s. Abb. 4.2). Die genaue Verteilung folgt aus dem Planckschen Strahlungsgesetz, sie ist ebenso temperaturabhängig. Jede dieser Kurven besitzt ein deutliches Maximum, welches sich bei höheren Temperaturen hin zu kürzeren Wellenlängen verschiebt.

Wilhelm Wien konnte 1893 mit thermodynamischen Überlegungen sein Verschiebungsgesetz herausfinden. Er stellte fest, dass diejenige Wellenlänge, bei der die Intensität maximal ist, multipliziert mit der absoluten Temperatur der strahlenden Fläche, konstant ist:

$$\lambda_{max} \cdot T = k_{Wien} \quad (4.16)$$

mit  $k_{Wien} = 2897,8 \mu m \cdot K$  (vgl. z.B. [TBD14]).

Dieses Wiensche Verschiebungsgesetz kann beispielsweise dazu genutzt werden, die Leuchtkraft der Sonne herauszufinden:

Misst man das Spektrum der Sonne und die Lage des Intensitätsmaximums, so liegt dieses bei etwa  $\lambda_{max} = 500 nm$  (s. Abb. 4.5). Die Einkerbungen im Vergleich

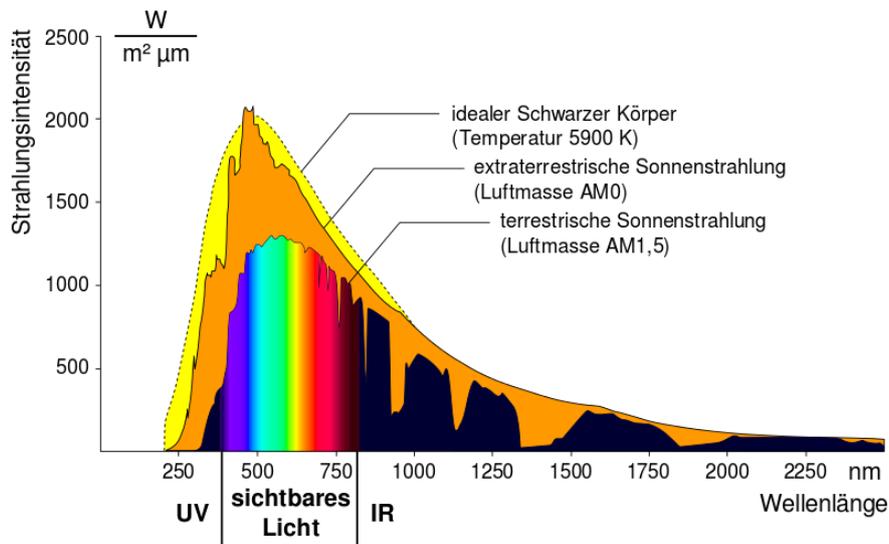


Abbildung 4.5: **Intensität der Sonnenstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge (Quelle: [Deg]).**

zum Spektrum eines schwarzen Körpers (gelbes Spektrum) entstehen durch Absorptionslinien und -banden. Einige Wellenlängen werden durch Atome und Moleküle, wie etwa Wasserstoff, Helium, Kohlenstoffdioxid, Ozon usw., in der Atmosphäre der Sonne und der Erde absorbiert.

Betrachtet man die Sonne näherungsweise als Schwarzen Strahler, so erhält man mit Hilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes die Oberflächentemperatur:

$$T = \frac{2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{max}}} = 5796\text{K}. \quad (4.17)$$

Nutzt man nun das Stefan-Boltzmann-Gesetz, welches die Temperatur mit der Strahlungsleistung in Verbindung setzt, so erhält man:

$$P = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \approx 4\pi \cdot r_{\text{Sonne}}^2 \cdot 1 \cdot \sigma \cdot 5796\text{K} = 3,895 \cdot 10^{26}\text{W}. \quad (4.18)$$

Dieser Wert weicht vom Literaturwert  $L_{\text{Sonne}} = 3,846 \cdot 10^{26}\text{W}$  um etwa 1% ab. Auch wenn die Sonne kein Schwarzer Strahler ist, so kann diese Näherung im Rahmen unserer Zielsetzung sehr gut genutzt werden.

### 4.2.3 Der Strahlungsantrieb und seine Auswirkungen

Wir verzichten an dieser Stelle zunächst auf eine Betrachtung anthropogener Einflüsse auf den Treibhauseffekt.

Wie in Kapitel 3.2.4 hergeleitet, gilt für die auf der Erde ankommende und dort umgesetzte Strahlungsleistung folgende Formel:

$$P_{\text{Querschnitt}} = \frac{L}{A_{1\text{AU}}} \cdot A_{\text{Querschnitt}} \cdot (1 - A) \quad (4.19)$$

$L$  gibt, wie bereits bekannt, die Leuchtkraft der Sonne an,  $A_{1\text{AU}}$  die Oberfläche einer Sphäre mit Radius einer Astronomischen Einheit,  $A_{\text{Querschnitt}}$  die Querschnittsfläche der Erde und  $A$  die mittlere sphärische Albedo der Erde.

Für die Abstrahlung von der gesamten Erdoberfläche gilt das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Da die Erde sich im Strahlungsgleichgewicht mit der Umgebung befindet (dies ist leicht ersichtlich, da die Temperatur in den letzten Jahrtausenden näherungsweise konstant geblieben ist), muss ein Gleichgewicht zwischen Ein- und Austrag herrschen.

$P = A_{\text{Oberfläche}} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$  mit der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$  und dem Korrekturfaktor  $\epsilon$ , da die Erde kein schwarzer Strahler ist.

$$\Rightarrow \frac{L}{A_{1\text{AU}}} \cdot (1 - A) \cdot \pi \cdot R_{\text{Erde}}^2 = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot 4\pi \cdot R_{\text{Erde}}^2 \quad (4.20)$$

$$\Rightarrow \frac{L}{A_{1\text{AU}}} \cdot (1 - A) = 4 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.21)$$

Der Ausdruck  $s = \frac{L}{A_{1\text{AU}}} \approx 1370 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  wird auch als Solarkonstante  $s$  bezeichnet (Dies ist streng genommen keine Konstante, da dieser Wert zeitlich variabel ist, vgl. [Sch08]). Nach  $T$  umgestellt, ergibt sich:

$$\Rightarrow T^4 = \frac{s \cdot (1 - A)}{4 \cdot \sigma} \quad (4.22)$$

$$\Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{s \cdot (1 - A)}{4 \cdot \sigma}} \quad (4.23)$$

So erhält man für die Erde eine mittlere Oberflächentemperatur von etwa 255 Kelvin, was  $\vartheta = -18^\circ\text{C}$  entspricht. Offensichtlich ist es auf der Erde nicht so kalt, berücksichtigt wurde hier allerdings nicht die Atmosphäre der Erde, welche ebenfalls ein gewisses Reflexions- und Absorptionsvermögen besitzt und insbesondere den natürlichen Treibhauseffekt bewirkt (s. hierzu Kapitel 4.2.4).

Wie man an diesem funktionalen Zusammenhang erkennt, besteht eine Zuordnung zwischen der Temperatur auf der Erdoberfläche, der Solarkonstante  $s$  und der Albedo  $A$ . Ändert sich das Reflexionsvermögen der Erde, so ändert sich ebenfalls die Temperatur, gleiches gilt für die Solarkonstante, welche, wie bereits erwähnt, keine wirkliche Konstante im eigentlichen Sinn ist.

Wie stark wirken sich Veränderungen der oben genannten Parameter auf die Temperatur aus? Bei der folgenden Berechnung soll die Atmosphäre aus didaktischen Gründen keine Rolle spielen, da das Ergebnis in derselben Größenordnung liegt wie unter Einbeziehung der Atmosphäre.

Um die Auswirkung einer realistischen Solarkonstantenänderung zu verdeutlichen, ist es naheliegend, das totale Differenzial zu betrachten:

$$\Delta T = \frac{dT}{ds} \Delta s \quad (4.24)$$

Mit Gleichung (4.23) folgt:

$$\Delta T = \frac{1}{4} \left( \frac{(1-A)s}{4\sigma} \right)^{-\frac{3}{4}} \cdot \frac{(1-A)s}{4\sigma} \Delta s \quad (4.25)$$

$$= \frac{1}{16\sigma} \left( \frac{(1-A)s}{4\sigma} \right)^{-\frac{3}{4}} \cdot (1-A) \Delta s \quad (4.26)$$

Setzt man für die Konstanten  $A$ ,  $\sigma$  und  $s$  entsprechende Zahlenwerte ein, so ergibt sich für die Temperaturänderung:

$$\Delta T = 0,05 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \cdot \Delta s \quad (4.27)$$

Eine Zunahme der Solarkonstante würde also mit der Hebelwirkung 0,05 zu einer mittleren Temperaturerhöhung in der Erdatmosphäre führen. Neben den soeben identifizierten Größen  $A$  und  $s$  können auch andere Einflussfaktoren die mittlere

atmosphärische Temperatur verschieben, beispielsweise eine erhöhte Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre oder Abschattungswirkungen von Aerosolpartikeln (z.B. Kondensstreifen bei Flugzeugen). Um solche Effekte vereinheitlichend zu beschreiben, ist es sinnvoll, einen weiteren Begriff zu definieren: den **Strahlungsantrieb**. Dieser ist ein Maß für die Veränderung der Leistungsbilanz der Erde je Quadratmeter Erdoberfläche durch verschiedene Einflussfaktoren.

Wie oben bereits erwähnt, empfängt die Erde pro Quadratmeter Querschnittsfläche eine Leistung in Höhe der Solarkonstante  $s = 1370 \frac{W}{m^2}$ . Um einen globalen Mittelwert des Strahlungseintrags  $S$  pro Quadratmeter zu erhalten, muss man diesen Leistungseintrag auf die gesamte Erdoberfläche verteilen:

$$S = \frac{\pi R_{Erde}^2}{4\pi R_{Erde}^2} \cdot s = \frac{1}{4} \cdot s. \quad (4.28)$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Albedo, so erhält man:

$$S = \frac{1}{4} \cdot (1 - A) \cdot s. \quad (4.29)$$

Den Strahlungsantrieb  $\Delta s$ , also eine Änderung im Strahlungseintrag  $S$ , kann man nun, um im obigen Beispiel fortzufahren, als Änderung der Solarkonstanten auffassen. Daraus folgt:

$$\Delta S = \frac{1}{4} \cdot (1 - A) \cdot \Delta s = 0,175 \Delta s. \quad (4.30)$$

Die Beziehung für die Temperaturänderung lässt sich nun mit Hilfe des Strahlungsantriebs beschreiben (vgl. [Sch08], S. 124):

$$\Delta T = 0,3 \frac{m^2 K}{W} \cdot \Delta S. \quad (4.31)$$

Durch diese Beziehung ist es möglich, zusätzliche Beiträge in der Energiebilanz der Erde und die daraus resultierenden Temperaturänderungen zu erfassen, beispielsweise solche durch deponierte Energieträger wie Kohle und Öl, aber auch Kernfission und -fusion.

Das Intergovernmental Panel of Climate Change, kurz IPCC, hat im 5. Assessment Report einen Strahlungsantrieb von etwa  $2,3 \frac{W}{m^2}$  im Vergleich zum Jahr 1750 festgestellt. Dies würde einer Änderung der Solarkonstante um  $13,1 \frac{W}{m^2}$  entsprechen,

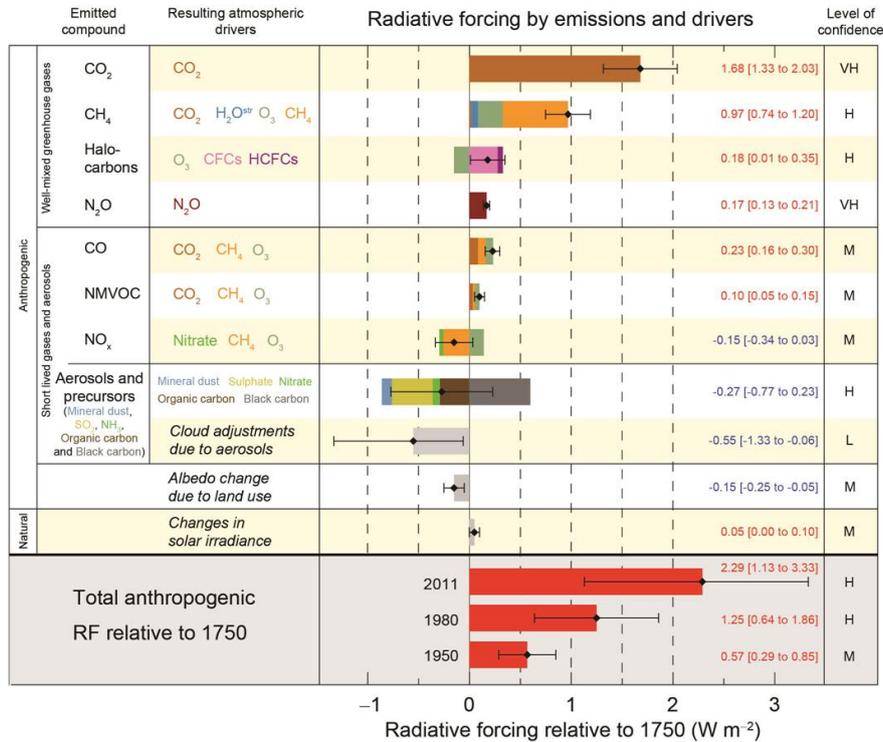


Abbildung 4.6: **Verschiedene Strahlungsantriebe (Radiative Forcing) unterteilt in anthropogene und natürliche Antriebe (Quelle: [IPCb]).**

was nach unserem Modell gleichbedeutend ist mit einer mittleren Temperaturerhöhung um  $\Delta T = 0,7$  Kelvin. Das ausgesprochene Ziel bzw. die Forderungen des Weltklimarates laufen daraus hinaus, die Steigerung bis Ende des Jahrhunderts auf maximal 2°C zu begrenzen. Diese Temperaturdifferenz, so wird angenommen, wäre gerade noch für die Ökosysteme verträglich. Dies würde dann einem Strahlungsantrieb von  $6,7 \frac{W}{m^2}$  bzw. einer gedachten Erhöhung der Solarkonstanten um  $40 \frac{W}{m^2}$  entsprechen, was gleichbedeutend mit einem Anstieg der Leuchtkraft der Sonne um etwa 3% wäre (s. [Sch09a]). Eine solche Steigerung mag gering erscheinen, die Auswirkungen auf der Erde können jedoch gravierend sein. Hinzu kommt, dass die auf der Erde vorhandenen Rückkopplungseffekte nicht trivial sind, d.h. kleine Variationen können weitreichende Folgen mit sich führen und sich weiter verstärken. Solche Rückkopplungen werden im Konzept des Strahlungsantriebes des IPCC aber gar nicht erfasst.

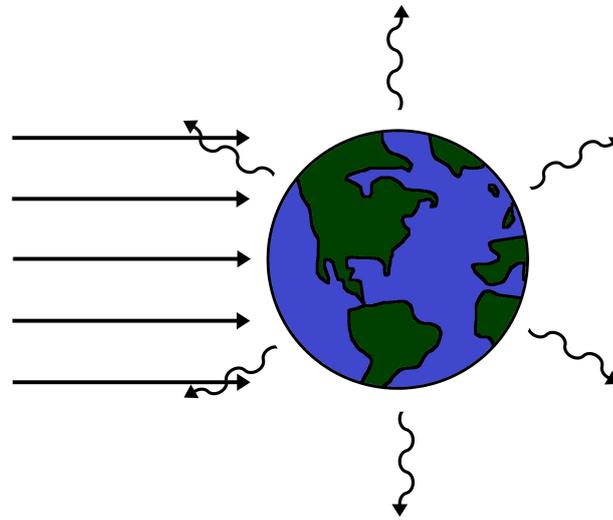
Man nehme modellhaft an, die Eisfläche im nördlichen Polarmeer würde aufgrund steigender Temperaturen schmelzen. Wenn weniger Eisfläche vorhanden wäre,

würde die lokale Albedo sinken und es würde mehr Energie im Wasser deponiert werden. Dadurch würde die Temperatur lokal steigen und die Eisschmelze weiter verstärken. Andererseits spielt die Wirkungskdauer eines Strahlungsantriebes eine entscheidende Rolle: Eine niedrige Erhöhung oder Erniedrigung kann ebenfalls weitreichende Folgen haben, wenn die Einwirkung über längere Zeit geschieht. So zog der serbische Wissenschaftler Milutin Milanković Anfang des 20. Jh. Änderungen in der Bewegung der Erde, wie etwa die Präzession der Erde oder die Schwankung der Exzentrizität der Erdbahn um die Sonne als Grund für längere Kalt- bzw. Warmphasen in Betracht. Diese erzeugen einen Strahlungsantrieb in der Größenordnung von  $\Delta S \approx 0,3 - 0,5 \frac{W}{m^2}$ , wirken aber über einen Zeitraum von mehreren 10 000 – 100 000 Jahren (näheres hierzu s. Kap. 4.2.5).

Es lässt sich erkennen, dass allein das Wachstum im zivilisatorischen Energieumsatz dazu führt, dass die gesetzten Limits des Temperaturanstiegs überschritten werden. Es kann also nicht nur um die Diskussion gehen, wie man den Treibhauseffekt eindämmen und wegfallende fossile Brennstoffe kompensieren kann. So könnte eine fortgeschrittene Zivilisation auf die Idee kommen, zusätzliche Strahlungsempfänger, wie etwa große Sonnensegel, im Weltall anzubringen und zusätzliche Energie auf die Erde zu strahlen. Ähnliche Konsequenzen, aber bei weitem nicht so utopisch: zusätzliche Energie durch Kernfusion oder -fission: ein zusätzlicher Strahlungseintrag in die Energiebilanz der Erde bewirkt einen Temperaturanstieg. Auch wenn diese „nur“ mit der vierten Wurzel des Strahlungsantriebs ansteigt (s. Glg. 4.23), so führt das exponentielle Wachstum wiederum dazu, dass der zusätzliche Gewinn an Energie schon nach kurzer Zeit wieder überstiegen würde. Dass dieses Phänomen der erhöhten Temperatur kein physikalisches Konstrukt ist, sondern tatsächlich passiert, lässt sich beispielsweise in Großstädten feststellen. Hier ist die Temperatur aufgrund des erhöhten Leistungsumsatzes im Vergleich zur mittleren Temperatur außerhalb der Städte deutlich angestiegen. „Entsorgt“ werden kann die ursprünglich als Abwärme zivilisatorischer Prozesse anfallende Energie nur lokal durch Konvektion oder durch thermische Abstrahlung. Als globaler Mechanismus bleibt nur die thermische Abstrahlung von der Erdoberfläche und der Atmosphäre.

#### 4.2.4 Ein einfaches Atmosphärenmodell

Im vorangegangenen Kapitel wurde mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet, dass die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche bei etwa  $-18^\circ \text{C}$  liegen



**Abbildung 4.7: Die Erde befindet sich im Strahlungsgleichgewicht mit der Umgebung. Die ankommende kurzwellige Strahlung wird in Form langwelliger Wärmestrahlung zurück ins All emittiert.**

müsste. Dass dies nicht zutrifft bedarf keiner weiteren Ausführung. Allerdings liegt die Diskrepanz zum tatsächlichen Wert von etwa  $15^\circ\text{C}$  nicht an der Falschheit des angewandten Gesetzes. Vielmehr haben wir im Modell Effekte der Atmosphäre der Erde vernachlässigt. Daher soll im Folgenden ein einfaches Modell der Erdatmosphäre, genauer gesagt ein nulldimensionales Atmosphärenmodell, betrachtet werden (vgl. hierzu [Bv97]). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Rückkopplungseffekte weiterhin keine Rolle spielen sollen.

Zunächst muss bei einem solchen Modell das thermodynamische Gleichgewicht der Erde betrachtet werden: Die solare Einstrahlung von der Sonne muss in gleichen Zeitskalen genauso groß sein, wie die thermische Ausstrahlung von der Erde in das All. Um ein globales Gleichgewicht zu erhalten, muss die auf der Querschnittsfläche ankommende Leistung gleichmäßig auf die gesamte Erdoberfläche verteilt werden.

Berücksichtigt man noch den Anteil der ankommenden Strahlung, welcher direkt wieder in den Weltraum zurückgestreut wird – dies spiegelt sich über die bereits bekannte Albedo wieder – so erhält man die auf der Oberseite der Erdatmosphäre ankommende Strahlungsleistung, im Folgenden  $S_0$  genannt. Man beachte:  $S$  haben wir im atmosphärenfreien Modell als Strahlungseintrag je Quadratmeter

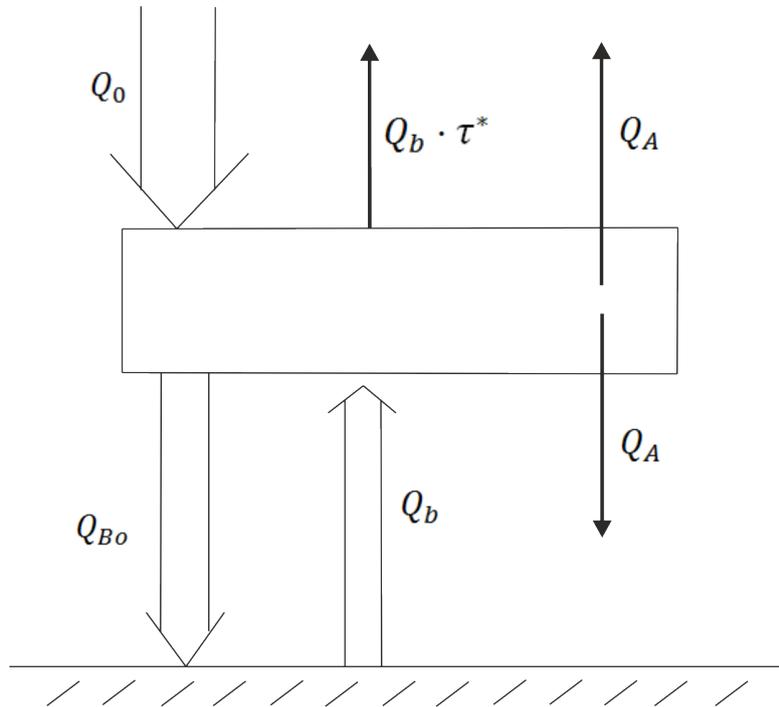


Abbildung 4.8: **Energieflüsse in einem einfachen Modell der Atmosphäre.**

Erdoberfläche bezeichnet. Jetzt müssen wir bei diesem Strahlungseintrag getrennt ermitteln, ob er an der Ober- oder Unterseite der Atmosphäre, also dem Erdboden, erfolgt.

$$Q_0 = \frac{\pi R^2}{4\pi R^2} (1 - A) \cdot s = \frac{1}{4} (1 - A) \cdot s \quad (4.32)$$

In der Atmosphäre wird ein Teil der pro Sekunde ankommenden Energie absorbiert, dadurch erreicht nur ein gewisser Anteil von  $Q_0$  den Boden:

$$Q_{Bo} = \tau \cdot Q_0 = \frac{1}{4} (1 - A) \cdot \tau \cdot s \quad (4.33)$$

wobei  $\tau$  der mittlere Transmissionskoeffizient der Atmosphäre für kurzwellige Strahlung ist.

$$Q_b = \sigma T_b^4 \quad (4.34)$$

Auch von dieser Strahlung durchdringt nur der Bruchteil  $\tau^* \cdot Q_b$  die Erdatmosphäre.  $\tau^*$  gibt hier den mittleren Transmissionskoeffizienten für langwellige Strahlung an.

Die Atmosphäre ihrerseits wird durch die absorbierte Energie ebenfalls erhitzt, wodurch in beide Richtungen pro Zeiteinheit die Energie

$$Q_A = (1 - \tau^*)\sigma T_A^4 \quad (4.35)$$

abgestrahlt wird.

$$Q_0 = Q_A + \tau^* Q_b \quad (4.36)$$

und

$$Q_b = Q_A + \tau Q_0. \quad (4.37)$$

Formt man beide Gleichungen nach  $Q_A$  um und setzt sie gleich, so erhält man:

$$Q_0 - \tau^* Q_b = Q_b - \tau Q_0 \quad (4.38)$$

Formt man diese Gleichung nach  $Q_b$  um, so ergibt dies:

$$Q_b = Q_0 \cdot \left( \frac{1 + \tau}{1 + \tau^*} \right). \quad (4.39)$$

Setzt man nun noch für  $Q_b$  die Stefan-Boltzmann-Beziehung (4.34) und für  $Q_0$  die Gleichung (4.32) ein, so erhält man die Beziehung:

$$\sigma T_b^4 = \frac{1}{4}(1 - A) \cdot \left( \frac{1 + \tau}{1 + \tau^*} \right) \cdot s \quad (4.40)$$

beziehungsweise

$$T_b = \left( \frac{1}{4\sigma}(1 - A) \cdot \left( \frac{1 + \tau}{1 + \tau^*} \right) \cdot s \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.41)$$

Mit dieser Gleichung lässt sich die Qualität des genutzten Atmosphärenmodells überprüfen. Setzt man realistische Werte für die Transmissionskoeffizienten ein ( $\tau = 0,9$  und  $\tau^* = 0,2$ ), so lässt sich der Wert für die mittlere Temperatur nahe der Erdoberfläche ermitteln. Setzt man nun die Zahlenwerte ein, so erhält man:

$$T_b = \left( \frac{0,277}{\sigma} \cdot s \right)^{\frac{1}{4}} \approx 286,1K. \quad (4.42)$$

Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche beträgt wie bereits erwähnt  $15^\circ\text{C}$  bzw. 288 Kelvin, welcher der abgeschätzte Wert relativ nahe kommt. Offensichtlich bildet das nulldimensionale Atmosphärenmodell die Zusammenhänge gut ab.

An dieser Stelle sollte weiter diskutiert werden, wie das Modell verbessert werden kann. Eine Möglichkeit bestünde darin, die Erdoberfläche mit einem geringeren Emissionskoeffizienten auszustatten, da diese kein absoluter Schwarzer Strahler ist.

Anhand dieses Modells lässt sich gut verdeutlichen, was der Verzicht auf die Rückkopplungen bedeutet. Betrachtet man lediglich die hergeleitete Formel für die Temperatur in Bodennähe, so folgt aus einer Leuchtkraftzunahme der Sonne bzw. der Zunahme der Solarkonstante sofort die Temperaturzunahme. Eine typische Rückkopplung wäre aber folgendes Beispiel:

Aufgrund einer erhöhten Solarkonstante verdunstet in Meeren und Seen mehr Wasser, wodurch sich mehr Wolken bilden. Dadurch steigt die Albedo der Atmosphäre merklich, es kommt weniger Energie am Erdboden an, eine Temperaturabnahme in Bodennähe wäre die Folge, und dies obwohl Wasserdampf einen „hervorragenden“ Treibhauseffekt bedingt.

Mit Hilfe des Strahlungsantriebes kann man also nicht auf konkrete Folgen schließen, er ist lediglich die Ursache einer Temperaturänderung. Man kann allenfalls davon ausgehen, dass Rückkopplungseffekte immer eine gewisse Rückkopplungszeit benötigen, um ihre Wirkung zu entfalten. Daher rührt die im IPCC-Bericht vorgenommene lineare Bilanzierung von wärmenden und kühlenden Einflüssen. Deutlich von einem solchen Vorgehen sind Klimasimulationen zu unterscheiden, die natürlich immanent Rückkopplungseffekte zum Ausdruck bringen.

Es sei abschließend noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Begriff des Strahlungsantriebs für lineare, also nicht rückgekoppelte Betrachtungen im IPCC-Bericht genutzt wird. In diesem Sinne verwenden wir ihn auch selbst nachfolgend, jedoch nicht – wie soeben auch ausgeführt – ohne mögliche Rückkopplungseffekte im realen Geschehen auszublenden oder gar zu vergessen, dass es sich bei diesem Konzept um einen Modellgedanken handelt.

### 4.2.5 Nicht-anthropogene Strahlungsantriebe

In Kapitel 4.2.4 wurde ein Zusammenhang zwischen der Änderung im Strahlungshaushalt der Erde und der daraus resultierenden, für unser Modell geltenden Temperaturänderung hergestellt. Da, wie bereits erwähnt, Rückkopplungseffekte möglichst außer Acht gelassen werden sollen, werden im Folgenden Phänomene betrachtet, welche rückkopplungsfrei zu ihrem Auslöser sind. So lassen sich

prinzipielle bzw. qualitative Vorhersagen für die daraus resultierende Temperaturänderung treffen. Änderungen im Reflexionsvermögen bzw. der Albedo der Erde oder in der Menge von Treibhausgasen sind rückgekoppelt und sollen an dieser Stelle keine weitere Beachtung finden.

Da die Ursachen für eine Änderung im Strahlungshaushalt der Erde innerhalb der Geosysteme meist rückgekoppelt sind, werden im Folgenden Ursachen astronomischer Natur betrachtet, welche einen Einfluss auf die Solarkonstante bzw. auf die auftreffende Sonnenstrahlung haben<sup>2</sup>:

1. Leuchtkraftzunahme der Sonne
2. Präzession der Erdachse und Periheldrehung der Erdbahn
3. Änderung der Exzentrizität der Erdumlaufbahn
4. Variation der Ekliptikschiefe.

Die Ursachen (2), (3) und (4) werden auch als Milankovic-Zyklen bezeichnet. Dabei handelt es sich um zeitvariante Muster, d.h. innerhalb dieser Zeiträume ändert sich die Geometrie der Erdbewegung, wodurch sich ebenfalls der Strahlungseintrag auf die Erde ändert (s. [FC13]). Der serbische Mathematiker Milutin Milankovic veröffentlichte seine Ideen 1920, welche jedoch stark angezweifelt wurden. Erst in den 70er Jahren wurden sie wieder modifiziert aufgegriffen .

### 1. Leuchtkraftzunahme der Sonne

Astronomische Beobachtungen (hier sei das Hertzsprung-Russell-Diagramm erwähnt) und theoretische Berechnungen (Masse-Leuchtkraft-Beziehung) ergeben, dass die Leuchtkraft von Hauptreihensternen im Laufe der Zeit zunimmt. Unsere Sonne scheint heute mit einer etwa 30% höheren Intensität als vor etwa 4,6 Milliarden Jahren (vgl. [Sch09b]). Diese Steigerung in der Leuchtkraft ist jedoch in menschlichen Zeitskalen so gering, dass Auswirkungen leicht durch andere Klimafaktoren überlagert

---

<sup>2</sup>Der Sonnenfleckenzyklus, bei dem die mittlere Anzahl an Sonnenflecken zu- bzw. abnimmt, hat ebenfalls Einfluss auf die Strahlungsleistung der Sonne. Die größten Schwankungen betragen weniger als 1 Promille der Leuchtkraft der Sonne. Auch wenn einige Daten darauf hindeuten, dass eine Verbindung zum Erdklima besteht, hier sei die „kleine Eiszeit“ zwischen 1645 und 1715 erwähnt, ist es nicht zweifelsfrei belegt, ob es sich nicht doch um einen Zufall in der zeitlichen Überlagerung handelt.

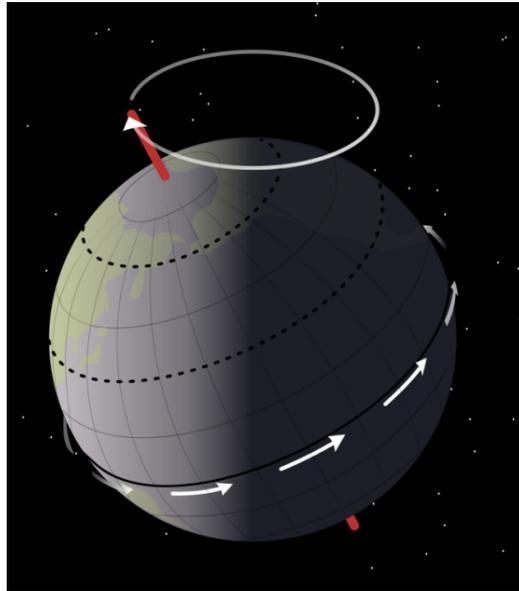


Abbildung 4.9: **Schematische Darstellung der Präzessionsbewegung der Erdachse (Quelle: [Mys]).**

werden können. Andererseits ist die durchschnittliche Temperatur auf der Erde, abgesehen von einigen Eiszeiten, relativ konstant geblieben bzw. heute sogar kühler als in der Frühzeit. Hier lässt sich erkennen, dass ein relativ großer, extrem langfristig wirkender Strahlungsantrieb, immerhin etwa  $70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , keine weitreichenden Folgen für das Klima der Erde haben muss.

## 2. Präzession der Erdachse und Periheldrehung der Erdbahn

Zunächst sollte erwähnt werden, dass die Präzession der Erdachse und die Periheldrehung zwei unterschiedliche Phänomene sind.

Die Erde dreht sich wie ein Kreisel um ihre eigene Achse. Die Drehachse ist um  $23,5^\circ$  gegenüber der Senkrechten der Ekliptikebene geneigt. Durch die von Sonne und Mond auf die Erde wirkenden Kräfte entsteht eine „Tummelbewegung“, die eine Periode von ca. 26000 Jahren hat (s. Abb. 4.9).

Die Periheldrehung hingegen beschreibt die Drehung der Raumorientierung der Hauptachse der elliptischen Erdbahn (s. Abb. 4.10). Hierbei dreht sich die ganze Bahn der Erde bzw. der sonnennächste Punkt wandert um die Sonne. Diese Drehung hat eine Periode von ca. 112000 Jahren. Der Begriff

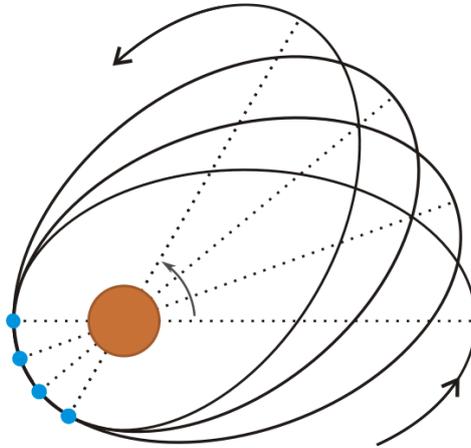


Abbildung 4.10: **Schematische Darstellung der Periheldrehung mit übertriebener Exzentrizität der Erdbahn (Quelle: [Stü]).**

der Periode oder Periodendauer ist in diesem Zusammenhang nur sehr vorsichtig zu verwenden, denn der Effekt resultiert aus der Überlagerung der Gravitationskräfte aller Himmelskörper im Sonnensystem. Mithin handelt es sich um eine im Vielkörpersystem nicht streng lösbare Bewegung, die nur über gewisse Zeiträume hinweg in Großrechenanlagen zu simulieren ist. Dabei ergeben sich quasiperiodische Abfolgen ähnlicher Bewegungsmuster in der Größenordnung von ca. 100 000 Jahren.

Beide Phänomene lassen sich ursächlich als Kreiseffekte verstehen, sie haben darüber hinaus eine weitere Gemeinsamkeit: Beide Zyklen beeinflussen den Jahreszeitenwechsel der Erde relativ zum sonnennächsten bzw. -fernsten Punkt. Befindet sich derzeit die Erde Anfang Januar im Perihel der Umlaufbahn, auf der Nordhalbkugel herrscht also Winter, so wird aufgrund der beschriebenen Zyklen in einigen Tausend Jahren das Perihel im Nordsommer durchlaufen werden. Wäre die Oberfläche der Erde ideal kugelförmig und mit gleichen Reflexionseigenschaften ausgestattet, hätte dies keine Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt. Allerdings sind die Nord- und Südhalbkugel unterschiedlich beschaffen, man denke beispielsweise an die großen Landmassen von Asien und Nordamerika nördlich bzw. die großen Wassermassen des Pazifiks südlich des Äquators. Dadurch weisen die beiden Halbkugeln eine unterschiedliche Albedo auf.

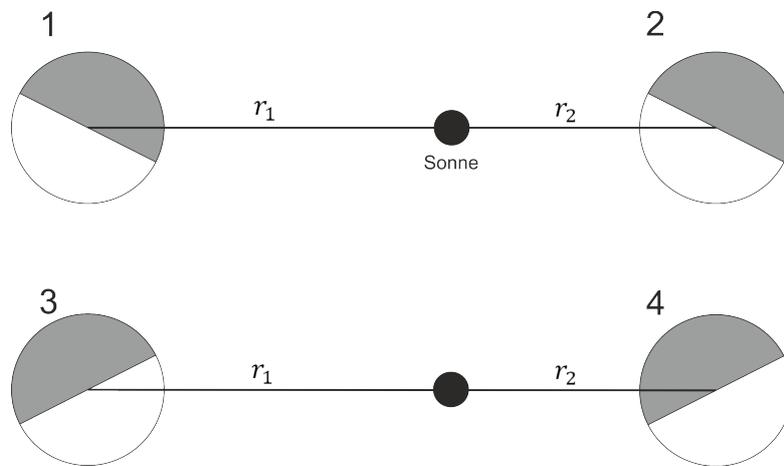


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Einstrahlung von Nord- und Südhalbkugel.

Befindet sich die Erde bei auf der Nordhalbkugel herrschendem Winter im Perihel der Erdumlaufbahn, in Abbildung 4.11 entspricht dies der Stellung 2, so wird aufgrund des sich ändernden Abstands zur Sonne eine andere Strahlungsmenge empfangen, als wenn sich die Erde im Aphel befinden würde (Stellung 3). Das Gleiche gilt für den Sommer auf der Nordhalbkugel (vergleiche Stellung 1, Aphel, mit Stellung 4, im Perihel). Nimmt man diese beiden Faktoren – die unterschiedliche Albedo der Nord- und Südhalbkugeln kombiniert mit unterschiedlichen Distanzen zur Sonne – so ergeben sich Schwankungen in der empfangenen Strahlungsmenge. Eine detaillierte Berechnung des entstehenden Strahlungsantriebs würde an dieser Stelle zu weit führen (siehe dazu [Sch08]).

Trotz der geringen Exzentrizität der Erdbahn, die Distanzen zwischen Perihel bzw. Aphel zur Sonne unterscheiden sich um „nur“ etwa 5 Millionen Kilometer, erhält man einen Strahlungsantrieb von maximal  $0,5 \frac{W}{m^2}$ , woraus mit Gleichung (4.31) eine Temperaturänderung von ca.  $0,1 K$  nahe der Erdoberfläche folgt.

### 3. Änderung der Exzentrizität der Erdumlaufbahn

Die Erdumlaufbahn um die Sonne, so ist jedem Schüler bekannt, der die keplerschen Gesetze im Unterricht behandelt hat, ist eine elliptische Bahnkurve. Die „Stärke“ einer Ellipse wird durch die sogenannte numerische Exzentrizität angegeben. Diese variiert bei der Erde zwischen ca. 0,01 und

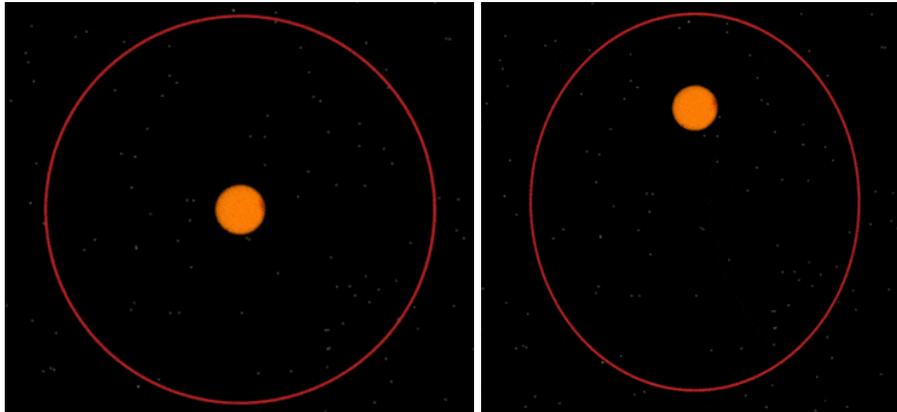


Abbildung 4.12: Erdumlaufbahn mit Exzentrizität von 0 (links) und 0,5 (rechts) (Quellen: [Ecca], [Eccb]).

0,06, beim ersteren Wert ist die Erdbahn nahezu kreisförmig. Der momentane Wert liegt bei etwa 0,0167. Dennoch bewirkt diese geringe Exzentrizität, dass sich die Erde im Laufe eines Jahres der Sonne nähert und sich wieder von ihr entfernt. Um plausible Annahmen über die Langzeitvariation im Strahlungseintrag zu machen, müssen „Erdbahnen“ mit unterschiedlicher Exzentrizität miteinander verglichen werden.

Bei hoher Exzentrizität, also bei einer „sehr elliptischen“ Bahn ist es relativ klar, dass sich der Strahlungseintrag je nach Position zur Sonne deutlich ändert. Gerade in Sonnennähe erhöht sich die Sonneneinstrahlung merklich. Auch hier lassen sich detailliertere Herleitungen anstellen (s. [Sch08]), um eine Beziehung zwischen der „Solarkonstanten“ und der Exzentrizität herzustellen, für uns sollen das Ergebnis und die obigen qualitativen Überlegungen ausreichen.

Für zwei mögliche „Erdbahnen“ erhält man den Zusammenhang:

$$\frac{\bar{s}_1}{\bar{s}_2} = \frac{\sqrt{1 - \epsilon_2^2}}{\sqrt{1 - \epsilon_1^2}}, \quad (4.43)$$

wobei  $\bar{s}_i$  die gemittelte Solarkonstante für die Bahnexzentrizität  $\epsilon_i$  (mit  $i = 1, 2$ ) angibt.

Setzt man Zahlenwerte der gegenwärtigen Erdumlaufbahn von  $\bar{s}_2 = 1370 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  und  $\epsilon_2 = 0,0167$  ein und nimmt für die maximale Exzentrizität  $\epsilon_2 \approx$

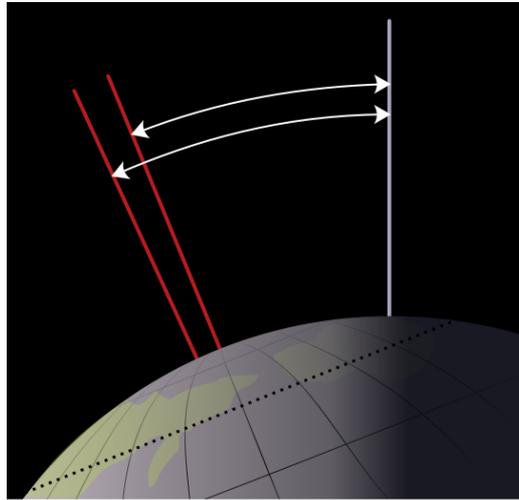


Abbildung 4.13: **Schematische Darstellung der sich ändernden Neigung der Erdachse (Quelle: [NAS]).**

0,05 an, so ergibt dies für die dazugehörige mittlere Solarkonstante  $\bar{s}_2 = 1371,6 \frac{W}{m^2}$ . Dies entspricht einer Änderung von  $1,6 \frac{W}{m^2}$  bzw. 0,1%.

Diese Änderung tritt allerdings über einen Zeitraum von etwa 100 000 Jahren auf.

#### 4. Variation der Schiefe der Ekliptik

Die Erdachse ist wie bereits erwähnt um  $23,5^\circ$  gegenüber der Senkrechten der Erdbahnebene geneigt. Allerdings variiert diese Schiefe der Ekliptik zeitlich, wir sprechen hier von einer Quasi-Periodenlänge<sup>3</sup> von etwa 40 000 Jahren, um etwa  $3^\circ$  (s. Abb. 4.13). Dies bewirkt eine Änderung der auf der Erde ankommenden Strahlungsintensität, da sich der maximale bzw. minimale Auftreffwinkel der Sonnenstrahlen ändert.

Ähnlich wie bei der Präzession der Erdachse und der Periheldrehung hat dies auch einen Strahlungsantrieb zur Folge. Auch hier ist die unterschiedliche Beschaffenheit bzw. die unterschiedliche Albedo der beiden Erdhalbkugeln ausschlaggebend.

Man erhält analog zu (2) bei einer Änderung der Schiefe der Ekliptik einen Strahlungsantrieb von etwa  $0,07 \frac{W}{m^2}$  (s. [Sch08]).

<sup>3</sup>Sinngemäß gilt über die Periodizität das Gleiche wie bei der Periheldrehung gesagte.

<b>Exzentrizität der Erdbahn</b>	<b>Variation der Ekliptikschiefe</b>	<b>Periheldrehung</b>	<b>Präzession</b>
Zeitraum: ca. 100000a	Zeitraum: ca. 40000a	Zeitraum: ca. 112000a	Zeitraum: ca. 26000a
Strahlungsantrieb: $1,6 \frac{W}{m^2}$	Strahlungsantrieb: $0,07 \frac{W}{m^2}$	Strahlungsantrieb: $0,5 \frac{W}{m^2}$	Strahlungsantrieb: $0,5 \frac{W}{m^2}$

**Tabelle 4.2: Überblick über die Periodendauern und Strahlungsantriebe der Milankovic-Zyklen.**

Es stellt sich nun die Frage, was solch kleine Strahlungsantriebe im Klimasystem ausrichten können. Immerhin wirken diese annähernd konstant über einige tausend Jahre (s. Tab. 4.2).

Mit Hilfe einiger Analysetechniken ist es möglich anhand von Eisbohrkernen den Temperaturverlauf von mehreren Hunderttausend Jahren Erdgeschichte zu rekonstruieren. Dies geschieht unter anderem mit Hilfe der Sauerstoff-Isotope O-18 und O-16, da Wassermoleküle mit diesen Isotopen unterschiedlich gut verdunsten. Je nach Temperatur auf der Erde ändert sich das Verhältnis dieser beiden Isotope im Polareis bzw. in Sedimentschichten. Dadurch können durch Untersuchung von diesem Isotopenverhältnis Rückschlüsse auf die Temperatur gezogen werden. Es zeigt sich, dass Kalt- bzw. Warmphasen im Erdzeitalter mit Überlagerungen der Milankovic-Zyklen korrelieren können, allerdings ist das Wirkgefüge sehr komplex, so dass es einer aufwändigen statistischen Analyse bedarf, um diesen Zusammenhang zu identifizieren.

Der genaue Zusammenhang des Systems Erde mit den einzelnen Milankovic-Zyklen ist noch nicht hinreichend geklärt, allerdings ist ersichtlich, dass diese kleinen Strahlungsantriebe, die über einen langen Zeitraum wirken, das ohnehin statistisch schwankende Klima sehr weit aus den mittleren Werten heraustreiben können. Hingegen können auch große Strahlungsantriebe, wie etwa bei der Leuchtkraftzunahme der Sonne, keine Auswirkungen nach sich ziehen. Gerade diese Nicht-Linearität zwischen Strahlungsantrieb und Temperatur- bzw. Klimaänderung macht es schwer, gar unmöglich, konkrete Folgen und Auswirkungen über längere Zeiträume hinweg zu benennen.

Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, dass die Strahlungsantriebe und die mit ihnen verknüpften Temperaturänderungen, die der IPCC in seinen Berich-

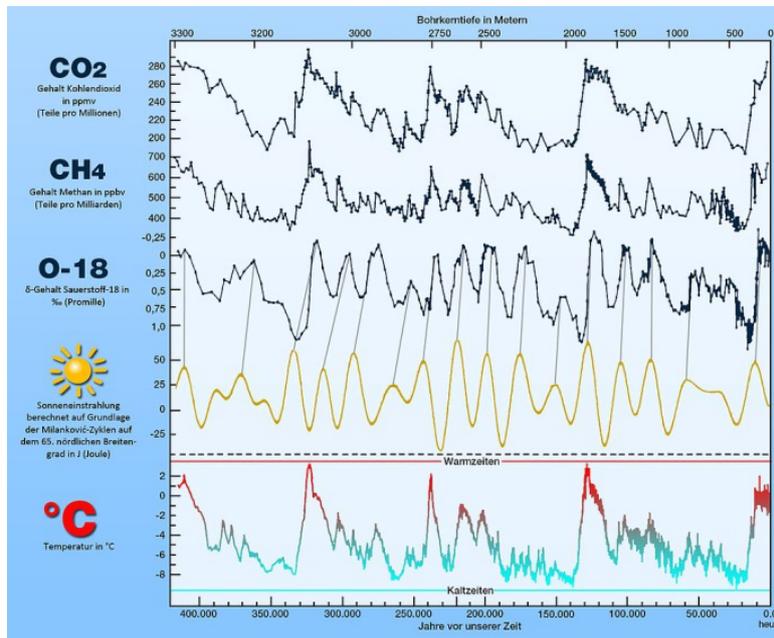


Abbildung 4.14: **Klimaparameter der letzten 42000 Jahre (Quelle: [Xub]).**

ten angibt, auf der Annahme von Linearität beruhen. Diese Annahme gilt – so der gegenwärtige Kenntnisstand – für kurze Zeitspannen von einigen Jahrzehnten anscheinend gut. Offenbar benötigen Rückkopplungseffekte einen gewissen Zeitraum, damit sie im Klimasystem wirksam werden können. Ist diese Zeit nicht gegeben, so folgt das Klima relativ direkt dem Strahlungsantrieb in Richtung Erwärmung oder Abkühlung.

#### 4.2.6 Anthropogene Strahlungsantriebe am Beispiel des „Fifth Assessment Reports“ des IPCC

Im Jahr 2014 erschien der fünfte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz IPCC. Bevor auf die zentralen Ergebnisse des IPCC-Berichts eingegangen wird, soll zunächst kurz die Organisation und die Aufgabe des IPCC dargestellt werden.

Das Intergovernmental Panel of Climate Change wurde im Jahr 1988 gegründet, um solide und objektive Informationen liefern. Dabei wird keine eigene Forschung betrieben, es werden allerdings publizierte, meist eine Peer-Review durchlaufene Arbeiten und Studien aus wissenschaftlicher Sicht bewertet. Die so ent-

standenen Berichte sollen ‚relevant für Politik sein, aber keine bestimmte Politik empfehlen‘. Die Berichte werden von drei Arbeitsgruppen erstellt. Die erste Gruppe beschäftigt sich mit den wissenschaftlichen Grundlagen, die zweite mit möglichen Auswirkungen und die dritte mit dem Thema Klimaschutz. Die Berichte sind an folgenden Auftrag gekoppelt:

„Das Liefern international koordinierter wissenschaftlicher Bewertungen zu **Ausmaß, zeitlicher Dimension** und möglichen **ökologischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen** des Klimawandels sowie zu realistischen **Reaktionsstrategien**“ (vgl. [IPCa]).

Im Vergleich zum vierten Assessment Report konnte im fünften deutlich mehr Literatur verwendet werden, die Datenlage zum Klima war deutlich dichter und Modelle zu Simulationen waren verlässlicher. Die Inhalte bzw. Kernergebnisse sind allerdings ähnlich geblieben. Momentan befindet sich der sechste Sachstandsbericht in Arbeit, der im Jahr 2021 erscheinen soll.

Die Grundaussage des fünften Berichts ist, dass der Klimawandel bereits da sei. Die Folgen sind bereits spürbar und zeigen sich am stärksten in der Natur, sind für den Menschen in gewissen Regionen jedoch auch schon merklich vorhanden. Gestützt wird diese Aussage durch folgende Kernergebnisse:

- Die  $CO_2$ -Konzentration ist heutzutage etwa 40% höher als das vorindustrielle Niveau, dies und andere Treibhausgase bewirken einen positiven Strahlungsantrieb,
- Die Temperatur der Ozeane und die der Erdoberfläche haben sich im Mittel erhöht (s. Abb. 4.15),
- die Verantwortung zwischen 1951 und 2012 trug dabei der Mensch,
- Gletscher und arktisches Meereis nehmen stark ab,
- 30% des freigesetzten Kohlenstoffdioxids wurden von den Ozeanen aufgenommen, wodurch diese versauern,
- Prognose:
  - der Meeresspiegel steigt bis zum Jahr 2100 um mehr als 20cm,

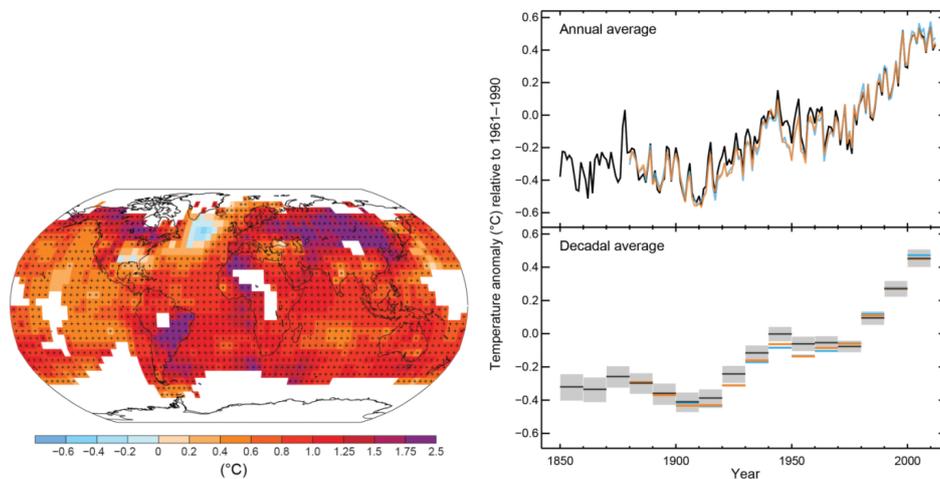


Abbildung 4.15: **Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche hat sich zwischen 1901 und 2012 erhöht (Quelle: [IPCb]).**

- bei Ausstoß von Treibhausgasen wie bisher, erwärmt sich die Erde im Mittel um etwa 2,6 bis 4,8°C.

Laut IPCC sind möglichen Folgen unter anderem das Auftauen von Permafrostböden, die Tier- und Pflanzenwelt betreffende Anpassung an veränderte Jahreszeiten oder gar Artensterben:

„Die natürliche Klimaänderung während der zurückliegenden Millionen von Jahren, die langsamer verlief als die gegenwärtig vom Menschen verursachte, haben erhebliches Artensterben verursacht“.

Als Beispiel seien hier die Mammuts genannt, die sich der Temperaturerhöhung der Erde nicht anpassen konnten und dadurch ausgestorben sind.

Auch der Mensch hat mögliche Folgen zu tragen, obgleich die Ausprägung unterschiedlich bzw. ungleichmäßig verteilt sein wird. Bewohner reicherer Regionen werden hier weniger stark von betroffen, als die in armen Regionen lebenden. Dadurch werden soziale Ungleichheiten verstärkt, die soziale Schere geht weiter auseinander. Auch durch sich verschiebende Niederschlagsmuster wird die Ernährungsunsicherheit größer, die Wasserversorgung wird beispielsweise durch Dürren oder Überschwemmungen schwieriger. Der Meeresspiegelanstieg führt zum Verlust von maritimen und küstennahen Ökosystemen.

### 4.2.7 Schlussfolgerungen für die Hand des Schülers

Obwohl der Klimawandel als auch der IPCC selbst häufig kontrovers diskutiert werden – Klimawissenschaftler und der IPCC würden beim Ausmaß und Folgen übertreiben oder die verwendeten Modelle seien nicht genau genug – sollten die vom IPCC genannten möglichen Folgen dennoch ernst genommen werden. In Kapitel 4.2.5 wurde dargelegt, was sehr geringe, nicht-anthropogene Strahlungsantriebe über lange Zeiträume hinweg mit dem Erdklima bewirken können. Sie sollten als warnendes Beispiel gesehen werden, was die anthropogenen Strahlungsantriebe sein können.

Hauptverantwortlich für den aktuellen Strahlungsantrieb sind die Treibhausgase. Momentan nimmt die Emission dieser um ca. 2,2% pro Jahr zu. Die Treiber sind, wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, das Bevölkerungs- und das Wirtschaftswachstum. Obwohl die meisten Industrienationen in Richtung regenerativer Energien umschwenken wollen, boomt weiterhin die Kohlekraft, besonders durch die Nutzung in Schwellenländern. Auch ohne sämtliche Aussagen des IPCC auf die Waagschale zu legen, ist ohne Klimaschutz eine Klimaänderung sehr wahrscheinlich. Doch wie soll dieser aussehen?

Auch das IPCC schlägt mögliche Schutzmaßnahmen vor. Diese decken sich größtenteils mit den in dieser Arbeit herausgearbeiteten. So ist das Hauptziel die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren. Dies fußt auf hauptsächlich zwei Säulen: dem Energiesparen durch Effizienz und Verhaltensänderung einerseits („Schlüsselstrategie“) und der drastischen Ausweitung CO<sub>2</sub>-armer Energieerzeugung andererseits. Bei Letzterem ist neben den regenerativen Energien auch ausdrücklich die Rede von der Kernkraft, auch wenn hier mögliche Gefahren der Nutzung aufgelistet werden. Der Punkt Energiesparen durch effizientere Energienutzung bezieht sich dabei auf verschiedene Bereiche, insbesondere werden hier aber der Verkehrs-, der Industriesektor und Städte genannt. Durch effizientere Technologien sollen Emissionen gemindert werden, Infrastrukturen sollen nach Möglichkeit sinnvoller angelegt werden. Aber auch Energiesparmaßnahmen durch Privathaushalte, hier sei die Wärmedämmung von Wohngebäuden genannt, tun ihren Anteil dazu.

## 4.3 Abschließende Betrachtung des Lernmoduls

Es wurde in diesem Kapitel zunächst ein einfaches Atmosphärenmodell entwickelt, mit dem die mittlere globale Temperatur auf der Erde abgeschätzt werden kann. Mit Hilfe des Strahlungsantriebes lässt sich ein Zusammenhang zwischen einem zusätzlichen Strahlungseintrag auf der Erde und einer daraus resultierenden Temperaturänderung herstellen. Auch wenn etwaige Rückkopplungseffekte außer Acht gelassen wurden, so wurde dennoch plausibel gemacht, dass eine exzessive Energienutzung, insbesondere von fossilen Brennstoffen oder der Kernenergie, Auswirkungen auf die Umwelt hat. Als warnendes Beispiel für das, was anthropogene Strahlungsantriebe auslösen können, wurden die Milankovic-Zyklen aufgeführt, welche relativ kleine, nicht-anthropogene Strahlungsantriebe bewirken, dies jedoch über lange Zeiträume.

Der Strahlungsantrieb ist daher ein zentrales Konzept, wenn es darum geht, die Auswirkungen des zivilisatorischen Energiebedarfs für Schüler verständlich zu machen. Als interessanter Nebeneffekt ergibt sich, dass das Konzept des Strahlungsantriebes insofern einer kritischen Betrachtung in Hinblick auf mögliche Effekte unterzogen werden kann, als wir durch die gewählten Beispiele klar auf die dramatischen Auswirkungen von Rückkopplungseffekten aufmerksam gemacht werden. Lernende können daraus ersehen, dass die aktuelle Diskussion um Strahlungsantriebe und deren möglichen Folgen lediglich lineare Projektionen in die Zukunft sind – die Möglichkeit für weitaus dramatischere Konsequenzen muss deshalb immer mitgedacht werden.

## 4.4 Aufgaben zu Lernmodul 2

1. Berechnen Sie die mittlere Temperatur auf dem Planeten Mars. Recherchieren Sie hierzu fehlende Angaben.
2. Der Mond reflektiert nur 12% der Sonnenstrahlung. Er hat keine Atmosphäre.
  - (a) Berechnen Sie seine Durchschnittstemperatur mit der im Lernmodul hergeleiteten Formel.
  - (b) Aufgrund der langsamen Rotation des Mondes ergibt das in (a) berechnete Ergebnis keinen Sinn. Modifizieren Sie das Modell unter der

Voraussetzung, dass es keine nennenswerten Wärmeaustauschprozesse auf der Mondoberfläche gibt und berechnen Sie erneut die lokale Temperatur. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit Realdaten und interpretieren Sie das Ergebnis.

3. Der Planet Merkur hat die Albedo 11%. Berechnen Sie die Durchschnittstemperatur des Merkurs. Warum weichen die berechneten Werte stark von den Literaturwerten von etwa  $430^{\circ}\text{C}$  auf der Tagseite ab?
4. Der Stern „Gliese 581“ hat einen Planeten (Gliese 581 c), der oft als „zweite Erde“ bezeichnet wird. Der Stern strahlt mit  $1/50$  der Leistung unserer Sonne. Der mittlere Abstand vom Stern zum Planeten beträgt ca. 11 Millionen Kilometer.
  - (a) Berechnen Sie die Solarkonstante  $s$  des Planeten und seine Temperatur unter der Annahme, dass er ein schwarzer Körper ist.
  - (b) Berechnen Sie für erdähnliche Bedingungen, d.h. ohne gebundene Rotation, die Albedo des Planeten so, dass die angegebene mittlere Temperatur von  $40^{\circ}\text{C}$  erreicht wird.
  - (c) Die Strahlung des Sterns kann bzgl. des Mittelwertes um 25% nach oben oder unten variieren. Berechnen Sie für diesen Fall die Planetentemperatur mit und ohne Albedo.
  - (d) Interpretieren Sie Ihre Ergebnisse im Hinblick auf mögliches Leben auf dem Planeten.

# **Kapitel 5**

## **Untersuchung globaler Energieströme in Hinblick auf die Potenziale regenerativer Energien**

### **5.1 Fachdidaktische und fachwissenschaftliche Vor- überlegungen**

#### **5.1.1 Globale und lokale Betrachtungen**

Als grundlegende Idee steht hinter diesem Kapitel der Vergleich verschiedener Perspektiven. Es wird einerseits mit Hilfe von elementaren physikalischen Überlegungen versucht, globale Abschätzungen für die Nutzung verschiedener regenerativer Energieträger herauszuarbeiten. Diese stellen das absolute Maximum der Nutzbarkeit dar. Andere Faktoren, wie technische Wirkungsgrade, werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Generell werden technische Aspekte in den Hintergrund gestellt. Wichtiger sind die physikalischen Grenzen, die der Nutzung gesetzt werden. Technik kann weiter entwickelt werden, die Physik kann dabei jedoch nicht umgangen werden.

Die gewonnenen Abschätzungen sollen jedoch nicht alleine stehen bleiben. Sie werden mit Abschätzungen anderer Autoren verglichen, welche genauere Modelle verwendet haben, da es in dieser Arbeit nicht um exakte Ergebnisse geht, sondern vielmehr um ein Gefühl für die Größenordnung, verglichen mit dem jetzigen

Leistungsbedarf der Menschheit einerseits und den verschiedenen Energieträgern andererseits. Daher werden alle Werte pro Flächeneinheit, also in Watt pro Quadratmeter, und für die gesamte Erdoberfläche in Watt angegeben.

Bei einigen Energieträgern werden die Ergebnisse der globalen Abschätzung mit solchen verglichen, welche aus lokal angepassten Modellüberlegungen und realen Daten her rühren, wie z.B. welche Leistung pro Quadratmeter man aus einem Windpark entnehmen kann, verglichen mit dem Wert aus der globalen Abschätzung. Ebenso sollen sämtliche Ergebnisse mit real existierenden Kraftwerken (Solarthermiekraftwerken, Windparks, Stauseen usw.) verglichen werden. Hier wird gezeigt werden, dass an solchen Standorten, die jeweils für den Energieträger herausragende Nutzungseigenschaften besitzen, im oberen Grenzbereich gerade so die Ergebnisse der Abschätzungen erreicht werden.

### 5.1.2 Der Carnot-Wirkungsgrad im System Erde

Die natürlichen Prozesse im Erdsystem verrichten ständig Arbeit. Der Wind weht ständig weiter, Wasser wird durch die Luft auf Berge transportiert, um dort durch Flüsse wieder herunter zu fließen usw. Diese ständige Verrichtung von Arbeit bzw. das Erzeugen von Leistung ist nichts Anderes als die Dynamik im Erdsystem. Die dafür nötigen Kräfte entstehen aus thermodynamischen Antrieben, beispielsweise durch Druckunterschiede der Luft. Das heißt, dass die resultierende Dynamik des Erdsystems den Gesetzen bzw. den Hauptsätzen der Thermodynamik folgen muss.

Die Erde kann somit als eine Wärmekraftmaschine betrachtet werden. Sie erzeugt Leistung und überträgt diese auf verschiedene Prozesse im Erdsystem und hält diese am Laufen. Mit Hilfe einer Wärmekraftmaschine kann ganz allgemein aus Wärme mechanische Arbeit gewonnen werden. Diese ist nötig, um Bewegung zu erhalten oder Massen zu heben – übertragen auf das Erdsystem kann z.B. Luft in der Atmosphäre oder Wasser in Flüssen oder Meeren bewegt werden.

Als thermodynamisches System ist die Erde nahezu geschlossen. Der Austausch mit dem Weltall findet größtenteils über Wärmestrahlung statt, kaum über Materie. Dadurch können nachfolgende Betrachtungen getätigt werden.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt die Energieerhaltung bzw. die Energiebilanz in einem thermodynamischen System. Jedes System besitzt eine gewisse innere Energie  $U$ , diese kann sich nur durch Wärme  $Q$  oder verrichtete Arbeit  $W$  ändern:

$$\Delta U = Q + W \quad (5.1)$$

Wir betrachten hier, im Gegensatz zu den üblichen Herleitungen der Carnot-Effizienz, direkt eine zeitliche Änderung der inneren Energie bzw. die Wärme und Arbeit pro Zeit (vgl. hierzu [Kle12]). Damit ergibt sich der Zusammenhang:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} = \dot{Q} + \dot{W}. \quad (5.2)$$

$\dot{Q}$  kann dabei als Wärmefluss angesehen werden,  $\dot{W}$  gibt eine Leistung an.

Die innere Energie ist direkt verknüpft mit der Temperatur. Da im Falle der Erde der treibende Temperaturgradient konstant ist (s. Abb. 5.1), gilt:

$$\frac{dU}{dt} = 0. \quad (5.3)$$

Insgesamt gilt somit:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - P_{out} = 0. \quad (5.4)$$

$\dot{Q}_{in}$  gibt dabei die Erwärmung des Systems durch ein Wärmereservoir  $T_{in}$  an,  $\dot{Q}_{out}$  die Kühlung durch ein Reservoir mit der Temperatur  $T_{out}$ .  $P_{out}$  ist die erzeugte Leistung. Diese ergibt sich zu:

$$P_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \quad (5.5)$$

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gibt die Entropiebilanz eines Systems an. Die Entropie ändert sich mit zugeführter oder abgegebener Wärme:

$$dS = \frac{\partial Q}{T} \quad (5.6)$$

Wir nehmen auch hier zunächst einen stationären Zustand an, bei der die Entropie konstant bleibt:

$$\frac{dS}{t} = 0 \quad (5.7)$$

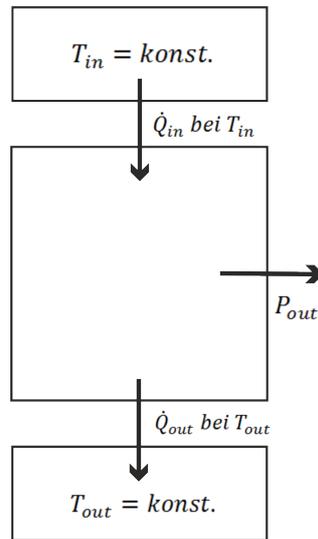


Abbildung 5.1: Bei einer klassischen Wärmekraftmaschine mit konstantem Temperaturgradienten ist die maximale Leistung  $P_{out}$  durch die Carnot-Effizienz gegeben (eigene Darstellung, nach [Kle12]).

Durch die Erwärmung des Systems wird die Entropie  $\frac{\dot{Q}_{in}}{T_{in}}$  zugeführt, durch die Kühlung wird die Entropie  $\frac{\dot{Q}_{out}}{T_{out}}$  entfernt. Damit ergibt sich die Bilanz<sup>1</sup>:

$$\frac{dS}{t} = \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{in}} - \frac{\dot{Q}_{out}}{T_{out}} = 0 \quad (5.8)$$

Damit folgt direkt die Gleichung:

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{T_{out}} = \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{in}} \quad (5.9)$$

$$\text{bzw. } \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} \cdot \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (5.10)$$

Damit ergibt sich für die erzeugte Leistung:

<sup>1</sup>Irreversible Prozesse werden hier nicht berücksichtigt, da der „Idealfall“ der maximalen Leistung des Systems bestimmt werden soll. Hier ist der zusätzliche Entropieanteil gleich Null.

$$P_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{in} \cdot \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (5.11)$$

$$= \dot{Q}_{in} \cdot \left(1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}\right) = \dot{Q}_{in} \cdot \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}\right) \quad (5.12)$$

Der letzte Faktor gibt dabei die sogenannte Carnot-Effizienz an:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} = \frac{\Delta T}{T_{in}} \quad (5.13)$$

Der Carnot-Wirkungsgrad gibt bei Wärmekraftmaschinen den höchsten theoretisch möglichen Wirkungsgrad und somit eine Obergrenze für die Effizienz bei der Umwandlung von Wärme in mechanische Energie an (s. [TBD14], S. 610). Auch Maschinen, die noch so gut gebaut sind und entsprechend effizient arbeiten, können diesen nicht übertreffen.

Mit Hilfe dieses Carnot-Limits kann im Sinne einer absoluten Obergrenze somit die maximale Leistung der Hauptantriebe des Erdsystems abgeschätzt werden. Diese arbeiten jedoch im Regelfall wesentlich ineffizienter. Natürliche Wärmekraftmaschinen bauen ja die sie antreibenden Temperaturgradienten durch Strömungsprozesse selbst ab – durch hohe und niedrige Bodentemperaturen entstehende Hoch- und Tiefdruckgebiete beispielsweise verursachen einen Ausgleichswind, der am Boden kühle Luft in wärmere Regionen verbringt (s. [Kle12]).

Die im Lernmodul getätigten Abschätzungen gelten dennoch als Maximalgrenzen, sie geben demnach ein absolutes Limit an, das einen vollkommenen Entzug der Energie aus den Geosystemen bedeuten würde. Realistisch sind solche Werte demnach nicht, vielmehr müssen berechnete Ergebnisse korrigiert werden - nutzbare Leistungen nach unten, benötigte Flächen nach oben. Liegen die Leistungsdichten dennoch in derselben Größenordnung wie die „Carnot-Abschätzungen“, so kann davon ausgegangen werden, dass bereits eine Verdichtung der Leistung stattgefunden hat. Die geschieht nur an hervorragenden Standorten mit besonderen geographischen Eigenschaften. Solche Orte können allerdings nicht als Beispiel für globale Betrachtungen dienen.

## 5.2 Lernmodul 3

### 5.2.1 Konventionelle Energieträger

#### 5.2.1.1 Fossile Brennstoffe

Als fossile Brennstoffe werden diejenigen Energieträger bezeichnet, die „von organischen Substanzen stammen, die aus Pflanzen und Tieren vergangener geologischer Perioden entstanden sind“ (s. [SS09]). Zu diesen zählen Kohle, Erdgas und Erdöl. Kohle beispielsweise entsteht, wenn sich Pflanzenreste in Senkungsgebieten ansammeln und unter dicken Schichten, also hohem Druck und unter Sauerstoffabschluss, über mehrere Millionen Jahre zusammengepresst werden. Streng genommen sind fossile Energieträger also chemisch gespeicherte Sonnenenergie. Allerdings sind die Akkumulationszeiten sehr hoch.

Diese Energieträger spielten seit Anbeginn der industriellen Revolution eine entscheidende Rolle in der Energieversorgung der Menschen, sei es durch die Entwicklung der Dampfmaschine oder die Erzeugung von Strom mittels fossiler Energieträger. Beim Verbrennen von Erdgas, -öl oder Kohle wird die in den chemischen Bindungen gespeicherte Energie freigesetzt, die Wärme kann nun weiter genutzt werden. So werden beim Verbrennen von einem Kilogramm Kohle etwa 25-30 Megajoule verfügbar (oft werden Energiemengen in der Einheit SKE, der Steinkohleeinheit, angegeben. Eine SKE ist als Energiemenge von 29,307 Megajoule definiert). Im Vergleich zur Steinkohle werden beim Verbrennen von 1 kg Rohöl etwa 1,43 SKE und bei einem Kubikmeter Erdgas ca. 1,08 SKE an Energie freigesetzt. Auf unterschiedliche Sorten von Kohle, Erdgas und -öl (Braun-, Stein-, Pechkohle usw.) soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Will man Reichweiten von Energieträgern untersuchen (dies gilt auch für die Kernbrennstoffe), so muss zunächst zwischen Ressourcen und Reserven unterschieden werden (s. Abb. 5.2, vgl. [BGR17]).

**Reserven** sind diejenigen Rohstoffmengen, welche einerseits nachgewiesen sind und andererseits mit der heutigen zur Verfügung stehenden Technik und zu heutigen Preisen wirtschaftlich gewinnbringend abbaubar sind.

**Ressourcen** sind diejenigen Rohstoffmengen, welche entweder nachgewiesen sind, aber nicht gewinnbringend und/ oder technisch noch

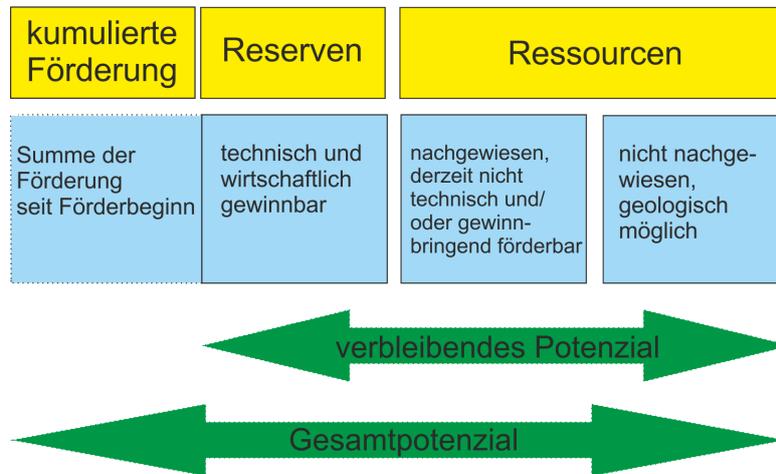


Abbildung 5.2: Als kumulierte Förderung wird die Summe der Förderung seit deren Beginn bezeichnet. Zusammen mit den Reserven und den Ressourcen ergibt sich das mögliche Gesamtpotenzial eines Energierohstoffes.

nicht abbaubar sind oder zwar vermutete, jedoch noch nicht lokalisierte Vorkommen.

Der Übergang zwischen Ressourcen und Reserven ist fließend, da immer mehr Technologien zum Abbau von Energierohstoffen entwickelt werden, die deren Gewinnung entweder finanziell lukrativer oder gar erst möglich machen. Da die Erdkruste bzw. die für den Bergbau interessanten Schichten weitgehend geologisch erforscht sind, sind Schätzungen der Reserven relativ sicher.

Nach derzeitigen Berechnungen belaufen sich die globalen Reserven inklusive der Kernenergie auf etwa 40 000 Exajoule, die Ressourcen liegen bei ca. 550 000 Exajoule (Stand 2017, Quelle: [BGR17]). Um Schätzungen für Reichweiten vorzunehmen, muss, wie in Kapitel 3 beschrieben, zwischen linearen und dynamischen Reichweiten unterschieden werden. „[...] [L]ineare Verbrauchsreichweiten sind fiktive Reichweiten, für welche Vorräte reichen würden, wenn wir sie in genau dem Tempo konsumieren, wie wir es heute tun“ (s. [JS14], S. 118). Diese Annahme einer gleichbleibenden Nutzung ist, zumindest zum jetzigen Zeitpunkt, unrealistisch. Ein andere Abschätzungsmöglichkeit sind die sogenannten dynamischen. Diese gelten bei wachsendem Verbrauch. Bei diesen wird einerseits ein gleichbleibendes exponentielles Wachstum angenommen und andererseits ein gleichbleibender Abbau der Rohstoffe, bis diese zur Neige gehen. Letzterer Aspekt ist allerdings ebenfalls unrealistisch, da bereits vor dem vollständigen Abbau der Lagerstätten

ein Mangel der Rohstoffe auftritt bzw. der Abbau immer langsamer vorstattengeht. Das heißt beide Betrachtungen der Verbrauchsreichweiten geben keine genaue Auskunft, allerdings erhält man eine gewisse Vorstellung, wie lange der jetzige Verbrauch fossiler Rohstoffe weiter gehen könnte. Laut BGR (s.o.) reichen die Vorräte, also die Summe der Ressourcen und Reserven für „viele Jahrzehnte“ (s. [BGR17]), ob diese sehr ungenaue Angabe ein weiteres ungebremstes Wachstum rechtfertigt, sei dahin gestellt.

Untersucht man weiter (zuerst) die linearen Verbrauchsreichweiten, dividiert man die Energiemenge der Vorräte durch den jährlichen Energiebedarf an fossilen Brennstoffen. Dadurch ergeben sich folgende Werte für die verschiedenen Energieträger:

<b>Kohle</b>	<b>Erdgas</b>	<b>Erdöl</b>
3000 a	> 800 a	164 a

**Tabelle 5.1: Lineare Verbrauchsreichweiten der fossilen Energierohstoffe in Jahren (nach [JS14], S.140).**

Betrachtet man hingegen die dynamischen Reichweiten, bei hypothetischem, konstantem Anstieg im Umsatz, so ergeben sich nach Jacoby und Schwarz folgende Werte:

<b>Rohstoff</b>	<b>4%</b>	<b>2%</b>	<b>0,5%</b>
<b>Kohle</b>	122 a	207 a	540 a
<b>Erdgas</b>	89 a	143 a	320 a
<b>Erdöl</b>	51 a	73 a	120 a

**Tabelle 5.2: Dynamische Verbrauchsreichweiten der fossilen Rohstoffe in Jahren (nach [JS14], S.142).**

Die angegebenen Reichweiten sind, wie bereits erwähnt, nicht als scharfe Werte zu sehen, d.h., dass diese nicht zwangsläufig genau nach 207 Jahren bei zweiprozentigem Wachstum im Verbrauch von Kohle plötzlich erschöpft ist. Vielmehr sollen diese Werte, wie so oft, die prinzipiellen Grenzen darlegen – und diese sind zeitlich nicht mehr allzu weit von der Gegenwart entfernt.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Berechnung von Reichweiten tatsächlich extrem empfindlich von den in den verschiedenen Literaturquellen angegebenen Vorratsmengen abhängt. Es bleibt der Verdacht, dass solche Angaben durchaus auch durch Lobbytätigkeit in die eine oder andere Richtung verschoben werden. Grundsätzlich unbeeindruckt davon bleibt die Gesamtfeststellung einer zeitlich relativ naheliegenden Erschöpfung für einige Vorräte.

Unabhängig von der künftigen Entwicklung in der Energiewende bzw. im Umgang mit fossilen Brennstoffen sind und bleiben die Fossilen vorerst die wichtigsten Energieträger weltweit. Neben der Nutzung als Brennstoffe für Heizkraftwerke oder als Treibstoff für Autos und Flugzeuge, stecken in vielen Alltagsprodukten chemische Stoffe, die beispielsweise aus Rohöl gewonnen werden. Als Beispiele seien hier PVC (Polyvinylchlorid) oder Polyurethan genannt. Endprodukte, wie verschiedene Kunststoffe, Reinigungsmittel oder pharmazeutische Produkte wären ohne Erdöl nicht denkbar.

Ein großer Vorteil gegenüber einigen anderen Energieträgern ist einerseits die Deckung der Grundlast des Bedarfs an elektrischem Strom, da die Kraftwerke (in Deutschland werden größtenteils Kohlekraftwerke verwendet) dauerhaft in Betrieb sein können und bis auf Wartungsarbeiten auch meist sind. Ebenso kann mit konventionellen Kraftwerken flexibel auf Schwankungen im Strombedarf reagiert werden. So lässt sich die erzeugte Leistung im 15-Minuten-Takt auf- bzw. abregeln (vgl. [Ago17]). Durch das Bereitstellen der Grundlast und die gleichzeitige Flexibilität sind konventionelle Kraftwerke (also auch Kernkraftwerke) in diesen Punkten den regenerativen Energien voraus (vgl. Kapitel 5.2.3 ).

### 5.2.1.2 Kernspaltung und Kernfusion

Als immer wieder genannte alternative Energiequellen zu fossilen Brennstoffen tauchen häufiger die Kernkraft und Kernfusion auf. Auch wenn meist die Gefahren im Vordergrund der Argumentation bzw. Diskussion stehen, lohnt sich dennoch ein Blick auf den Nutzen dieser Energiequellen.

#### Massendefekt und Bindungsenergie

Jedes Atom besteht aus einer bestimmten Anzahl von Protonen, Neutronen und Elektronen. Theoretisch sollte sich, sofern die oben genannten Bestandteile be-

kannt sind, die Masse eines Atoms genau bestimmen lassen. Am Beispiel des Helium-4-Atoms ergibt dies folgendes<sup>2</sup>:

- Masse eines Protons:  $m_p = 1,007276467u$
- Masse eines Neutrons:  $m_n = 1,008664916u$
- Masse eines Elektrons:  $m_e = 0,000548580u$

Ein Helium-4-Atom besteht aus jeweils zwei Elektronen, Protonen und Neutronen, folglich erhält man für die Summe dieser Massen:

$$2m_p + 2m_n + 2m_e = 4,032980u \quad (5.14)$$

Mit Hilfe eines Massenspektrometers lassen sich Atommassen sehr genau bestimmen. Die Masse eines  ${}^4\text{He}$ -Atoms beträgt  $4,002604u$ . Dadurch ergibt sich zu der berechneten Summe der Massen eine Differenz von:

$$\Delta m = 0,030376u \quad (5.15)$$

Das Atom ist also etwas leichter als die Summe der Massen der Nukleonen. Dies gilt nicht nur für das betrachtete Helium-Atom, sondern für jedes beliebige Atom. Die Differenz  $\Delta m$  wird als Massendefekt bezeichnet. Allgemein kann der Massendefekt, analog zur obigen Rechnung, aus der Massenzahl  $A$ , der Kernladungszahl  $Z$  und der Kernmasse  $m_{\text{Kern}}$  berechnet werden:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{Kern}} \quad (5.16)$$

$N$  gibt die Anzahl der Neutronen an, welche sich aus der Differenz der Massenzahl und der Kernladungszahl ergibt:  $N = A - Z$ .

Die Masse der Elektronen bzw. der Atomhülle kann aufgrund der geringen Werte gegenüber den Nukleonen vernachlässigt werden.

Da die fehlende Masse nicht ins Nichts verschwinden kann, muss sie gemäß der Formel  $E = mc^2$  einer Energie entsprechen, die beim Zusammenführen der Protonen und Neutronen frei wird. Daher kann dieser Energiebetrag als Bindungsenergie betrachtet werden:

<sup>2</sup>Die Massen sind in der atomaren Masseneinheit  $u$  angegeben. Ein  $u$  entspricht dem zwölften Anteil eines Kohlenstoff-12-Atoms.

$$E_B = \Delta m \cdot c^2 \quad (5.17)$$

$c$  ist dabei die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Für die gesamte Kernbindungsenergie erhält man, ausgedrückt mit dem berechneten Massendefekt:

$$E_B = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{Kern}}) \cdot c^2 \quad (5.18)$$

Für die Bindungsenergie des Helium-4-Atoms ergibt sich mit dem bereits berechneten Wert des Massendefekts<sup>3</sup>:

$$\Delta E = 5,04405 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot \left( 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \approx 4,533 \cdot 10^{-12} \text{ J} \approx 28,3 \text{ MeV} \quad (5.19)$$

Die Bindungsenergien der Atomkerne, die alle etwa im Megaelektronenvolt-Bereich liegen, sind etwa um den Faktor  $10^6$  größer, als die der Elektronen in der Hülle von Atomen.

Um eine Vergleichbarkeit der Bindungsenergien verschiedener Atome zu erzielen, bietet sich die sogenannte mittlere Bindungsenergie pro Nukleon an. Diese erhält man, indem man die Bindungsenergie des gesamten Kerns  $E_B$  durch die Anzahl der Nukleonen  $A$  dividiert. Am Beispiel des Helium-4-Atomkerns ergibt dies:

$$\frac{E_B}{A} = \frac{28,3 \text{ MeV}}{4} = 7,07 \text{ MeV}. \quad (5.20)$$

Anhand von Abbildung 5.3 lässt sich erkennen, dass die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon nicht konstant ist, sondern stark davon abhängig ist, in was für einem Atomkern sich dieses Nukleon befindet. Bei der Massenzahl  $A = 56$  wird ein Maximum erreicht. Schafft man es mit Hilfe physikalischer Prozesse kleine Atomkerne miteinander zu verschmelzen, so ist der neu entstandene Kern etwas leichter als die Indukte, die Massendifferenz wird in Form von Energie frei. Das gleiche Prinzip gilt für das Spalten oder den radioaktiven Zerfall schwerer Kerne:

<sup>3</sup>Der Massendefekt muss zunächst in SI-Einheiten umgerechnet werden.  $1u$  entspricht  $1,660538921 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , der Massendefekt beträgt somit  $\Delta m = 5,04405 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$ .

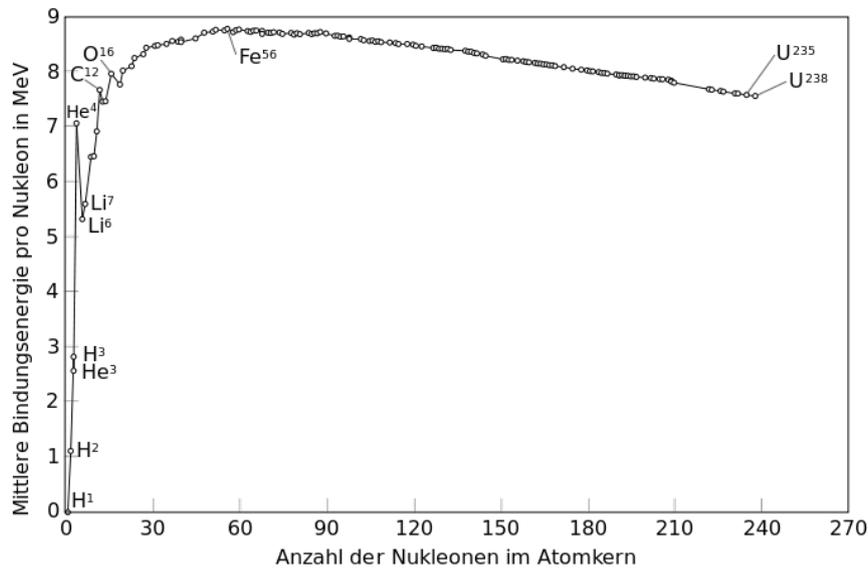


Abbildung 5.3: **Betrag der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit der Massenzahl A (Quelle: [Enea]).**

ist der Ausgangskern schwerer als die Summe der Massen der Tochterkerne, so wird die dem Massendefekt entsprechende Energiemenge freigesetzt.

Dies heißt für eine mögliche technische Nutzung, dass entweder leichte Atomkerne (z.B. Wasserstoff, Helium) fusioniert oder schwere Kerne (z.B. Uran, Thorium, Plutonium) gespalten werden müssen.

### Kernspaltung

Bei sehr schweren Kernen, gemeint sind jene Elemente, deren Kernladungszahl größer als 92 ist, tritt spontane Kernspaltung auf. Diese Kerne zerfallen ohne äußere Einwirkung. Analog zu einem Wassertropfchen verhält sich auch ein Atomkern. Solange das Tröpfchen nicht zu groß ist, hält die Oberflächenspannung dieses zusammen. Wird die maximale Größe jedoch überschritten, wird es instabil und spaltet kleinere Tröpfchen ab oder zerplatzt. Bei Atomkernen entspricht diese Oberflächenspannung der starken Kernkraft, die zwischen benachbarten Nukleonen wirkt. Sie ist im Vergleich zur abstoßenden Coulombkraft stärker, hat jedoch eine sehr begrenzte Reichweite. Je mehr Protonen in einem Kern vorhanden sind, desto größer wird infolge der positiven Ladung die Abstoßung. Dadurch werden größere Kerne instabiler.



Abbildung 5.4: **Analogie des Tröpfchenmodells. Wird der Atomkern zu groß, so wird er instabil und zerplatzt. Hier wird für dieses Analogieexperiment ein Wassertropfen auf eine heiße Herdplatte gebracht. Aufgrund des Leidenfrosteffektes verdampft dieser nicht sofort, sondern wird zur Schwingungen angeregt.**

Einige Atome, darunter Uran und Plutonium, können zur Spaltung angeregt werden, indem sie Neutronen einfangen. Im Falle des Uran-235 gelangt dieses in einen angeregten Zustand und zerfällt anschließend in zwei kleinere Tochterkerne, wodurch erneut mehrere Neutronen freigesetzt werden. Da der Urankern schwerer ist, als die Summe der Tochterkerne, wird durch die Spaltung (thermische) Energie frei. Pro Atom sind dies etwa 200 MeV bzw. 1 MeV pro Nukleon. Im Vergleich dazu, werden bei einer typischen Verbrennungsreaktion ca. 4 eV pro Sauerstoffatom frei (vgl. [TBD14], S. 1332). Noch deutlicher wird der Größenunterschied, wenn man die Energie berechnet, die bei der Spaltung von 1 kg Uran-235 freigesetzt wird.

Die gesamte freiwerdende Energie ergibt sich aus der Anzahl der Kerne multipliziert mit der Energie pro Kern:

$$E = n \cdot \frac{200 \text{ MeV}}{\text{Kern}} \quad (5.21)$$

Um die Anzahl der Kerne zu erhalten, die in einem Kilogramm Uran enthalten sind, benötigt man die molare Masse:

$$n = \frac{N_A}{m_{\text{mol}}} \cdot 1 \text{ kg} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{Kerne}}{\text{mol}}}{0,235 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} \cdot 1 \text{ kg} = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ Kerne} \quad (5.22)$$

Damit erhält man für die Gesamtenergie:

$$E = n \cdot \frac{200 \text{ MeV}}{\text{Kern}} = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ Kerne} \cdot \frac{2 \cdot 10^8 \text{ eV}}{\text{Kern}} \quad (5.23)$$

$$= 5,12 \cdot 10^{32} \text{ eV} = 8,19 \cdot 10^{13} \text{ J} = 81,9 \text{ TJ} \quad (5.24)$$

Im Vergleich dazu erhält man beim Verbrennen von 1 kg Steinkohle etwa 25-30 MJ, also einen um sieben Größenordnungen kleineren Betrag. 1 kg Natururan, dessen Anteil an spaltbarem Uran-235 bei etwas unter einem Prozent liegt, hat einen Energiegehalt von ca. 18-20 000 kg Steinkohle. Zurzeit gibt es weltweit in 31 Ländern 435 Kernreaktoren mit einer Bereitstellung elektrischer Leistung von ca. 370 GW.

Allerdings ist bei den enormen Vorteilen, die man bei dem Energiegewinn hat, zu bemerken, dass einerseits die nutzbaren Rohstoffe, also hauptsächlich Uran-235, sehr selten sind und nur durch aufwändige Verfahren gewonnen werden können. Ein weiterer möglicher Brennstoff ist Plutonium-239, welcher durch Umwandlung von Uran-238 erhalten werden kann. Dieses Verfahren ist auch unter dem Begriff der „Schnellen Brüter“ bekannt.

Andererseits ist die Gefahr von Reaktorzwischenfällen oder Störfällen, je nach Bauart des Reaktors, nicht vernachlässigbar klein. Gerade letztgenannte Methode ist aufgrund hoher Betriebstemperaturen und fehlender Moderatoren weniger gut kontrollierbar. Derzeit werden andere Spaltungsreakortypen mit großem Aufwand beforscht, unter anderem versucht man die bisher nicht technisch realisierte Nutzung des Kernbrennstoffs Thorium zu ermöglichen.

Anfallender Atommüll, welcher dauerhaft gelagert werden muss – bei hochradioaktiven Abfällen ist eine sichere Lagerung über den Zeitraum von einer Millionen Jahre vorgeschrieben (s. [Pre]) – ist ein weiteres Argument gegen die Nutzung von Kernenergie.

### **Kernfusion**

Bei der Kernfusion verschmelzen, wie eingangs erwähnt, leichtere Atomkernbestandteile zu einem neuen, schwereren Kern. Auch hier wird aufgrund des Massendefekts und der Äquivalenz zwischen Masse und Energie ein großer Energie-

betrag freigesetzt. Am Beispiel der Fusion eines Deuterium- bzw. Wasserstoff-2-Kerns und eines Tritium- bzw. Wasserstoff-3-Kerns zu einem Helium-4-Kern wird deutlich, es werden  $17,6\text{MeV}$  frei. Pro Nukleon werden also

$$\frac{17,6\text{MeV}}{5\text{Nukleonen}} = 3,52\frac{\text{MeV}}{\text{Nukleon}}$$

freigesetzt (s. Abb. 5.5). Generell kann man größenordnungsmäßig sagen, dass die Fusionsenergie bei typischen Fusionsprozessen ca. 3,5-mal höher ist, als diejenige, die bei typischen Kernspaltungsprozessen frei wird (s.o.). Ein Gramm eines Eins-zu-Eins-Gemischs aus Deuterium und Tritium enthält

$$n = \left( \frac{N_A}{m_D} + \frac{N_A}{m_T} \right) \cdot 1\text{g} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.25)$$

$$= \left( \frac{6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{Kerne}}{\text{mol}}}{2,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} + \frac{6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{Kerne}}{\text{mol}}}{3,02 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right) \cdot 1\text{g} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.26)$$

$$= 2,51 \cdot 10^{23} \text{ Kerne} \quad (5.27)$$

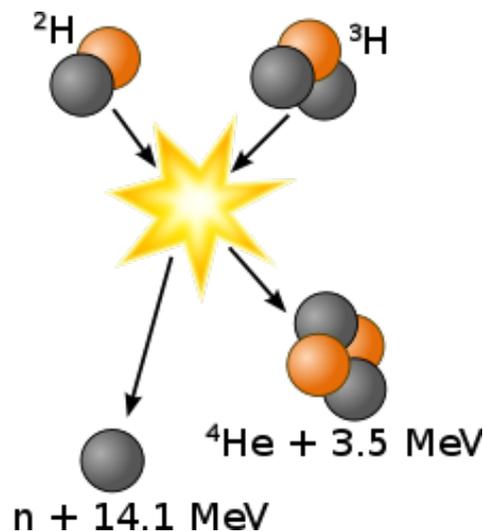


Abbildung 5.5: Fusion eines Deuterium- und eines Tritium-Kerns zu Helium-4 (Quelle: [Deua]).

Pro zwei fusionierenden Deuterium- und Tritiumkernen werden  $17,6 \cdot 10^6$  MeV frei, also insgesamt:

$$E = 2,51 \cdot 10^{23} \text{ Kerne} \cdot \frac{17,6 \cdot 10^6 \text{ MeV}}{2 \text{ Kerne}} \quad (5.28)$$

$$= 2,21 \cdot 10^{30} \text{ eV} = 3,53 \cdot 10^{11} \text{ J} = 353 \text{ GJ} \quad (5.29)$$

Für diese Energie wären ca. 13,5 Tonnen Steinkohle nötig.

Um eine solche Fusion jedoch in Gang bringen zu können, sind Temperaturen von 100 bis 150 Millionen Kelvin notwendig. Da der Wasserstoff bei diesen Temperaturen ein Plasma bildet, kann bzw. muss dieses durch starke Magnetfelder eingeschlossen werden. Bei Berührung mit den Reaktorwänden würde das Plasma sofort auskühlen, die Fusion würde zusammenbrechen. Solch hohe Temperaturen sind notwendig, damit die Protonen sich entgegen der abstoßenden Coulombkraft weit genug nähern können, bis die starke Kernkraft überwiegt. Laut klassischer Mechanik können Teilchen einen Potenzialwall nur dann überwinden, wenn deren kinetische Energie mindestens der Höhe des Potenzialwalls entspricht (s. Abb. 5.6). Quantenobjekte, so auch Protonen, können den Wall mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auch durch das sogenannte Tunneln durchdringen, obwohl die Energie klassisch gesehen zu gering wäre (s. Abb. 5.7). Jedoch sind auch hier zum Erzielen merklicher Durchtunnelungswahrscheinlichkeiten entsprechend hohe kinetische Energien erforderlich (vgl. [Har13]).

Im Verhältnis zur Kernspaltung bzw. „konventionellen“ Kernkraftwerken ist die Kernfusion vom potenziellen Energiegewinn her deutlich überlegen. Weitere Vorteile gegenüber der Nutzung fossiler Brennstoffe und der Kernspaltung sind beispielsweise der quasi unbegrenzt verfügbare Brennstoff: Deuterium kann in großen Mengen aus dem Wasser der Erde gewonnen werden, Tritium durch „Erbrüten“ aus Lithium-6 im Fusionsreaktor selbst. Ebenso ist die Betreibung eines Fusionsreaktors eher ungefährlich, insofern es zu keinen unkontrollierten Kettenreaktionen oder Unfällen kommen kann. Einerseits sind die genutzten Materialien im Vergleich nicht so stark radioaktiv, andererseits schaltet sich der Fusionsreaktor ohne äußeren Energieinput von alleine ab. Da die Gefahren geringer sind und auch keine hochradioaktiven Abfallstoffe entstehen, besteht die Möglichkeit einer größeren Akzeptanz dieser Technologie in der Gesellschaft. Als Nachteil ist

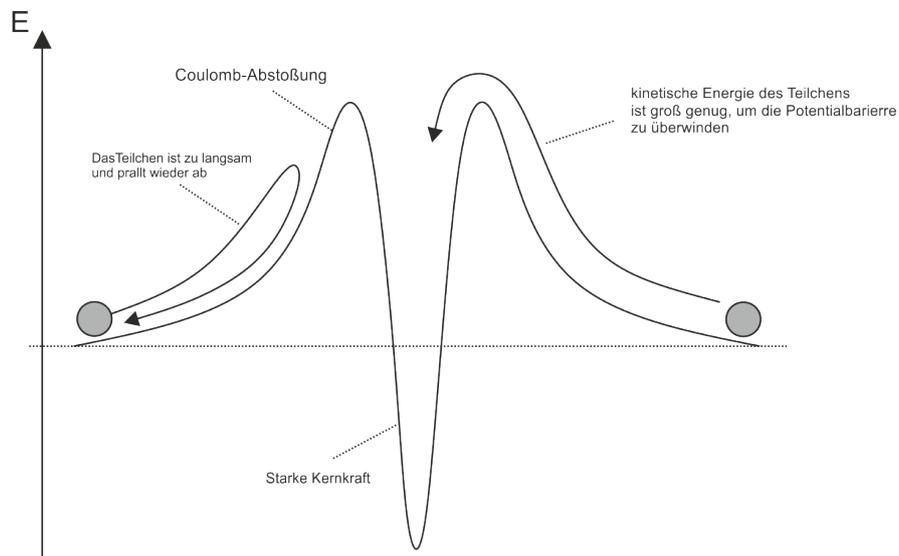


Abbildung 5.6: Die fusionierenden Teilchen benötigen aus Sicht der klassischen Physik eine bestimmte kinetische Energie, um den Potentialwall der Coulomb-Abstoßung zu überwinden und in einen energetisch niedrigeren Zustand zu gelangen (eigene Darstellung, frei nach [Har13]).

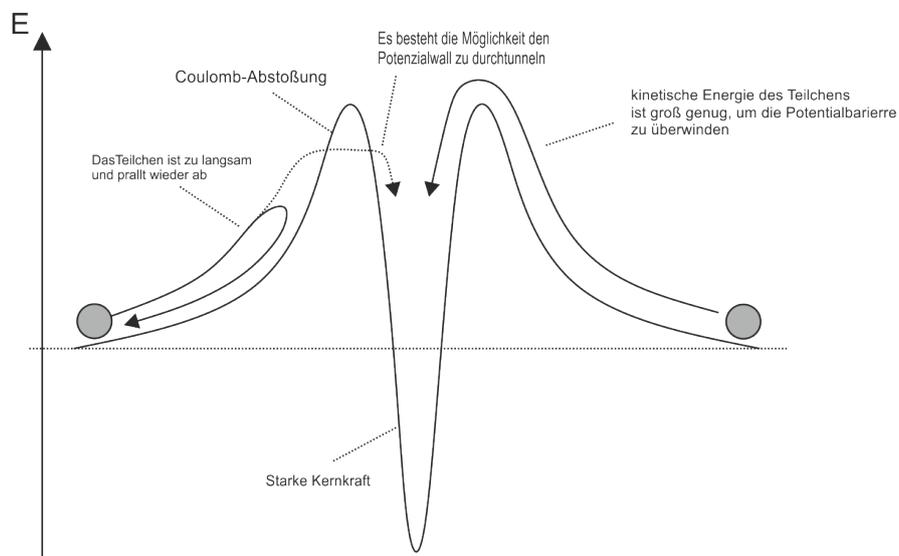


Abbildung 5.7: Die Quantenmechanik eröffnet eine Fusionswahrscheinlichkeit durch den sogenannten Tunneleffekt.

zu benennen, dass neben dem hochtechnisierten Aufwand für den Betrieb eine allmähliche Verstrahlung der Fusionsreaktorwände durch die entstehenden Neutronen erfolgt, die sich dort anlagern.

Allerdings sind jetzige Fusionsreaktoren lediglich Experiment- bzw. Forschungsreaktoren. Auch wenn die ersten Versuchsreaktoren bereits in den 50er Jahren gebaut wurden, konnte bislang noch kein Versuch mit positiver Energiebilanz verzeichnet werden. Da weiter geforscht werden muss, um die drei entscheidenden Größen Temperatur, Teilchendichte und Energieeinschlusszeit weiter zu vergrößern, wird mit einer ersten funktionierenden, stromliefernden Demonstrationsanlage DEMO ab den 40er Jahren dieses Jahrhunderts gerechnet. Dieses soll den Weg für kommerzielle Fusionskraftwerke ebnen (vgl. [Max]).

Sollte dieser Schritt für die kommerzielle Nutzung getan sein, so wäre die Kernfusion eine wirkliche Alternative den steigenden Leistungsbedarf der Menschheit zu decken. Jedoch hat auch diese relativ saubere Energiequelle keinen Einfluss auf die globale Temperaturzunahme aufgrund des immer höheren Energieeintrags in die Geosysteme (s. Kapitel 3 und 4).

## 5.2.2 Regenerative Energieträger

### 5.2.2.1 Die Solarenergie

Die Sonne besitzt als regenerative Energiequelle eine herausragende Stellung. Mit Ausnahme von Gezeiten und Geothermie werden alle anderen Energieträger wie etwa Windkraft und Biomasse durch die Strahlungsleistung der Sonne gespeist, daher besitzen sie eine natürliche obere Grenze.

Die Sonne besitzt eine Strahlungsleistung von  $L_{\text{Sonne}} = 3,8 \cdot 10^{26}$  Watt und strahlt diese isotrop ab, d.h. in alle Raumrichtungen gleichmäßig. Im Abstand von einer Astronomischen Einheit, also dem Abstand ‚Erde-Sonne‘, erhält jeder Quadratmeter einer gedachten Sphäre mit der Sonne als Zentrum die Strahlungsleistung:

$$s = \frac{L_{\text{Sonne}}}{4\pi \cdot r^2} = \frac{3,8 \cdot 10^{26} \text{ Watt}}{4\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1368 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.30)$$

Dieser Wert ist die bereits bekannte Solarkonstante.

Versuche zur experimentellen Bestimmung der Solarkonstanten im Schulunterricht sind in der Literatur einige bekannt. Die nachfolgend genannten Experimente wurden im Rahmen von der Erprobung durch den Autor dieser Arbeit verbessert.

### **Experimentelle Bestimmung der Solarkonstanten 1**

Für die Bestimmung der Solarkonstanten bzw. der Strahlungsintensität der Sonne mit relativ einfach zugänglichen Mitteln soll folgender Versuch dienen (vgl. hierzu [Ack14]).

#### ***Material:***

- Getränkedose
- Thermometer
- Stopfen mit Loch
- Styropor
- Schwarze Farbe
- Wasser
- Stoppuhr

#### ***Vorbereitungen und Durchführung:***

Zunächst wird die Getränkedose seitlich aufgebohrt und über dieses Loch entleert. Der Boden wird mit der schwarzen Farbe bemalt, so dass möglichst viel der Sonnenstrahlung absorbiert wird. Um den Wärmeaustausch mit der Umgebung gering zu halten, wird die Getränkedose mit Styropor ummantelt, der angestrichene Boden und ein Loch für das Thermometer sollen dabei freigehalten werden. Anschließend wird die Dose über das Loch vollständig mit Wasser gefüllt, welches eine Temperatur von etwa  $2^{\circ}\text{C}$  unterhalb der Außentemperatur haben sollte. Das Loch wird nun mit dem Stopfen und dem Thermometer verschlossen.

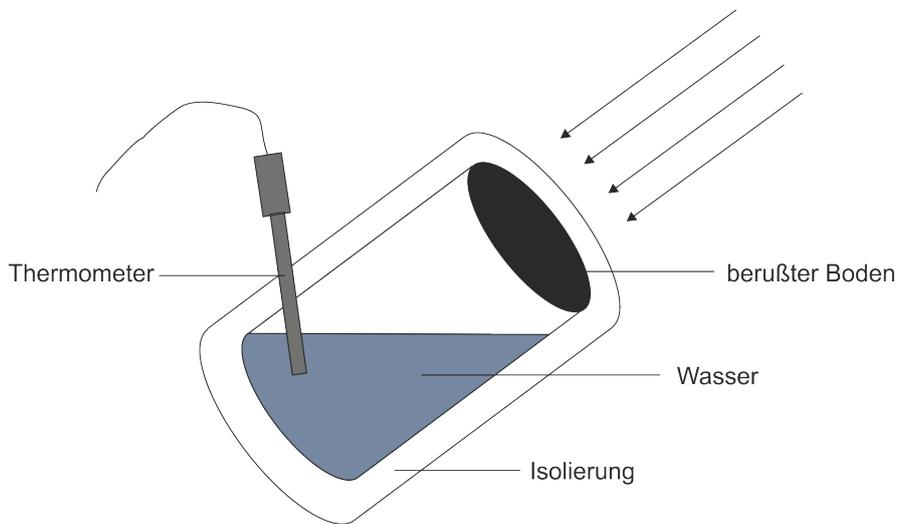


Abbildung 5.8: **Schematischer Versuchsaufbau des Experiments.**

Sind die Vorbereitungen abgeschlossen, wird die Dose bei möglichst wolkenfreiem Himmel mit der bestrichenen Seite senkrecht zur Sonne gerichtet (s. Abbildung 5.8). Es wird die Zeit gemessen, die benötigt wird, bis die Temperatur des Wassers etwas über der Außentemperatur liegt.

**Auswertung:**

Die Strahlungsleistung berechnet sich aus der Zeit  $t$  und der aufgenommenen Wärme  $Q$ :

$$P = \frac{Q}{t} \quad (5.31)$$

Um die Solarkonstante zu erhalten, muss zusätzlich durch die Grundfläche der Getränkedose dividiert werden:

$$s = \frac{Q_s}{A \cdot \Delta t} = \frac{m \cdot c_W \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t} \quad (5.32)$$

(hier wird vorausgesetzt, dass die Wärmestrahlung  $Q_s$  gleich der vom Wasser aufgenommenen Wärme  $Q_W$  ist). Mit den aufgenommenen Messwerten von  $\Delta t = 150s$  und  $\Delta T = 2,5K$ , der spezifischen Wärmekapazität von Wasser mit  $c_W = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ , dem Radius der Dose von  $3,7cm$  und der Masse des enthaltenen Wassers von  $m = 59,3g$  erhält man:

$$s = \frac{Q_s}{A \cdot \Delta t} \approx 960 \frac{W}{m^2}. \quad (5.33)$$

Will man noch berücksichtigen, dass auch die Aluminiumdose erwärmt wurde, so ergibt sich ein anderer Wert. Hier ist zu beachten, dass sich die Wärmestrahlung  $Q_s$  auf das Wasser und die Getränkedose aufteilt:

$$Q_s = Q_W + Q_{Al} \quad (5.34)$$

Damit ergibt sich für die Solarkonstante folgender Wert:

$$s = \frac{(m_W \cdot c_W + m_{Al} \cdot c_{Al}) \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t} \approx 1040 \frac{W}{m^2} \quad (5.35)$$

Dieser Wert hat gegenüber dem Literaturwert von  $s_{Lit} = 1368 \frac{W}{m^2}$  einen Fehler von rund 24%. Dies kann verschiedene Gründe haben: Sobald das Wasser eine andere Temperatur als die Umgebung besitzt, kann hierdurch ein Wärmeaustausch erfolgen. Dieser soll durch die Styroporisolierung vermindert werden, gänzlich verhindern lässt sich dies allerdings nicht. Des Weiteren wird nicht die gesamte eingestrahlte Wärme der Sonne aufgenommen, ein Teil wird trotz des geschwärzten Bodens reflektiert und geht somit nicht in die Wärmebilanz ein. Und schließlich ist zu bedenken, dass die Solarkonstante ein Idealwert ist, der außerhalb der Erdatmosphäre gemessen werden muss.

### Experimentelle Bestimmung der Solarkonstanten 2

Ein weiteres Experiment zur quantitativen Bestimmung der Solarkonstanten soll im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

#### **Material:**

- Elektrische Herdplatte (transportabel)
- Infrarotthermometer
- Messgerät für elektrische Spannung und Stromstärke (ggf. Sicherheitssteckdose)

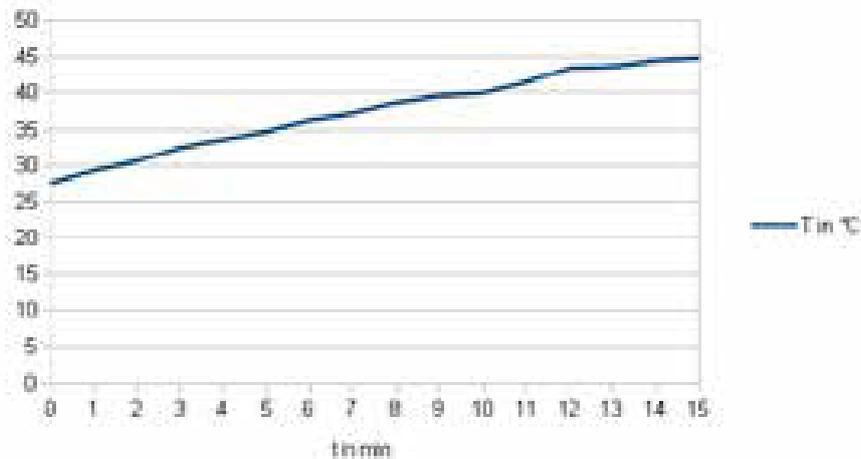


Abbildung 5.9: Messkurve aus Versuchsteil a).

### **Durchführung:**

Die Herdplatte wird bei wolkenlosem Himmel in die Sonne gestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Sonnenstrahlen möglichst senkrecht auf die Platte treffen. Mit Hilfe des Infrarotthermometers wird 15 Minuten lang im Minutenintervall die Temperatur gemessen.

Nachdem die Kochplatte wieder abgekühlt ist, wird sie durch elektrische Energie auf die erreichte Maximaltemperatur des ersten Versuchsteils aufgeheizt. Dazu werden die elektrische Spannung, die Stromstärke und die benötigte Zeit gemessen (vgl. [Dor12]).

### **Auswertung**

Anhand dieser Messdaten lässt sich der Wert der von der Sonne übertragenen Energie berechnen:

Die Messwerte aus Versuchsteil a) ergeben folgendes Diagramm (s. Abb. 5.9). Die Maximaltemperatur nach  $t = 15$  Minuten beträgt  $\vartheta(15\text{min}) = 45^\circ\text{C}$ . Die Zeit, die in Versuchsteil b) benötigt wurde, um diese Temperatur zu erreichen, beträgt  $t' = 26$  Sekunden.

Aus den Daten der Herdplatte ( $U=226\text{ V}$ ;  $I=6,34\text{ A}$ ) lässt sich so die elektrische Energie bestimmen, die benötigt wurde, um die Herdplatte auf  $45^\circ\text{C}$  zu erhitzen. Diese ist somit genauso groß wie die aufgenommene Wärme durch die Sonnenstrahlung in Versuchsteil a):  $Q_S = E_{el} = U \cdot I \cdot t'$ . Damit lassen sich Rückschlüsse auf die Strahlungsleistung der Sonne ziehen:

$$s = \frac{Q_s}{A \cdot \Delta t} = \frac{E_{el}}{A \cdot \Delta t} = \frac{U \cdot I \cdot t'}{A \cdot \Delta t} \quad (5.36)$$

$$= \frac{226V \cdot 6,34A \cdot 26s}{\pi \cdot (0,095m)^2 \cdot 900s} \approx 1404 \frac{W}{m^2}. \quad (5.37)$$

Dieser Wert liegt vergleichsweise nahe am Literaturwert (s.o.), allerdings muss er prinzipiell nach unten korrigiert werden. Ist die Umgebungstemperatur anfangs höher als die Temperatur der Herdplatte, so wie es bei der Messung der Fall war, findet ein zusätzlicher Wärmeaustausch statt, der einen zusätzlichen Eintrag in die Wärmebilanz mit sich bringt und somit die gemessene Strahlungsleistung erhöht. Zusätzlich verfälschen Messfehler der Zeit und vor allem der Temperatur durch das Infrarotthermometer das Ergebnis.

### **Abschätzung des globalen Strahlungseintrages der Sonne und der dadurch ermöglichten technischen Nutzung**

Die gesamte Querschnittsfläche der Erde erhält, wie bereits beschrieben, einen Leistungseintrag pro Quadratmeter in Höhe der Solarkonstante, so dass für die Erde insgesamt gilt:

$$P_{max} = A_Q \cdot s = \pi R^2 \cdot s \approx 10^{17} W, \quad (5.38)$$

wobei der Erdradius  $R = 6373 km$  beträgt.

Wie man aus der auftreffenden Gesamtstrahlungsleistung den Strahlungseintrag pro Quadratmeter Erdoberfläche ermittelt, wurde bereits ausführlich im Lernmodul 2 erläutert und ist dort bei Bedarf nachzulesen.

Will man weitere Aussagen über die Nutzungsgrenzen der Sonnenenergie tätigen, muss man ebenso berücksichtigen, dass die auf die Querschnittsfläche der Erde fallende Strahlung der Sonne, bedingt durch die Rotation der Erde, effektiv auf die gesamte Erdoberfläche verteilt wird. Somit erhält man den mittleren Strahlungseintrag auf der Erde von:

$$S = \frac{\pi R^2}{4\pi R^2} \cdot s \cdot (1 - A) = \frac{1}{4} \cdot s \cdot (1 - A) \approx 240 \frac{W}{m^2} \quad (5.39)$$

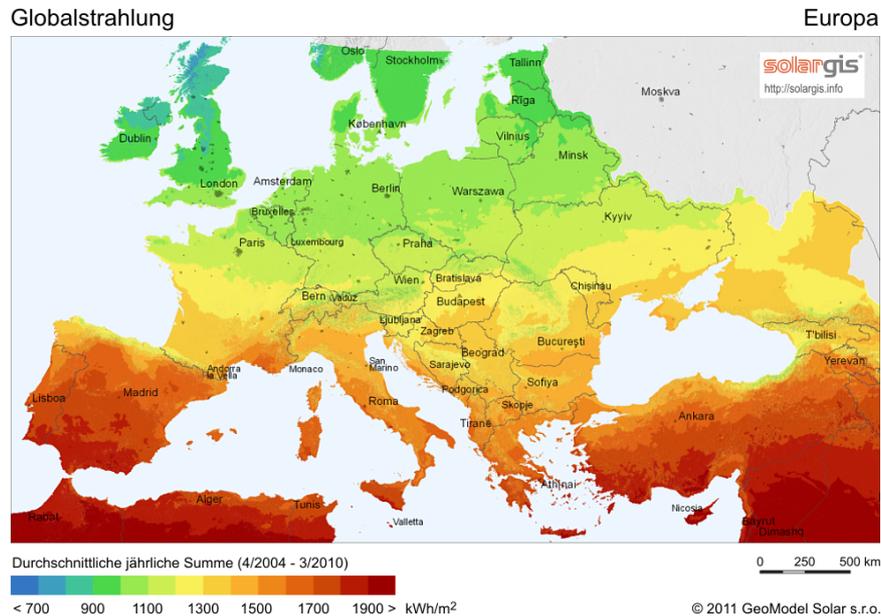


Abbildung 5.10: Darstellung des lokalen Strahlungseintrages in Europa in Kilowattstunden pro Quadratmeter (Quelle: [Sol]).

Dieser Wert ist, wie bereits erwähnt, ein globaler Mittelwert. Je nach geografischem Breitengrad divergiert dieser; in Teilen Afrikas liegt der mittlere Strahlungseintrag bei knapp 300 Watt pro Quadratmeter, in Deutschland etwa bei  $120\text{--}140 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

Nutzbar ist diese Energie durch Solarthermie- oder Photovoltaikanlagen oder aber auch in Form von Biomasse und Nahrung (s. Kap. 5.2.2.4).

Die Solarthermie wird genutzt, um Gebäude und Wasser direkt aufzuheizen, hier wird die hochwertige Sonnenenergie umgewandelt zu Heizwärme. Diese Anlagen besitzen einen Wirkungsgrad von etwa 50%, allerdings ist die thermische Energie eine Energieform niedriger Stufe. Ist die direkte Sonneneinstrahlung sehr hoch, wie etwa in trockenen Wüstenzonen, können auch sehr hohe Temperaturen im Bereich von  $100\text{--}1000^\circ\text{C}$  erreicht und damit in die hochwertige elektrische Energie umgewandelt werden. Bei diesen Anlagen beträgt der Wirkungsgrad etwa 30 Prozent.

Nutzt man eine Photovoltaikanlage zur Nutzung der solaren Strahlung, wird direkt elektrische Energie erzeugt. Die Effizienz typischer Solarmodule beträgt allerdings nur rund 10%, 20% bei teuren Modulen. In Solarfarmen muss zudem

beachtet werden, dass der Platz zwischen Modulen etwa drei Mal so groß wie das Modul selbst sein muss, damit der Schatten bei Neigung der Paneele nicht gegenseitig auf die Module fällt. Für  $1m^2$  Modulfläche werden somit  $4m^2$  Bodenfläche benötigt. Weitere Flächen werden für Einzäunungen, Zufahrtswege und Trafostationen benötigt.

Von dem globalen mittleren Strahlungseintrag auf der Erde von  $240\frac{W}{m^2}$  ist also wiederum nur ein Bruchteil technisch nutzbar:

$$P_{\text{nutzbar}} = 240\frac{W}{m^2} \cdot 0,25 \cdot 0,1 = 6\frac{W}{m^2} \quad (5.40)$$

Um zu überprüfen, ob die vorangegangenen Abschätzungen sinnvoll waren, muss ein Vergleich mit Realdaten getätigt werden. In Tabelle 5.3 sind die mittleren Leistungen einiger Solarfarmen und deren Flächenbedarf, sowie die daraus berechneten Leistungsdichten eingetragen:

Beispiel	Flächenbedarf	Gemittelte Leistung	Leistung pro Quadratmeter
Sarnia Solar Farm, Ontario (Photovoltaik)	$966.000 m^2$	120 GWh/a (bzw. 13,7 MW)	$14,18 \frac{W}{m^2}$
El Dorado & Copper Mountain Solar Project (Photovoltaik)	$720.000 m^2$	124 GWh/a (bzw. 14,2 MW)	$19,66 \frac{W}{m^2}$
Ivanpah Solar Electric Generating System (Solarthermie)	$14,2 km^2$	1,08 TWh/a (123 MW)	$8,7 \frac{W}{m^2}$
Mount Signal Solar Project	$7850000 m^2$	500 GWh/a (57 MW)	$7,3 \frac{W}{m^2}$
Ultra Mega Solar Power Plant	$77 km^2$	6,4 TWh/a (729,6 MW)	$9,5 \frac{W}{m^2}$

Tabelle 5.3: Auflistung der Flächenleistung einiger Solaranlagen (Datenquellen: [Sar], [Cop], [NRE], [PVT], [Spi]).

Man bedenke, dass hier einem globalen Mittelwert ausgewählte Standorte mit möglichst viel Sonneneinstrahlung gegenübergestellt werden. Es zeigt sich, dass die getroffenen Abschätzungen durchaus sinnvoll waren.

Anhand der Tabelle bzw. mit Hilfe der vorangegangenen Betrachtung lässt sich auf einfache Weise darstellen, wie viel Fläche die Menschen benötigen, um ihren zivilisatorischen Leistungsbedarf zu decken. Der gegenwärtige Bedarf beträgt in Deutschland etwa 450 Gigawatt. Die Fläche, die bei einer Leistungsausbeute von 6 Watt pro Quadratmeter (bzw.  $10 \frac{W}{m^2}$  als Wert für optimierte Standorte) benötigt wird, beträgt etwa  $7,54 \cdot 10^4 km^2$  (bzw.  $4,5 \cdot 10^4 km^2$ ), was etwa 21% (bzw. 13%) der Fläche Deutschlands entspricht.

An dieser einfachen Rechnung lässt sich gut veranschaulichen, dass bei massiver Nutzung der Solarenergie unweigerlich sehr große Areale benötigt werden. Bei lokaler Nutzung von freien Dachflächen, wie es bei der Solarenergie möglich ist, stellt dies kein großes Hindernis dar, werden jedoch Freiflächen genutzt, so kommt es zum Problem der Konkurrenz mit anderen zivilisatorischen Nutzungszwecken. Wird beispielsweise ein großes Gebiet mit Solarmodulen ausgestattet, steht diese Fläche nicht mehr für den Anbau von Nahrung, Naturbelassung oder die Errichtung von Wohnungen zur Verfügung.

### 5.2.2.2 Potenziale der Windenergie

Bei der Windkraft wird die kinetische Energie der Luftteilchen genutzt um den Rotor des Windrades anzutreiben, der diese Bewegung in elektrische Energie umwandelt. Strömt ein Luftpaket der Masse  $m$  mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$ , so kann die kinetische Energie mit folgender Formel bestimmt werden:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5.41)$$

Die in der strömenden Luft enthaltene Leistung ergibt sich aus der Ableitung der Energie nach der Zeit:

$$P = \frac{dE_{kin}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right) = \frac{1}{2} v^2 \cdot \frac{d}{dt} m(t) \quad (5.42)$$

Der Luftmassenstrom  $\frac{d}{dt} m(t)$  gibt an, welche Luftmasse in einer bestimmten Zeit durch ein bestimmtes Volumen strömt. Die Masse eines Körpers oder Mediums

lässt sich als Produkt der Dichte  $\rho$  und des Volumens  $V$  beschreiben. Dadurch kann der Luftmassenstrom durch die Dichte der von der Luft durchströmten Fläche  $A$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  bestimmt werden:

$$\frac{d}{dt}m(t) = \frac{d}{dt}(\rho_{Luft} \cdot V) = \frac{d}{dt}(\rho_{Luft} \cdot A \cdot x) = \rho_{Luft} \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho_{Luft} \cdot A \cdot v \quad (5.43)$$

Für Gleichung (5.42) erhält man somit (vgl. [Kal14], S. 456):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5.44)$$

Aus Gleichung (5.44) ist direkt ersichtlich, dass die im Wind enthaltene Leistung groß ist, wenn:

- die Rotorfläche eines Windrades möglichst groß ist,
- die Dichte der Luft hohe Werte annimmt,
- die Windgeschwindigkeit hoch ist.

Der Rotorfläche sind lediglich technische Grenzen gesetzt. Die zurzeit größten Windräder besitzen Durchmesser von bis zu 100 Meter. Um die Dichte der Luft und die Windgeschwindigkeit weiter zu bestimmen, muss man deren Abhängigkeit von anderen Faktoren bestimmen.

### **Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe**

Zunächst muss die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe betrachtet werden. Die Kräfte, welche für die Windentstehung verantwortlich sind (Temperaturunterschiede und daraus resultierende Druckdifferenzen sind letztendlich der Antrieb), wirken überall in der Atmosphäre. In geringer Höhe werden zunehmend Effekte der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) stärker. Hier sollen daher – für Windenergiegewinnung besonders interessant – nur bodennahe Luftströmungen betrachtet werden, auch antitriptische Winde genannt.

Betrachtet man das Strömungsprofil des Windes über dem Boden genauer, fällt auf, dass die Geschwindigkeit der Luft mit zunehmender Höhe zunimmt. Durch

Reibung an der „rauen“ Erdoberfläche kommt es zu diesem vertikalen Geschwindigkeitsverlauf. Verwirbelungen, hervorgerufen durch Unebenheiten am Boden stören das parallel zum Horizont verlaufende Strömungsmuster, so dass man erst bei einer gewissen Höhe von freier, unbeeinflusster Luftströmung sprechen kann. Am Boden ist die Strömungsgeschwindigkeit (idealerweise) Null, in größerer Höhe maximal und dazwischen existiert ein Übergangsbereich, in dem die Windgeschwindigkeit zunimmt. Je nachdem wie die Oberfläche bebaut oder bewachsen ist, nimmt die Windgeschwindigkeit jedoch mit der Höhe unterschiedlich stark zu.

Um den vertikalen Verlauf in der sogenannten Prandl-Schicht quantitativ zu beschreiben, kann folgende Potenzgleichung genutzt werden:

$$v_h = v_{Ref} \cdot \left( \frac{h}{h_{Ref}} \right)^\alpha, \quad (5.45)$$

mit Referenzgeschwindigkeit  $v_{Ref}$ , Referenzhöhe  $h_{Ref}$ , betrachteter Höhe  $h$ , gesuchter Geschwindigkeit  $v_h$  und dem Höhenwindexponenten  $\alpha$ . Diese sogenannte Hellman'sche Höhenformel ist eine relativ einfache Beschreibung des gesuchten Zusammenhangs und wird häufig aufgrund der Einfachheit für ingenieurtechnische Anwendungen genutzt (vgl. [Kal14], S. 81).

So erhält man beispielsweise bei Referenzwerten von  $h = 10m$  und einer in dieser Höhe gemessenen Geschwindigkeit von  $v_{Ref} = 3 \frac{m}{s}$  die Geschwindigkeit in einer Höhe von  $h_{Ref} = 50m$  zu  $v_h = 4,7 \frac{m}{s}$ . Hierbei wurde für  $\alpha$  ein Wert von 0,28 benutzt.

### Abhängigkeit des Luftdrucks von der Höhe

Zunächst soll die kontinuierliche Druckabnahme in der Erdatmosphäre in Abhängigkeit der Höhe  $h$  bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass die Erdbeschleunigung  $g$  und die Atmosphärentemperatur konstant seien und die Gleichung des idealen Gases gelte. Diese letzte Näherung ist leider nicht sehr genau, da die Luft mit Feuchtigkeit angereichert ist, die jederzeit kondensieren oder frieren kann, so dass Phasenübergänge hinzutreten. Für unsere Zwecke sind die nachfolgenden Betrachtungen aber ausreichend. Ausgehend von  $\rho \sim p$  kann man schreiben:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} \quad (5.46)$$

mit dem Atmosphärendruck  $\rho_0$  auf Meereshöhe  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$  und der Dichte der Luft bei  $0^\circ C$   $\rho_0 = 1,29 \frac{kg}{m^3}$ .

Die hydrostatische Gleichung, welche die unterschiedliche Änderung des Drucks in Abhängigkeit der Höhe angibt, und Gleichung (5.46) liefern (vgl. [GE10], S. 455f):

$$\frac{dp}{dh} = -\rho \cdot g = -p \cdot \frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \quad (5.47)$$

Damit gilt:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot dh \quad (5.48)$$

Anschließend werden beide Seiten von der Erdoberfläche, also  $z = 0$ , bei Druck  $p = p_0$  bis zur Höhe  $z$  bei Druck  $p$  integriert:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = \int_0^h -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot dh = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot \int_0^h dh \quad (5.49)$$

Mit  $\ln(p) - \ln(p_0) = \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$  ergibt sich:

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h \quad (5.50)$$

und daraus folgt die als barometrische Höhenformel bezeichnete Gleichung:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h} \quad (5.51)$$

Der Luftdruck in einer isothermen Modell-Atmosphäre fällt also nahezu exponentiell mit der Höhe ab. Nun ist über die Exponentialfunktion bekannt, dass sie wesentlich stärker wächst beziehungsweise fällt, je nachdem ob der Exponent positiv oder negativ ist, als jede Potenzfunktion. Im Falle von Gleichung (5.44) bedeutet dies, dass zuerst der kubische Term der Windgeschwindigkeit zum Tragen kommt, da die Dichte zunächst sehr langsam mit der Höhe abnimmt. Ab einer gewissen Höhe (s. Abb. 5.11) nimmt die Dichte jedoch sehr schnell ab, wodurch die im Wind enthaltene Leistung ebenfalls stark abnimmt. Dadurch werden Konzeptideen hinfällig, bei denen beispielsweise Energie aus höheren Luftströmungen genutzt werden soll.

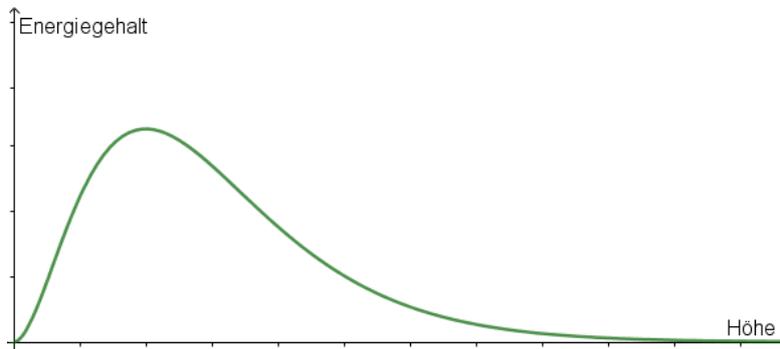


Abbildung 5.11: **Energiegehalt des Windes in Abhängigkeit von der Höhe.**

### Der Betz'sche Leistungsbeiwert

Bis hierhin wurde die im Wind enthaltene Energie betrachtet. Bei der Nutzung einer Windkraftanlage soll dem Wind Leistung entnommen werden. Dabei wird der Wind von einer Eingangsgeschwindigkeit  $v_1$  in technischen Anlagen auf eine Geschwindigkeit  $v_2$  abgebremst. Nur die dabei entstehende Differenz der kinetischen Energie des Windes (bzw. der Leistungsunterschied) kann genutzt werden, um elektrischen Strom zu erzeugen.

Damit die Eingangs- und Ausgangsströme konstant bleiben, muss vor der Turbine die gleiche Luftmenge eintreten, wie sie nach dem Rotorblatt wieder austritt. Der Massenstrom ist also vor und hinter der Windkraftanlage identisch (s. Abbildung 5.12 ). Bei konstanter Dichte gilt daher:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 = \text{const} \quad (5.52)$$

Die Leistung  $P_N$ , die dem Wind entnommen wird, berechnet sich aus den Leistungsdifferenzen vor und nach dem Rotor. Damit ergibt sich:

$$P_N = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (5.53)$$

Die Windgeschwindigkeit auf Höhe der Turbine kann mit dem arithmetischen Mittel der beiden Windgeschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  genähert werden. Setzt man dieses in Gleichung (5.52) ein, ergibt sich:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \quad (5.54)$$

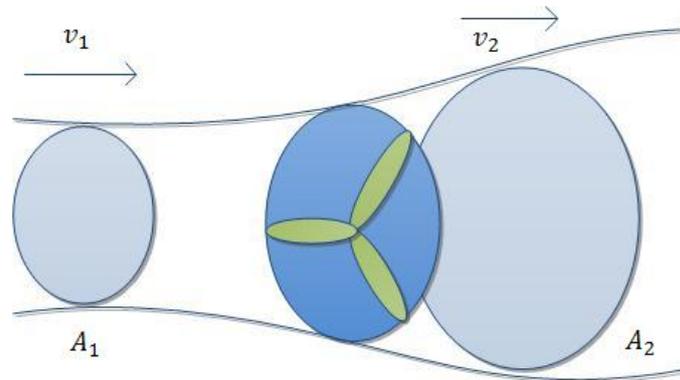


Abbildung 5.12: Strömungsverlauf in einer Windkraftanlage.

Somit ergibt sich die Leistung  $P_N$  zu

$$P_N = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (5.55)$$

Wird die Luft nicht durch einen Rotor beeinflusst, so beträgt die Windleistung durch die Fläche  $A$  (vgl. Glg. (5.44)):

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (5.56)$$

Betrachtet man nun das Verhältnis der entnommenen Leistung  $P_N$  zur der im Wind enthaltenen Leistung  $P_0$ , erhält man den sogenannten Leistungsbeiwert  $c_P$ <sup>4</sup>:

$$c_P = \frac{P_N}{P_0} = \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2 \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right) \quad (5.57)$$

Trägt man das Verhältnis der Leistungen  $\frac{P_N}{P_0}$  gegen den Quotienten der Geschwindigkeiten  $\frac{v_2}{v_1}$  in ein Koordinatensystem ein, so erkennt man, dass es einen maximalen Leistungsbeiwert gibt (s. Abb. 5.13). Dieser ideale Leistungsbeiwert wurde von Albert Betz (1885-1968) ermittelt und wird daher auch als Betz'scher Leistungsbeiwert  $c_{P,Betz}$  bezeichnet.

Dieses Maximum berechnet sich durch  $\left(x := \frac{v_2}{v_1}\right)$ :

$$\frac{dc_P}{dx} = \frac{d\left(\frac{1}{2} \cdot (1+x) \cdot (1-x)\right)}{dx} = -\frac{3}{2} \cdot x^2 - x + \frac{1}{2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.58)$$

<sup>4</sup>Nicht zu verwechseln mit der spezifischen Wärmekapazität (bei konstantem Druck) aus der Thermodynamik.

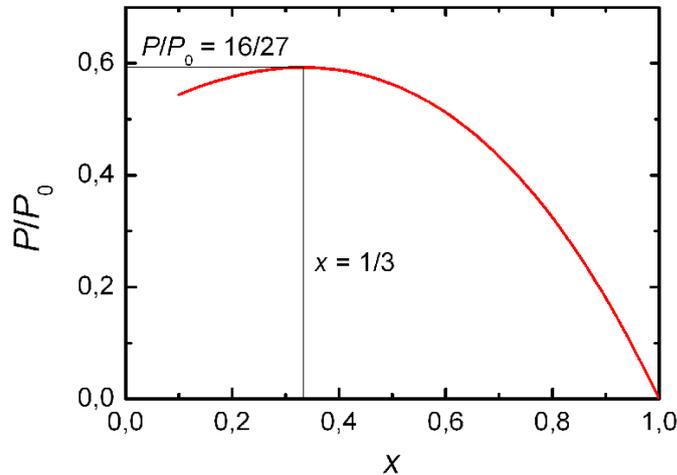


Abbildung 5.13: **Betz'sche Leistungskurve.**  $x$  gibt die relative Restgeschwindigkeit  $\frac{v_2}{v_1}$  an, auf der y-Achse ist das Verhältnis der im Wind enthaltenen Leistung  $P_0$  und der nutzbaren Leistung  $P$  aufgetragen (Quelle: [Kai]).

Daraus folgt für das „ideale“ Geschwindigkeitsverhältnis:

$$x_{ideal} = \frac{v_2}{v_1} = x := \frac{1}{3} \quad (5.59)$$

Durch Einsetzen von  $x_{ideal}$  in die Gleichung (5.57) ergibt sich somit der Betz'sche Leistungsbeiwert:

$$c_{P,Betz} = \frac{16}{27} \approx 0,593. \quad (5.60)$$

Wenn man also den Wind von  $v_1$  durch einen Rotor auf  $v_2 = \frac{1}{3} \cdot v_1$  abbremst, kann man theoretisch maximal ca. 60% von der im Wind enthaltenen Leistung entnehmen.

Den Wirkungsgrad  $\eta$  für die vom Wind entnommene Leistung kann man daher definieren als die vom Wind entnommene Leistung im Verhältnis zur maximal nutzbaren, idealen Leistung  $P_{ideal}$ :

$$\eta = \frac{P_N}{P_{ideal}} = \frac{P_N}{P_0 \cdot c_{P,Betz}} = \frac{c_P}{c_{P,Betz}} \quad (5.61)$$

(für eine detailliertere Herleitung s. [Qua13] oder [ZB10]).

Die oben genannte Herleitung ist unabhängig vom jeweiligen Windkonverter. In Wirklichkeit wird die Energie des Windes durch eine Umlenkung auf die Rotorblätter übertragen. Dadurch wird der Wind nicht nur abgebremst, sondern zusätzlich verwirbelt. Durch diese Verwirbelungen entstehen hinter dem Windrad Turbulenzen, was gleichbedeutend mit zusätzlichen Energieverlusten ist. Auch wenn bei modernen Windkraftanlagen diese beschriebenen Verluste gering gehalten werden können, wird im Allgemeinen die oben genannte maximale Leistung in der Realität nicht erreicht. Mechanische und elektrische Wirkungsgrade, die bei marktüblichen Anlagen bei etwa 10% liegen, verringern die nutzbare Windenergie abermals (vgl. [Kal14] S. 459 und S. 468).

### **Experimentelle Anordnung zur Untersuchung des Leistungsbeiwerts**

Neben der theoretischen Berechnung besteht eine Möglichkeit auch darin den maximalen Leistungsbeiwert durch einen Versuch plausibel zu machen. Dabei werden Windgeschwindigkeiten vor und nach einem Rotor gemessen, um damit mit Hilfe von Gleichung (5.57) das Verhältnis der entzogenen zur im Wind vorhandenen Leistung, sprich den Leistungsbeiwert zu bestimmen.

#### ***Material:***

- regelbare Windturbine
- Windgeschwindigkeitsmesser (hier Schalenkreuzanemometer)
- Rotor.

Der Aufbau folgt Abbildung (5.14).

#### ***Durchführung und Auswertung:***

Die verwendete Windturbine lässt sich über einen Schiebewiderstand regeln, dadurch erhält man verschiedene Windgeschwindigkeiten. Als Windmesser dient hier ein Schalenkreuzanemometer, als Rotor ein ausgebauter Lüfter aus einem Computer. Anstatt einer regelbaren Windturbine ist es möglich einen Föhn zu verwenden, allerdings hat ein solches Haushaltsgerät meist nur wenige Stärke-Stufen, wodurch nur wenige verschiedene Windgeschwindigkeiten untersuchbar sind.

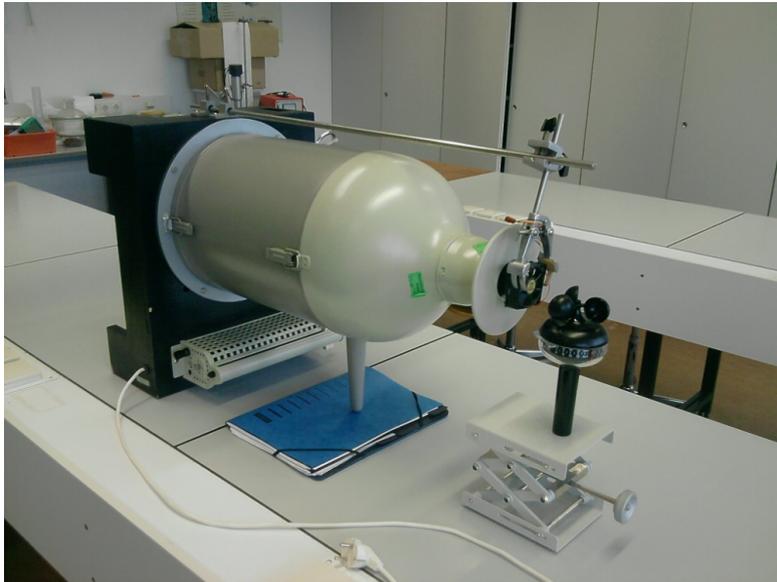


Abbildung 5.14: **Aufbau der Versuchsanordnung.**

Um einen Leistungsbeiwert zu erhalten, werden die Windgeschwindigkeiten  $v_1$  vor und  $v_2$  nach der Windturbine gemessen. Für erstere Messung wird der Lüfter aus dem Aufbau entfernt, um zu garantieren dass die Position des Anemometers in dem relativ kleinen Luftstrom gleichbleibend ist. Zu beachten ist, dass die Turbine nach Betätigung des Schiebewiderstandes eine Zeit lang benötigt, um die neue Windgeschwindigkeit relativ konstant zu halten.

Mit Hilfe der gemessenen Daten lassen sich die entnommene Leistung  $P_{nutz}$  und die im Wind enthaltene Leistung  $P_0$  und deren Verhältnis bestimmen:

$v_1$ in $\frac{km}{h}$	$v_2$ in $\frac{km}{h}$	$\frac{P_{nutz}}{P_0}$
27	14	0,556
30	15	0,563
39	18	0,575
41	19	0,574
52	22	0,584
56	21	0,591
59	24	0,587
65	28	0,583
69	31	0,578
74	33	0,579

Tabelle 5.4: Messwerte der Versuchsreihe.

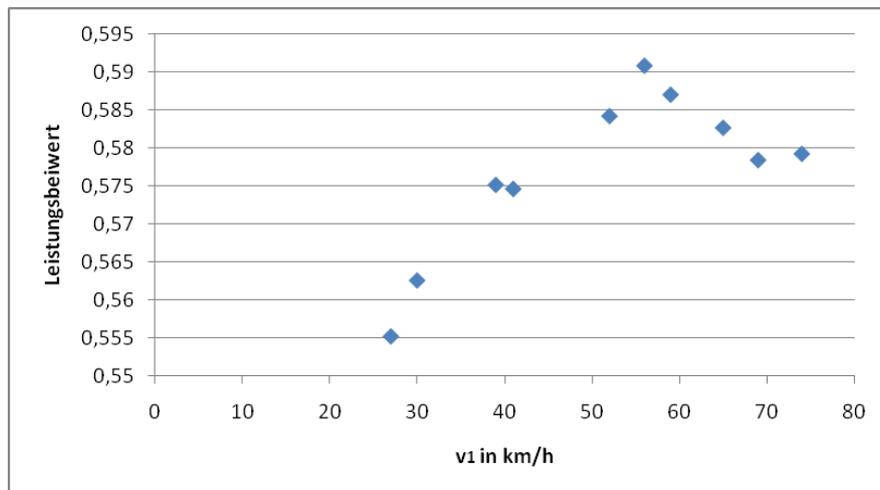


Abbildung 5.15: Graph mit den Messergebnissen der Versuchsreihe zur Untersuchung des Leistungsbeiwertes.

Es lässt sich erkennen, dass der Leistungsbeiwert trotz verschiedener Windgeschwindigkeiten nicht über den Betz'schen hinausgeht.

Prinzipiell lassen sich von diesem Versuch ausgehend weitere Experimente ableiten. Es ist beispielsweise möglich, die entnommene Leistung über den Rotor selbst

zu bestimmen. Der Lüfter fungiert dabei als Generator, der „Strom produziert“. Misst man Stromstärke und Spannung, so lässt sich über die Formel  $P = U \cdot I$  die entnommene Leistung herausfinden.

Eine zweite Variante besteht darin, die Windgeschwindigkeit der Turbine konstant zu lassen und den Rotor zu verändern. Hierzu wird statt des Lüfters ein Rotor genutzt, dessen Blätter drehbar bzw. verstellbar sind. Solche Rotoren lassen sich häufig in Experimentierkästen zum Thema Wind oder aber bei vielen Weihnachtspyramiden wiederfinden. Durch die verschiedenen Stellungen der Rotorblätter zum Wind, von senkrecht über verschiedene Auftreffwinkel bis hin zu parallel, ist es möglich, dem Wind unterschiedlich viel Energie zu entziehen. Man erhält Ergebnisse, die denen aus Abbildung (5.15) ähneln.

Diese Versuche sind jedoch nicht dazu bestimmt den Betz'schen Leistungsbeiwert experimentell zu bestimmen. Dies ist aufgrund der Ungenauigkeit beim Ablesen des Schalenanemometers kaum möglich. Vielmehr kann Schülern plausibel gemacht werden, dass dem Wind nicht beliebig viel Energie entzogen werden kann, unabhängig von der Windstärke oder der Geometrie des Windrades.

### Windgeschwindigkeitsverteilungen

Damit für die Planung von Windkraftanlagen die Nutzung der Windenergie für bestimmte Standorte bestimmt werden kann, werden häufig Windgeschwindigkeitsverteilungen verwendet. Diese entstehen entweder aus Messungen oder anhand von Tabellen bzw. Windkarten über statistische Parameter. Daten bzw. entsprechende Grafiken mit mittleren Windgeschwindigkeiten bestimmter Regionen ermöglichen eine grobe Kategorisierung, erlauben jedoch keine Aussagen, ob ein Standort geeignet ist, um dort eine Windkraftanlage aufzustellen (s. Abb. 5.16)

Eine solche Information über mittlere Windgeschwindigkeiten enthält keinerlei Angaben über die eigentliche Verteilung der Geschwindigkeiten; ob eine Region generell windstill ist und ab und zu starke Böen auftreten oder permanent ein mittelstarker Wind weht, kann so nicht ermittelt werden. Für die Planung einer Windkraftanlage spielen solche Informationen allerdings eine wichtige Rolle. Um nähere Informationen über die relative Häufigkeit der Windgeschwindigkeit zu erhalten, werden die gemessenen Winde in Geschwindigkeitsintervalle aufgeteilt und in einem Histogramm dargestellt. Die so entstandene Verteilung kann als Weibullverteilung angesehen werden (s. Abb. 5.17, vgl. [Kal14], S. 94):

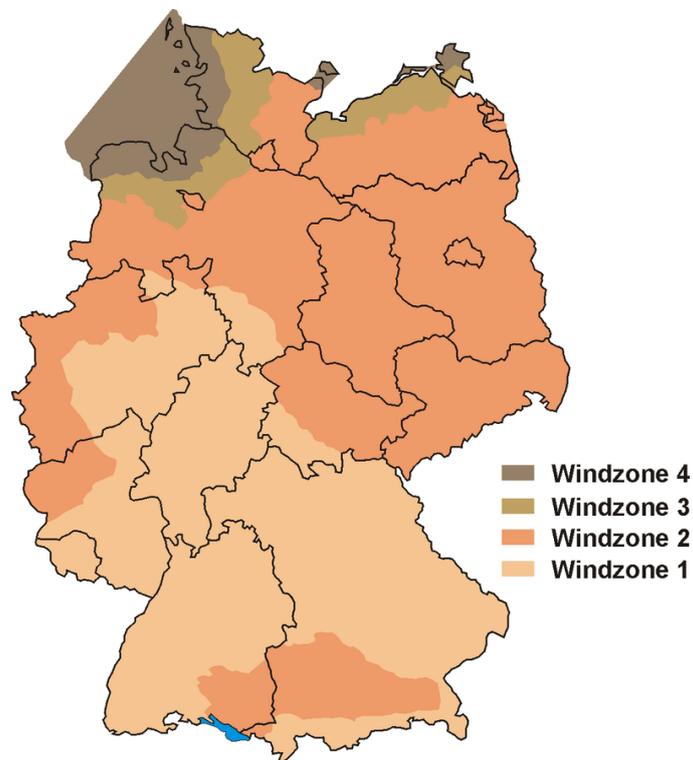


Abbildung 5.16: Unterteilung von Deutschland in verschiedene Windzonen (Quelle: [Stö]).

$$f_{Weibull} = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^k\right]. \quad (5.62)$$

$k$  gibt dabei den sogenannten Shape-Parameter an, der maßgeblich die Form der Verteilung bestimmt,  $v$  ist die Windgeschwindigkeit und  $a$  ist der Scale-Parameter, welcher für die aufweitende Verschiebung der Kurve bei wachsendem Parameter sorgt.

Aus der sogenannten Schiefe einer Weibullverteilung gegenüber einer Normalverteilung ergibt sich, dass Geschwindigkeiten die am häufigsten anzutreffen sind, kleiner sind als der Mittelwert und der Median der Verteilung. Es ist auch sofort aus dem Graphen ersichtlich, dass hohe Windgeschwindigkeiten, also Starkwindphasen, nur relativ selten vorkommen. In Abbildung (5.18) ist ein Windgeschwindigkeitshistogramm von Würzburg zu sehen, welches aus Daten vom European

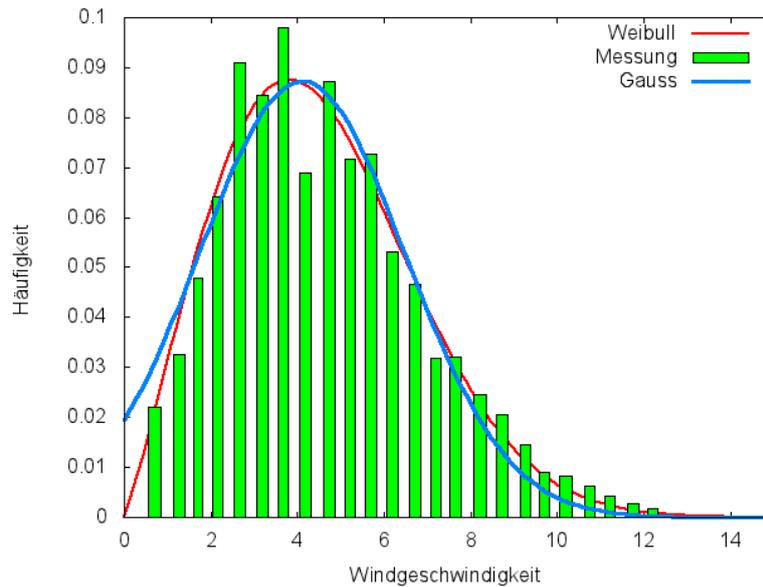


Abbildung 5.17: **Histogramme von Windgeschwindigkeitshäufigkeiten können durch eine Weibull-Verteilung genähert werden. Ein Gauß-Fit ist dafür nur ungenügend geeignet (Quelle: [Ver]).**

Climate Assessment & Dataset (s. [Eur]) stammen. Die Daten können von Schülern mit grundlegenden Kenntnissen im Bereich Excel entsprechend aufbereitet werden.

### Globale und lokale Leistungspotenziale

Die Nutzung der Windkraft beruht energetisch letztlich auf der eingestrahnten Sonnenenergie. Generell treibt die Sonnenstrahlung fast alle mechanischen Prozesse in den Geosystemen an (Ausnahmen: Gezeiten und Geothermie). Wie bereits beschrieben, entsteht Wind durch Druck- bzw. Temperaturunterschiede, beispielsweise durch unterschiedliche Erwärmung von Land- und Wassermassen (Land-See-Wind) oder Tag-Nacht-Wechsel. Da die „Windenergie“ also nichts anderes ist, als transformierte Sonnenstrahlungsenergie, rückt sofort die Frage in den Fokus, wie groß die Effektivität bei der Umwandlung der Sonnen- in die Windenergie ist und wie groß die zwangsläufig entstehenden Verluste der nutzbaren Energie eigentlich sind. Um diese Effizienz abzuschätzen, können die Gesetze der Thermodynamik genutzt werden.

Die Erdoberfläche erwärmt sich durch die Sonneneinstrahlung im Mittel auf etwa

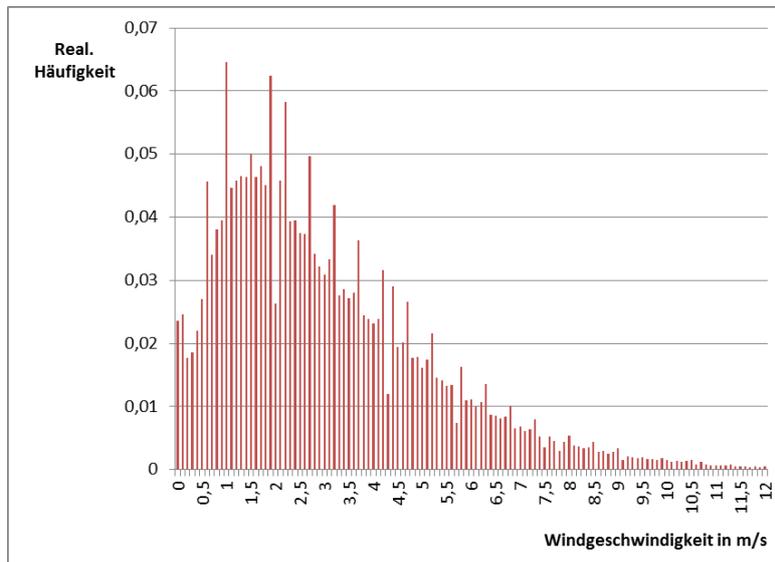


Abbildung 5.18: **Realdaten von Windgeschwindigkeiten ergeben eine Weibull-Verteilung.**

15°C. Bei der Windentstehung wird thermische Energie der Umgebung in mechanische Arbeit umgewandelt. Hierbei kommen als Antrieb nur geringe Temperaturunterschiede auf der Erdoberfläche in der Größenordnung von etwa 10°C bzw. 10 Kelvin in Frage. Da dieses System als Wärmekraftmaschine angesehen werden kann (s. Kap. 5.1.2), kann hier der sogenannte Carnotwirkungsgrad  $\eta$  genutzt werden, um den maximalen Wirkungsgrad abzuschätzen (vgl. [SD13]). Es gilt:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T} = \frac{10 \text{ K}}{288 \text{ K}} = 0,035. \quad (5.63)$$

Mit anderen Worten: Nur etwa drei bis vier Prozent der eingestrahnten Sonnenenergie können in mechanische Arbeit umgewandelt werden. Aus dem mittleren Strahlungseintrag von  $240 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  ergibt sich für die Windkraft rund  $8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Hochgerechnet auf die gesamte Erdoberfläche (inklusive der Weltmeere) ergibt dies eine maximal (physikalisch) nutzbare Leistung von  $4 \cdot 10^{15}$  Watt. An dieser Stelle sei nochmal der aktuelle Bedarf der Menschheit von ca.  $1,6 \cdot 10^{13}$  Watt erwähnt, welcher „nur“ zwei Größenordnungen darunter liegt. Hinzu kommen noch weitere, in diesem Kapitel bereits besprochene technische Wirkungsgrade, wodurch sich die tatsächlich nutzbare Leistung weiter verringert. Eine genauere Analyse zeigt, dass Werte im Bereich von maximal 1-2 Watt pro Quadratmeter im globalen Mittel realistisch sind (genauer s. [Kle12]). Ein Vergleich mit real existierenden Windparks

unterstützt die getätigten Abschätzungen:

Beispiel	Flächenbedarf	Gemittelte Leistung	Leistung pro Quadratmeter
Offshore-Park „alpha ventus (Nordsee)“	4 km <sup>2</sup>	267 GWh/a (bzw. 30,5 MW)	7,62 $\frac{W}{m^2}$
BARD Offshore	60,7 km <sup>2</sup>	400 MW	6,6 $\frac{W}{m^2}$
Baltic 1	7 km <sup>2</sup>	185 GWh/a bzw. 21,1 MW	3 $\frac{W}{m^2}$

Tabelle 5.5: **Auffistung der Flächenleistung einiger Windparks (Datenquellen: [Alp], [Eneb], [EnBa]).**

Es muss bei diesen Windparks allerdings bedacht werden, dass sie an optimalen Standorten errichtet werden, also dort, wo die natürliche Windenergie durch lokale Effekte in besonderer Weise vorverdichtet ist. Solche Standorte sind natürlich relativ selten. Im globalen Mittel muss die nutzbare Windenergie folglich kleiner sein.

Wie in den vorangegangenen Teilkapiteln soll auch bei der Windkraft für diese Aussage zur mittleren nutzbaren Leistung eine Betrachtung nicht nur aus globaler, sondern auch aus lokaler Sicht erfolgen:

Die Leistung eines Windrades mit der Rotorfläche  $A$  beträgt bei einer Windgeschwindigkeit  $v$  nach Gleichung (5.44):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5.64)$$

Experten raten, dass Windräder in einem Windpark, unter anderem zur Vermeidung von Windschatten, nicht näher als das zehnfache ihres Radius  $R$  stehen sollten. Nimmt man an, die Windräder seien gleichmäßig verteilt, so beträgt die Fläche pro Windrad  $(10R)^2$  (s. Abb. 5.19). Die Leistung pro Fläche erhält man somit durch (vgl. [Mac13], S. 287):

$$\frac{\text{Leistung pro Windrad}}{\text{Fläche pro Windrad}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}{(10R)^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi R^2 \cdot v^3}{(10R)^2} = \frac{\pi}{200} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (5.65)$$

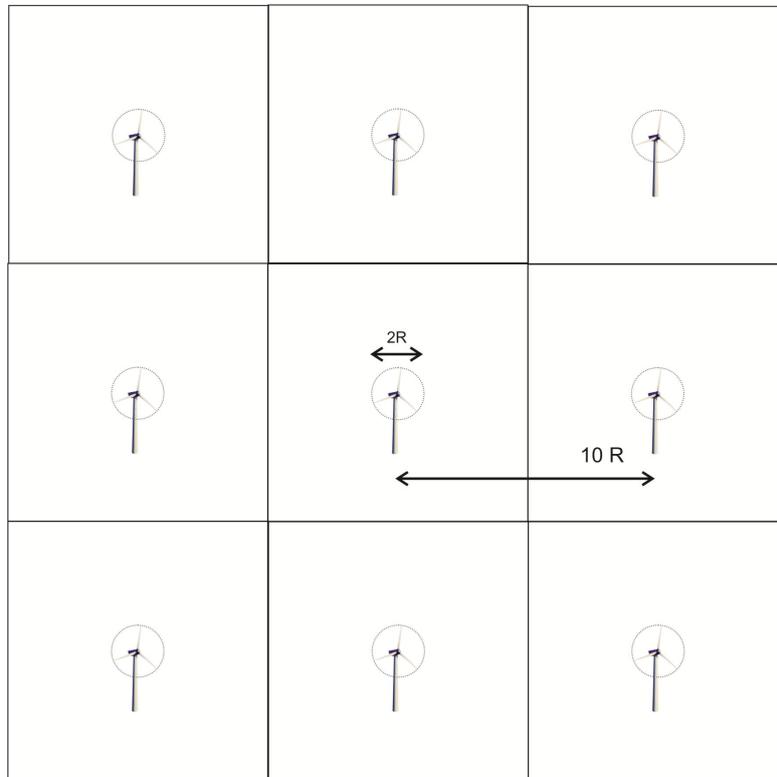


Abbildung 5.19: **Schematische Anordnung der Windräder in einem Windpark.**

Man erkennt, dass die Flächenleistung unabhängig vom Rotordurchmesser der Windräder ist. Größere Windkraftanlagen benötigen einen größeren Abstand, wodurch sich dies gegenseitig aufhebt. Jedoch sind sie meist höher, wodurch die Windgeschwindigkeit ebenfalls höher ist.

Setzt man nun in die obige Gleichung Werte für die Dichte ( $\rho = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) und eine typische Windgeschwindigkeit von  $6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ein, so erhält man eine Leistung von:

$$\frac{\pi}{200} \cdot 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \approx 2,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.66)$$

Auch dieser Wert deckt sich gut mit der getätigten globalen Abschätzung.



Abbildung 5.20: Ein Hubschrauber des Typs Aérospatiale AS 532 „Cougar“ (Quelle: [Bunb]).

### Beispiel des Flächenbedarfs anhand eines Zeitungsartikels

Man erkennt deutlich, dass die nutzbare Leistung pro Fläche im Vergleich zur Sonnenenergie relativ gering ist. Auch an ausgewählten, optimalen Standorten ist die benötigte Fläche sehr groß, um zivilisatorische Bedürfnisse zu versorgen. Deutlich gemacht werden soll dies auf der Basis eines Zeitungsartikels des Tagesspiegels von Mai 2011 (Quelle: [Myr11]). In diesem wurde beschrieben, wie der Offshore-Windpark „Baltic 1“ durch Bundeskanzlerin Angela Merkel eingeweiht wurde. Auf einem Foto war zu sehen, wie sie mit ihrem Hubschrauber über die Windanlagen flog. Auf der Basis dieses Artikels lassen sich leicht Recherchen anstellen:

1. Der Windpark erzeugt eine mittlere Leistung von 185 GWh pro Jahr. Dies entspricht  $21,1 \text{ MW} = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Watt}$  (s. Tabelle 5.5).
2. Bei dem Hubschrauber der Bundeskanzlerin handelt es sich um einen Aérospatiale AS 532 „Cougar“ mit zwei je 1236 kW dauerleistenden Makila-1A2-Turbinen (s. Abb. 5.20). Zusammen entspricht dies  $2,5 \text{ MW} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Watt}$ .

Vergleicht man diese beiden Werte, so fällt unmittelbar auf, dass die vom Hubschrauber benötigte Leistung mehr als ein Zehntel der vom Windpark ins Strom-

netz eingespeisten Leistung ist. Mit anderen Worten: 10% der Windräder, also zwei der 21 vorhandenen, laufen im übertragendem Sinne für die Versorgung eines einzelnen Hubschraubers.

### 5.2.2.3 Potenziale der Wasserkraft

Die Erde, die auch als der blaue Planet bezeichnet wird, besitzt eine Oberfläche, die zu etwa 71% mit Wasser bedeckt ist (s. [Qual3]). Das Wasser in den Geosystemen ist eine hochdynamische Substanz, denn aufgrund der Sonneneinstrahlung durchläuft es einen Kreislauf: Wasser verdunstet und wird durch globale und lokale Luftbewegungen in die Atmosphäre transportiert (s. Abb. 5.21). Anschließend wird das Wasser in Form von Regen, Schnee, Tau usw. wieder abgegeben, wobei auch die kontinentalen Flächen ständig mit Flüssigkeit durchsetzt werden. Das Resultat ist quasi ein Nettoimport von Wasser aus den Meeren auf die Kontinentalflächen.

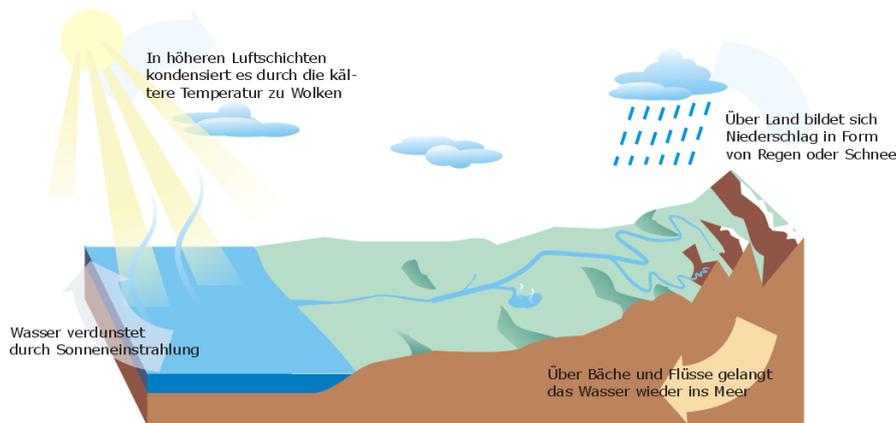


Abbildung 5.21: Schema des Wasserkreislaufs auf der Erde (Quelle: [Was]).

Das Wasser erhält beim Verdunsten potenzielle Energie. Diese ist jedoch nur in kleinen Teilen nutzbar. Der Anteil des Wassers, welcher über dem Meer abregnet, setzt seine Energie größtenteils in Form von Wärme um, jener, der über den Landflächen abregnet, versickert zu 64% im Boden (s. [Kal14], S. 81). Für die Nutzung stehen theoretisch nur 36% des auf den Landflächen niedergehenden Niederschlags zur Verfügung. Dabei ist neben der Niederschlagsmenge die Höhendifferenz zwischen dem Ort des Niederschlags und des Meeresspiegels ausschlaggebend.

Für die potenzielle Energie des Wasser mit der Masse  $m$  und der potenziellen Fallhöhe  $h$  gilt:

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (5.67)$$

Die Masse des Mediums, hier Wasser, lässt sich als Produkt aus Dichte  $\rho$  und Volumen  $V$  ausdrücken:

$$E = \rho \cdot V \cdot g \cdot h \quad (5.68)$$

Die Leistung des Wassers ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der Energie. Da sowohl die Dichte des Wassers, die Höhendifferenz als auch die Erdbeschleunigung zeitlich konstant sind und sich nur das Volumen pro Zeit ändert, ergibt sich (vgl. [Kal14], S.84):

$$P = \dot{E} = \rho \cdot h \cdot g \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = \rho \cdot h \cdot g \cdot Q_{Abfluss} \quad (5.69)$$

$Q_{Abfluss}$  ist dabei der Wasserdurchfluss. Ist dieser gering, könnte dies durch eine größere Fallhöhe kompensiert werden und umgekehrt.

Bei der Wasserkraft wird die Lage- und Bewegungsenergie des Wassers in mechanische Arbeit umgesetzt. Heutzutage ist die mechanische Arbeit (z.B. durch Mühlsteine) allerdings nur noch in seltenen Fällen die erwünschte Energieform. Durch Generatoren, welche die im Wasser enthaltene Bewegungsenergie in elektrische Energie umwandeln, wird diese für zivilisatorische Produktionsprozesse erforderliche Energieform bereitgestellt (vgl. [Leu93]).

### Theoretisches Potenzial der Wasserkraft in Deutschland

Eine sehr grobe Abschätzung, wenn es darum geht das theoretisch nutzbare Potenzial der Wasserkraft in Deutschland zu berechnen, ergibt sich, wenn man den durchschnittlichen Niederschlag, die mittlere Höhe und die Fläche Deutschlands miteinander verknüpft.

Aus Gleichung (5.68) ist bereits die potenzielle Energie des Wassers bekannt:

$$E_{pot} = \rho \cdot V \cdot g \cdot h \quad (5.70)$$

Die Dichte des Wassers beträgt etwa  $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Das Volumen des über Deutschland abgeregneten Wassers berechnet sich dabei aus dem Produkt des jährlichen Niederschlags pro Quadratmeter und der Fläche von Deutschland:

$$V = 790 \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \cdot 3,56 \cdot 10^{11} \text{m}^2 = 2,82 \cdot 10^{11} \text{m}^3 \quad (5.71)$$

Für die mittlere Höhe in Deutschland lassen sich kaum Werte finden, da diese in der Geographie eher uninteressant sind. Daher muss diese selbst abgeschätzt werden. Hierzu legt man über eine topographische Karte von Deutschland ein Raster (s. Abb. 5.22). Solche Karten lassen sich leicht im Internet finden, ein Raster kann mit Hilfe eines Zeichenprogramms erstellt werden.

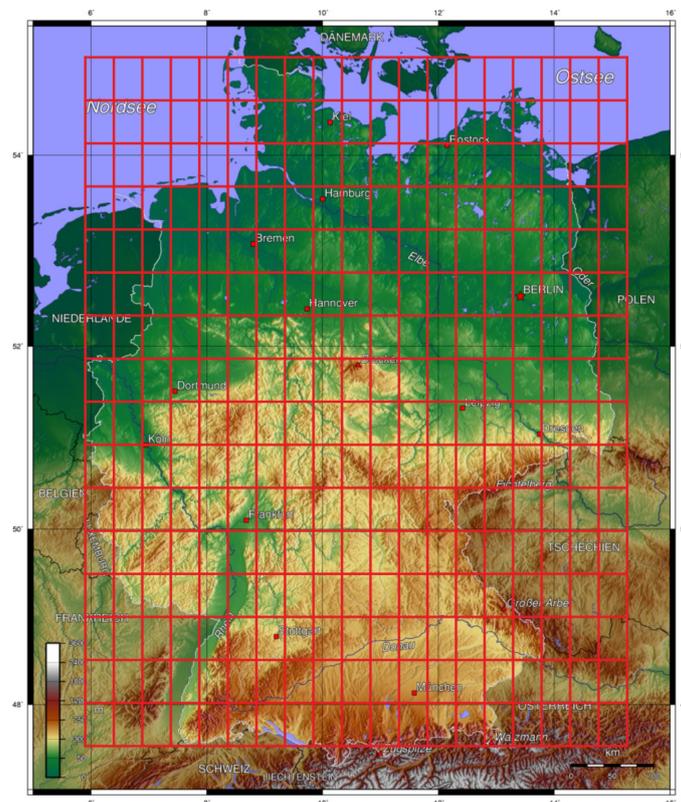


Abbildung 5.22: Raster über einer topographischen Karte von Deutschland (Quelle Hintergrundbild: [MyG]).

Mit Hilfe der Legende muss man jedem Kästchen eine Höhe zuordnen und diese anschließend zusammenzählen:

Höhe in m	Anzahl Kästchen
0	23
50	77
300	65
750	41
1200	6

Tabelle 5.6: **Auszählung der Kästchen.**

Zu beachten ist hierbei, dass einige Kästchen des Rasters außerhalb von Deutschland liegen und daher ignoriert werden müssen.

Mit Hilfe der Auszählung kann nun die mittlere Höhe Deutschlands abgeschätzt werden. Wie man anhand der nachfolgenden Gleichung leicht erkennt, orientieren wir uns dabei am gewichteten Mittel:

$$\bar{h} = \frac{23 \cdot 0m + 77 \cdot 50m + 65 \cdot 300m + 41 \cdot 750m + 6 \cdot 1200m}{(23 + 77 + 65 + 41 + 6)} \approx 289m \quad (5.72)$$

Diese Schätzung ist allerdings nicht sehr genau, da man bei der Höhenzuordnung des Öfteren zwischen zwei Werten wählen muss. Die durchschnittliche Höhe kann also näherungsweise mit etwa 300 m angenommen werden.

Daraus ergibt sich die potenzielle Energie der gesamten jährlichen Regenmenge in Deutschland zu:

$$E_{pot} = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 2,82 \cdot 10^{11} m^3 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 300m = 8,3 \cdot 10^{17} J \quad (5.73)$$

Dies entspricht einer Leistung von:

$$P = 8,3 \cdot 10^{17} \frac{J}{a} = 2,63 \cdot 10^{10} \frac{J}{s} = 26,3 GW \quad (5.74)$$

Diese Abschätzung ist jedoch – wie natürlich jede Abschätzung - fehlerbehaftet. So wird Verdunstung oder Versickerung von Wasser nicht berücksichtigt oder dass

nur solches genutzt werden kann, welches sich in Flüssen, Bächen oder Seen konzentriert. Ebenso wurde hier nicht beachtet, wie die Niederschlagsverteilung aussieht, also wie viel des Niederschlags tatsächlich im Gebirge abregnet und wie viel im Flachland und somit nicht bzw. kaum nutzbar ist. Für eine genauere Betrachtung muss das sogenannte Linienpotenzial genutzt werden. Dort sind die Abflüsse der erfassten Gewässer und deren Höhenunterschiede inbegriffen (vgl. [And10]). So kommt man bei einer solchen Abschätzung auf eine Leistung von 380 Petajoule pro Jahr, dies entspricht einer Leistung von 12 GW (vgl. [Kal14], S. 388). In jedem Fall ist unsere Abschätzung die absolut obere Grenze der nutzbaren Leistung.

Ein Modell zur genaueren Berechnung der theoretischen Potenziale, ursprünglich für das Flusssystem in Vietnam konzipiert, soll im Folgend für Deutschland übernommen und ausgeweitet werden (s. [Tra13]).

Analog zu Gleichung (5.68) folgt für die potenzielle Energie eines Flussabschnitts mit der Höhendifferenz  $\Delta h$ :

$$\Delta E = m \cdot g \cdot \Delta h, \quad (5.75)$$

wobei  $m$  die Masse des durchfließenden Wassers angibt. Da im Folgenden die Masse pro Zeit  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$  bzw. der Wasserdurchfluss  $\dot{m}$  betrachtet wird, lässt sich so direkt die Leistung  $P = \dot{E} = \dot{m} \cdot g \cdot \Delta h$  bestimmen.

Der Wasserdurchfluss bleibt entlang eines Flusses dann nicht konstant, wenn es Zu- oder Abflüsse gibt, in den weitaus meisten Fällen gibt es natürlich einen Zufluss durch andere einmündende Flüsse oder Bäche. In jeden Teil des Flusses  $\Delta l$  wird von Nebenflüssen die Wassermenge  $\Delta \dot{m}$  eingespeist. Um das Modell an dieser Stelle einfacher zu halten, wird angenommen, dass die fließende Wassermenge  $\Delta \dot{m}$  direkt proportional zur Flusslänge  $\Delta l$  sei. Damit gilt:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\Delta l} = \text{const} = c \quad (5.76)$$

Dadurch kann der Wasserdurchfluss  $\dot{m}$  ab einer beliebigen Stelle  $l$  mit folgender Gleichung genähert werden:

$$\dot{m}(l) = c \cdot l + \dot{M}_Q. \quad (5.77)$$

$\dot{M}_Q$  ist dabei der Wasserdurchfluss an der Quelle bzw. an der Staatsgrenze, je nachdem worauf man den Durchfluss beziehen möchte. Wir wählen als Beispiel die Elbe (s. Abb. 5.23). Hier gilt:

$$\dot{M}_Q = 3,08 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (l_1 = 0; \dot{m}_{l_1} = \dot{M}_Q)$$

An der Mündung beträgt der Wasserdurchfluss  $\dot{M} = \dot{m}_{l_2} = 8,7 \cdot 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ , die Länge des Flusses beträgt  $L = l_2 = 727 \text{ km}$  (s. Abb.5.23).

Damit ergibt sich für die oben verwendete Konstante  $c$ :

$$c = \frac{\dot{m}_{l_2} - \dot{m}_{l_1}}{l_2 - l_1} \approx 773 \frac{\text{kg}}{\text{km} \cdot \text{s}}. \quad (5.78)$$

Pro Kilometer Flusslänge nimmt der Wasserdurchfluss also um etwa 0,8 Kubikmeter pro Sekunde zu.

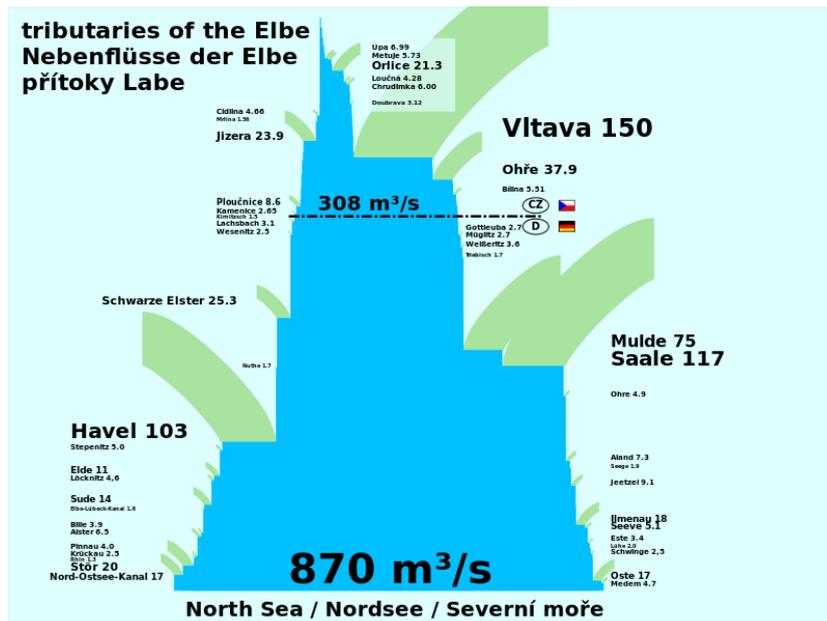


Abbildung 5.23: Eckdaten des Elbflusses (Quelle: [Use]).

Betrachten wir nun einen kurzen Abschnitt  $AB$  des Flusses. Dabei soll der Abstand so gewählt werden, dass die Höhe  $h$  linear zu der Länge  $l$  ist. Der Wasserdurchfluss kann so durch den Mittelwert des Durchflusses ersetzt werden. Damit erhält man:

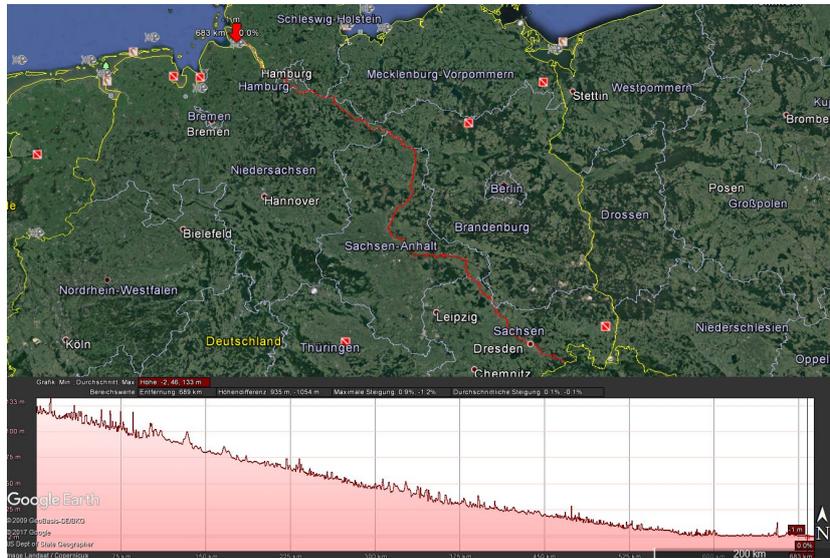


Abbildung 5.24: Die geographischen Daten der Länge und Höhe des Flusses können mit Hilfe von Google Earth ermittelt werden (Quelle: Google Earth).

$$P_{AB} = \frac{\dot{m}_A + \dot{m}_B}{2} \cdot g \cdot \Delta h_{AB} \quad \text{bzw.} \quad (5.79)$$

$$P_{AB} = \left( c \cdot \frac{l_A + l_B}{2} + \dot{M}_Q \right) \cdot g \cdot \Delta h_{AB}. \quad (5.80)$$

Nun teilt man den betrachteten Fluss so auf, dass in jedem Abschnitt der Höhenunterschied  $h$  linear von der Länge  $l$  abhängt. Die Gesamtleistung ergibt sich dann aus der Summe der Leistungen der Teilabschnitte:

$$P_{\text{Gesamt}} = \left( c \cdot \frac{l_0 + l_1}{2} + \dot{M}_Q \right) \cdot g \cdot \Delta h_1 + \dots + \left( c \cdot \frac{l_{n-1} + l_n}{2} + \dot{M}_Q \right) \cdot g \cdot \Delta h_n \quad (5.81)$$

Sind jeweils die Längen und Höhen bekannt, können die Teilleistungen und damit die Gesamtleistung des Flusses berechnet werden. Diese geographischen Daten können beispielsweise aus Google Earth gewonnen werden (s. Abb. 5.24).

Da die Flusshöhe in Fließrichtung abnimmt, wird eine Näherungskurve eingezeichnet. Man erkennt, dass die Elbe größtenteils gleichmäßig an Höhe abnimmt. Die

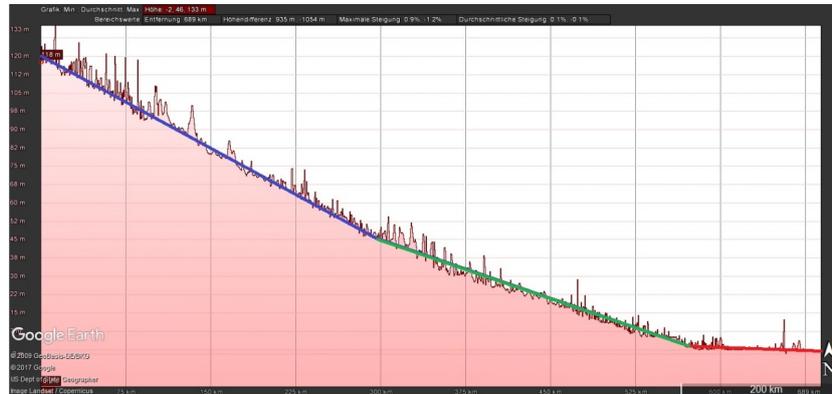


Abbildung 5.25: Das Höhenprofil der Elbe wird durch Geradenausschnitte genähert und in drei Abschnitte eingeteilt (Quelle: Google Earth).

Kurve wird dabei in drei Abschnitte eingeteilt, mit deren Hilfe wir die Gesamtleistung der Elbe berechnen können. Die Werte der Längen und Höhen sind in Tabelle (5.7) wiederzufinden.

Länge in km	Höhe in m
0	118
294	48
570	65
690	1
1200	0

Tabelle 5.7: Ermittelte lineare Abschnitte der Elbe.

Mit Hilfe von Gleichung (5.81) erhält man nun die Gesamtleistung:

$$P_{\text{Gesamt}} = P_1 + P_2 + P_3 = (2,9 + 1,9 + 0,08) \cdot 10^8 W. \quad (5.82)$$

Es fällt auf, dass speziell der letzte Abschnitt kaum bzw. gar nicht nutzbar ist, um Wasserkraft zu betreiben. Das ist auch in Form unserer einfachen Abschätzung ein deutlicher Hinweis auf die Tatsache, dass die Nutzung der Wasserenergie an hervorragende Standorte gebunden ist.

### Globale Leistungspotenziale

Ähnlich wie bei der Windenergie beruht die Wasserkraft energetisch auf der einstrahlten Sonnenenergie. Die Windenergie entsteht, wie bereits beschrieben, durch Druck- bzw. Temperaturunterschiede. Da Wasser letztendlich durch den Wind transportiert wird – man denke an Wolken, die Wasser aus Meeren aufnehmen und über Landflächen wieder abregnen – können ebenso die gleichen Abschätzungen vollzogen werden (s. Kapitel 5.2.2.2). So kann auch hier die Carnot-Effizienz zur Hilfe genommen werden, um den maximalen Wirkungsgrad abzuschätzen (vgl. Gleichung 5.63):

$$\eta = \frac{\Delta T}{T} = \frac{10\text{K}}{288\text{K}} = 0,035. \quad (5.83)$$

Dies ergibt zusammen mit dem mittleren Strahlungseintrag der Sonne etwa  $8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  bzw. eine physikalisch maximal nutzbare Leistung von  $4 \cdot 10^{15}$  Watt für die gesamte Erdoberfläche. Diese Werte müssen, wie bei der Windkraft, jedoch noch nach unten korrigiert werden, realistischer ist vielmehr ein Potenzial von  $13\text{TW} = 1,3 \cdot 10^{13}$  für die Wasserkraft (exklusive Wellen- und Gezeitenkraftwerke) (s. [Kle12]). Auch bei der Wasserkraft lohnt sich ein Blick auf tatsächlich existierende Wasserkraftwerke, um die Abschätzungen zu vergleichen:

Beispiel	Flächenbedarf	Gemittelte Leistung	Leistung pro Quadratmeter
Itaipu-Staudamm	1350 km <sup>2</sup>	95 TWh/a ( bzw. 10,8 GW)	8,0 $\frac{W}{m^2}$
Bleilochtalsperre	9,2 km <sup>2</sup>	80 MW	8,7 $\frac{W}{m^2}$
Hohenwartetalsperre	7,3 km <sup>2</sup>	63 MW	8,6 $\frac{W}{m^2}$
Goldisthal (Pumpspeicher-kraftwerk)	550 000 m <sup>2</sup>	1060 MW (Spitzenlast)	1927 $\frac{W}{m^2}$
Bachtuari-Talsperre	58,7 km <sup>2</sup>	3000 GWh/a (342 MW)	5,8 $\frac{W}{m^2}$
Deriner-Talsperre	26,4 km <sup>2</sup>	2100 GWh/a (239.4 MW)	9,1 $\frac{W}{m^2}$
Hoover-Talsperre	639 km <sup>2</sup>	4,8 TWh/a (547MW)	0,86 $\frac{W}{m^2}$
Neckar (Laufwas-ser)	38 km <sup>2</sup>	530 GWh/a (60,4 MW)	1,6 $\frac{W}{m^2}$

Tabelle 5.8: Auflistung der Flächenleistung einiger Wasserkraftwerke (Datenquellen: [Ita], [Seea], [tal], [Seeb], [Gem], [Bac], [Der], [Hoo], [EnBb], [Nec]).

Auch hier muss beachtet werden, dass die Talsperren an meist optimalen Standorten gebaut werden. Natürliche Akkumulations- und Verdichtungseffekte sind hier besonders wirksam und daher nur in geringer Anzahl auf der Erde vorhanden. Diese Werte dürfen daher nicht für ein durchschnittliches Potenzial für die gesamte Erdoberfläche angesehen werden (vgl. [SD13]).

Das in der Tabelle aufgelistete Goldisthal-Wasserkraftwerk mutet zunächst an, oberhalb der berechneten Potenziale arbeiten zu können. Allerdings ist dieses ein Pumpspeicherkraftwerk, gebaut, um durch Hinaufpumpen von Wasser Energie zu speichern. Bei Bedarf wird das Wasser wieder bergab gelassen, wodurch die potenzielle Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt wird. Der aufgelistete Leistungswert gibt daher keine mittlere Leistung an, sondern eine Spitzenlast, welche nur relativ kurz aufrechterhalten werden kann. Für globale Betrachtungen spielen solche Kraftwerke daher keine Rolle.

Bei dem Beispiel „Neckar“ wurde nicht das in diesem Kapitel gezeigte Verfah-

ren genutzt. Hier wurden die Leistungen aller Laufwasserkraftwerke entlang des Neckars zusammen gerechnet. Um die Fläche zu erhalten, wurde die Flusslänge mit einer geschätzten mittleren Flussbreite multipliziert. Die so resultierende Flächenleistung von 1,6 Watt pro Quadratmeter ist daher nur ein genäherter Wert, der reale Wert wird ggf. um den Faktor zwei bis drei um diesen herum liegen.

#### 5.2.2.4 Biomasse und Bioenergie

Ein weiterer regenerativer Energieträger, welcher häufig als „saubere“ Alternative für die Fossilen genannt wird, ist die Bioenergie. Diese Energie wird aus Biomasse gewonnen, also aus organischen Stoffen pflanzlichen oder tierischen Ursprungs, häufig aus sogenannten „Energiepflanzen“ (wie Raps und Mais), Holz oder Nebenprodukten aus der Land- und Forstwirtschaft. Nutzbar gemacht werden diese durch verschiedene Anlagen, wie z.B. Biogasanlagen oder Heizkraftwerke. Diese Nutzung erscheint zunächst sinnvoll, schließlich kann beispielsweise die Verbrennung von Biotreibstoffen als klimaneutral bzw.  $CO_2$ -neutral bezeichnet werden, da kein zusätzliches Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre gelangt, was durch natürliche Prozesse nicht ohnehin dorthin gelangen würde.

Um einen genaueren Blick auf die Sinnhaftigkeit der Nutzung zu werfen, soll auch bei diesem Energieträger die nutzbare Leistung betrachtet werden. Wie bereits in Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde, kann man dies auf zweierlei Arten untersuchen. Der Nährwert der Pflanzen und ihr jährlicher Ertrag bei Ernten liefern je nach Pflanzenart Werte zwischen 0,1 und 1 Watt pro Quadratmeter. Die zweite Variante bedient sich der Betrachtung der Wirkungsgrade bei der Photosynthese. Dieser beträgt je nach Pflanze um 0,5%, Energiepflanzen wie der *Miscanthus* besitzen mit ca. 1,2% einen etwas höheren Wirkungsgrad (vgl. [Rot99] und [Hei97]). Bezieht man dies auf die mittlere Sonneneinstrahlung von 240 Watt pro Quadratmeter erhält man die sogenannte Biomassenkonstante von etwa  $1 \frac{W}{m^2}$ . Natürlich ist dieser Wert nur ein grober Richtwert, je nach Breitengrad ist die Sonneneinstrahlung eine andere, je nach Pflanze ist auch die Umsetzung in Biomasse unterschiedlich. Die Biomassenkonstante soll aber vereinfachte, globale Betrachtungen und Abschätzungen ermöglichen, welche in der richtigen Größenordnung liegen. Rechnet man die eingestrahelte Sonnenleistung auf die Landflächen der Erde hoch, erhält man eine Leistung von  $1,5 \cdot 10^{14} W$ . Dieser Wert liegt nur eine Größenordnung oberhalb des Energiebedarfs der Menschheit. Andersherum gesagt: Ein Zehntel der Landflächen müsste zur Bioenergiegewinnung genutzt werden und stünde für andere Zwecke nicht mehr zur Verfügung.

Jedoch ist eine Flächenleistung von  $1 \frac{W}{m^2}$  noch zu viel. Dieser Wert würde bedeuten, dass man die gesamte in der Pflanze samt Wurzel gespeicherte Energie nutzbar machen könnte – also mit dem Wirkungsgrad 1 in Strom und Wärme umwandeln könnte. Hinzu kommt der durch die Bewirtschaftung der Pflanzenareale bzw. –plantagen nötige Energieaufwand. Realistischere Werte sind als Nettogewinn eher  $0,01-0,1 \frac{W}{m^2}$  für die Bioenergie.

### Überprüfung der Abschätzung anhand realer Daten

Bleibt zu überprüfen, ob die groben Abschätzungen Sinn ergeben bzw. diese mit realen Daten der Umsetzung in Biomasse übereinstimmen. Eine bereits getätigte Rechnung mit dem Winterweizen bzw. Getreide in Kapitel 3 lag in derselben Größenordnung. Nun soll eine ähnliche Rechnung anhand des Wachstums von verschiedenen Baumarten erfolgen. Als ausführliches Beispiel soll zunächst die Buche dienen:

Diese wächst im Durchschnitt um ca.  $7 m^3$  pro Hektar und Jahr. Also beträgt die Zunahme an Biomasse  $7 \cdot 10^{-4} m^3$  pro Kubikmeter und Jahr (s. [Kal16]).

Der Brennwert der Buche liegt bei rund 2100 kWh pro Raummeter, Schwankungen des Brennwertes aufgrund von unterschiedlicher Restfeuchte des Holzes sollen vernachlässigt werden. Die Größe „Raummeter“ ist abhängig von der Stückelung des Holzes (ganze Holzstücke, gespaltenes Holz usw.), kann aber für unsere Zwecke mit etwa  $0,7 m^3$  angenommen werden. Der Brennwert entspricht also somit pro Kubikmeter 3000 kWh.

Will man nun berechnen, welche Leistung pro Quadratmeter umgesetzt wird, ergibt sich folgende Rechnung:

$$7 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{m^2 \cdot a} \cdot 3000 \frac{kWh}{m^3} = 2,1 \frac{kWh}{a} \cdot \frac{1}{m^2} \quad (5.84)$$

Der Umrechnungsfaktor einer Leistungsangabe von Kilowattstunden pro Jahr in Watt wurde bereits in Kapitel 3.1 berechnet:

$$1 \frac{kWh}{a} = 0,114W$$

Somit ergibt sich für die Flächenleistung:

$$2,1 \frac{kWh}{a} \cdot \frac{1}{m^2} \approx 0,2 \frac{W}{m^2} \quad (5.85)$$

Auch dieser Wert liegt genau in dem Bereich der getätigten Abschätzungen. Diese Rechnung lässt sich auch für weitere Baumarten durchführen:

Art	Holzwachstum [ $m^3/(ha \cdot a)$ ]	Holzwachstum [ $m^3/(m^2 \cdot a)$ ]	Brennwert [ $kWh/rm$ ]	Brennwert [ $kWh/m^3$ ]	Umsatz [ $W/m^2$ ]
Buche	7	0,0007	2100	3000	0,24
Tanne	11	0,0011	1400	2000	0,25
Fichte	10	0,001	1500	2143	0,24
Eiche	5	0,0005	2100	3000	0,17
Kiefer	6	0,0006	1700	2429	0,17
Erle	6	0,0006	1500	2143	0,15
Lärche	7	0,0007	1700	2429	0,19

Tabelle 5.9: Berechnung der umgesetzten Leistung pro Quadratmeter bei verschiedenen Baumarten (Daten aus [Kal16] und [wis]).

Um sich diese zusätzliche Reduzierung der nutzbaren Leistung und die dadurch enormen benötigten Flächen zu verdeutlichen, soll folgendes Beispiel dienen:

- Wir betrachten ein Auto, welches mit Biotreibstoff betrieben wird. Eine maximale Leistung von beispielsweise 150 PS entsprechen etwa 110 kW. Berechnet man mit Hilfe der Biomassenkonstante die minimale Anbaufläche (weil wir auch hier Folgewirkungsgrade vernachlässigen), die dieser Leistungszahl zuzuordnen wäre, so ergibt dies  $110\,000\,m^2$ . Dies entspricht einem Quadrat mit einer Kantenlänge von 332 Metern oder einer Fläche von 15 Fußballfeldern.
- Stellt man dieselbe Berechnung mit einem Nettogewinn von  $0,1\frac{W}{m^2}$  aus den Pflanzen an und berücksichtigt zusätzlich noch den Wirkungsgrad des Automotors von etwa 40%, so erhält man:

$$\eta_{Motor} \cdot 0,1\frac{W}{m^2} \approx 0,04\frac{W}{m^2} \quad (5.86)$$

$$\Rightarrow A = \frac{110kW}{0,04\frac{W}{m^2}} = 2750\,000\,m^2 \quad (5.87)$$

Dies entspricht 375 Fußballfeldern bzw. einem Quadrat mit einer Kantenlänge von ca. 1,6 Kilometern (s. Abb. 5.26). An dieser Stelle sei erwähnt, dass jeder Deutsche im statistischen, rechnerischen Mittel etwa  $4000\text{ m}^2$  Bodenfläche zur Verfügung hat. Diese würde also nicht einmal ansatzweise reichen, um dieses Auto zu versorgen, geschweige denn anderen Belangen gerecht zu werden.

3. Wir lassen dieses Auto zur besseren Veranschaulichung nun 1000 Stunden pro Jahr laufen. Dies entspricht einem Gesamtenergiebedarf von:

$$E = P \cdot t = 110\text{kW} \cdot 1000\text{h} = 3,96 \cdot 10^{11}\text{Ws}. \quad (5.88)$$

Mit der angenommenen Biomassenkonstante von  $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  müsste man rechnerisch auf rund  $4 \cdot 10^{11}\text{m}^2$  eine Sekunde lang die Energie abgreifen, auf rund  $1,1 \cdot 10^8\text{m}^2$  eine Stunde lang, auf  $4,6 \cdot 10^6\text{m}^2$  einen Tag lang, auf  $650000\text{m}^2$  eine Woche lang, auf etwa  $16000\text{m}^2$  einen Monat lang oder auf  $13640\text{m}^2$  ein Jahr lang (116m im Quadrat s. Abb. 5.26).

Deutet man die bisherigen Ergebnisse der Betrachtung Bioenergie, so erkennt man zunächst, dass die Potenziale deutlich unterhalb der Solarenergienutzung liegen. Dies ist nicht verwunderlich, da die Biomasse ein Produkt der Sonnenenergie ist und die Pflanze dazwischen geschaltet ist, um diese Energie umzuwandeln. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber, dass im Vergleich enorm große Flächen benötigt werden, um Bedürfnisse jeglicher Art über Biomassenenergie zu stillen. Eben jene Areale sind im Allgemeinen allerdings genau solche, die geeignet sind um Nahrungspflanzen für Mensch und Tier anzubauen. Werden diese Felder genutzt, um Energiepflanzen zu erhalten, so stehen diese logischerweise nicht mehr für die Nahrungsproduktion zur Verfügung – höchstens über sogenannte Resteverwertung.

Im Vergleich zu eben genannten, schnell wachsenden Energiepflanzen, zu denen beispielsweise Mais und Raps gehören, wäre eine andere Möglichkeit Holz zu verbrennen. Jedoch gilt auch hier besondere Vorsicht. Holz ist ein wertvoller Rohstoff, mit dem man Häuser und Möbel bauen und Papier herstellen kann. Eine Nutzung durch Verbrennen sollte nur im Sinne der Nachhaltigkeit (mit der in Kapitel 2 beschriebenen Definition) geschehen, hier sei z.B. der Begriff „Hauberg“ genannt. Die in den letzten Jahren immer mehr aufkommende Variante der Holzpellets ist demnach nur dann sinnvoll, solange diese aus Abfällen der Holzindustrie hergestellt werden.

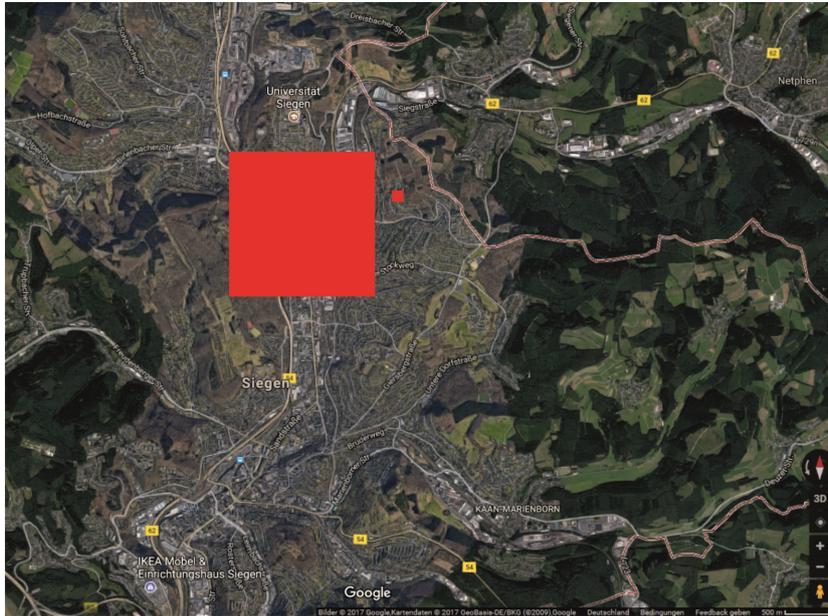


Abbildung 5.26: **Die Fläche, die benötigt wird, um ein 150 PS-starkes Auto mit Biotreibstoff zu versorgen. Diese entspricht einem Quadrat mit einer Kantenlänge von 1,6 Kilometern, hier im Vergleich zum Stadtgebiet von Siegen dargestellt. Das kleine Quadrat mit der Kantenlänge von 116 m entspricht der benötigten Fläche bei einer Nutzung des Autos von 1000 Stunden pro Jahr (Quelle Hintergrundbild: Googlemaps).**

Letztlich lässt sich festhalten:

Um die Biomasse als Energieträger überhaupt im großen Umfang nutzen zu können, muss zunächst einerseits sichergestellt werden, dass die Ernährung der (Welt-) Bevölkerung gesichert ist und andererseits bestehende Waldgebiete durch nachhaltige Bewirtschaftung erhalten bleiben. Bei der Konkurrenz der Biomassennutzung mit dem Anbau von Nahrung und dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen für höherwertige Produkte sollten eindeutig Hierarchien aufgebaut werden. Bioenergie sollte wirklich nur dann genutzt werden, wenn sie als Nebenprodukt anfällt (Holzpellets in der Holzindustrie, Reste von Getreidepflanzen zu Biogas) oder wenn Anbauflächen nicht anderweitig genutzt werden. Generell eröffnet die Biomasse keine ernstzunehmende Perspektive für eine zivilisatorische Energieversorgung, die über die Rolle einer durchaus sinnvollen Nischenversorgung hinausreichen würde.

### 5.2.2.5 Potenziale der Geothermie

Bergwerke, heiße Quellen und Geysire sind deutliche Indizien dafür, dass tief unter der Erdoberfläche sehr hohe Temperaturen herrschen. Diese entstehen hauptsächlich durch drei innere Wärmequellen (s. [Cla14]).

#### 1. Radiogene Wärme:

Beim Zerfall von radioaktiven Isotopen wird Wärme frei gesetzt. Abgesehen von den freiwerdenden Neutrinos und Antineutrinos wechselwirken sämtliche Produkte beim radioaktiven Zerfall mit dem umgebenden Material. Dabei wird ihre kinetische Energie in Wärme umgewandelt. Um einen nennenswerten Beitrag in der Energiebilanz zu besitzen, müssen in Frage kommende Isotope einerseits eine Halbwertszeit in der Größenordnung des Erdalters haben und andererseits hinreichend in den Gesteinen des Erdmantels vorhanden sein. Dies trifft im Wesentlichen auf die Isotope Uran-235, Uran-238, Thorium-232 und Kalium-40 zu.

#### 2. Ursprungswärme:

Durch gravitative Verdichtung von Material bei der Erdentstehung wurde dessen potenzielle Energie in Form von Wärme freigesetzt. Man betrachte hierfür einen sphärischen Körper mit dem Radius  $r$  und konstanter Dichte  $\rho$ . Die akkumulierte Masse beträgt  $m = \frac{4}{3}\pi\rho \cdot r^3$ . Fügt man eine weitere Kugelschale der Dicke  $dr$  hinzu, so ändert sich die Masse um:

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi\rho \cdot r^2 \text{ bzw. } dm = 4\pi\rho \cdot r^2 \cdot dr. \quad (5.89)$$

Das Hinzufügen einer solchen Kugelschale setzt zusätzliche potenzielle Energie frei:

$$dE = G \cdot \frac{m \cdot dm}{r} = G \cdot \frac{\frac{4}{3}\pi\rho \cdot r^3 \cdot 4\pi\rho \cdot r^2 \cdot dr}{r} = G \cdot \frac{16\pi^2\rho^2}{3} r^4 \cdot dr. \quad (5.90)$$

$G$  ist dabei die Gravitationskonstante. Integriert man über alle Kugelschalen, so erhält man die gesamte frei gewordene Gravitationsenergie:

$$E = \int_0^{r_E} dE = \int_0^{r_E} G \cdot \frac{m}{r} dm = G \cdot \frac{16\pi^2\rho^2}{3} \int_0^{r_E} r^4 dr = -G \cdot \frac{16\pi^2\rho^2}{3} \cdot \frac{r_E^5}{5}. \quad (5.91)$$

$r_E$  ist dabei der Radius der Erde, der Term  $\frac{4\pi\rho\cdot r_E^3}{3}$  gibt daher die Gesamtmasse der Erde  $M_E$  an. Damit vereinfacht sich das Ergebnis zu:

$$E = -\frac{3}{5} \cdot \frac{G \cdot M_E^2}{r_e}. \quad (5.92)$$

Setzt man nun die Werte für die Masse ( $M_E = 5,97 \cdot 10^{24} \text{kg}$ ) und den Radius der Erde ( $r_E = 6,371 \cdot 10^6 \text{m}$ ) ein, so erhält man die durch Akkretion frei gewordene Energie:

$$E = 2,24 \cdot 10^{32} \text{J}$$

Zusätzlich zu diesem Betrag, so nach derzeitigem Verständnis, wurde eine große Energiemenge in der gleichen Größenordnung durch Kollisionen mit anderen Himmelskörpern bzw. Protoplaneten in der Frühphase der Erdentstehung frei. Im Gegensatz zur allmählichen Akkretion haben solche Himmelskörper einen Überschuss an kinetischer Energie, der sich durch eine reine Potenzialrechnung nicht sauber ermitteln lässt.

Ein Großteil der durch die Akkretion und Kollisionen frei gewordenen Energie wurde direkt wieder abgestrahlt, dennoch bewirkte der kleine übrig gebliebene Anteil eine Aufheizung der Erde.

### 3. Latente Wärme und potenzielle Energie:

Diese wird frei bei der Bildung des festen Erdkerns, der thermischen Kontraktion des Erdmantels und der Bildung neuer Kruste und der damit gleichzeitig stattfindenden Anreicherung schwerer Elemente im Erdmantel.

Der letztgenannte Punkt trägt im Verhältnis weniger zum entstehenden Wärmefluss bei. Derzeitige Abschätzungen geben an, dass nicht-radiogene Wärmequellen ( 2. und 3. ) den Wärmestrom aus dem Erdinneren mit etwa 27 TW und radiogene Wärmequellen mit ca. 20 TW speisen. Damit ergibt sich ein Gesamtwärmefluss von 47 Terrawatt.

Mit elementaren Überlegungen lässt sich dieser globale geothermische Wärmefluss untersuchen. Dieser stellt die Grenze für jegliche technische Nutzung im Rahmen der sogenannten geothermischen „Energiegewinnung“ dar.

Aussagen über die Temperaturverteilung im Erdinneren enthalten viele hypothetische Elemente, da Messungen nur bis in einigen Kilometer Tiefe vorgenommen werden können. Von diesen ist allerdings bekannt, dass die Temperatur um 30

Kelvin pro Kilometer Tiefe zunimmt bzw. um 0,03 Kelvin pro Meter. Dies ist der mittlere vertikale Temperaturgradient (s. [BKRS01], S. 31).

Die thermische Energie aus dem Erdinneren wird zur Oberfläche transportiert. Da die Erde diesen Transport hin zur Erdkruste in die Gesteinsschichten seit mehreren Milliarden Jahren vollzieht, kann ein stationärer Zustand angenommen werden, das heißt, dass im Mittel jede dieser Schichten pro Sekunde vertikal von der gleichen Wärme durchströmt wird (s. [Sch06]).

Für die Wärmeleitung gilt:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta h} \cdot t. \quad (5.93)$$

Dabei gibt  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials an, je größer dieser ist, desto besser leitet ein Material die Wärme,  $A$  ist die Fläche, durch welche die Wärme geleitet wird,  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen dem heißen und kalten Reservoir,  $\Delta h$  ist die Länge bzw. Höhe der wärmeleitenden Schicht.  $\frac{\Delta T}{\Delta h}$  kann als Temperaturgradient angesehen werden.  $t$  gibt die Dauer des Wärmestroms an, die man betrachten will.

Da wir, wie in vorangegangenen Betrachtungen, die mögliche nutzbare Leistung erhalten wollen, ergeben sich folgende Gleichungen:

$$P = \frac{Q}{t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta h}. \quad (5.94)$$

bzw. für die Leistung pro Flächeneinheit

$$\frac{P}{A} = \frac{Q}{t} \cdot \frac{1}{A} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta h}. \quad (5.95)$$

Für die Wärmeleitfähigkeit können Werte von typischen Gesteinsarten eingesetzt werden, wie etwa  $\lambda_{\text{Granit}} = 2,8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  oder  $\lambda_{\text{Sandstein}} = 2,9 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ . Mit dem oben beschriebenen mittleren vertikalen Temperaturgradienten erhält man so eine Leistung des Wärmestroms pro Flächeneinheit von

$$\frac{P}{A} = 2,8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \cdot 0,03 \frac{\text{K}}{\text{m}} \approx 0,084 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 100 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2} \quad (5.96)$$

Für die gesamte Erdoberfläche folgt eine maximale Leistung für die Geothermie (in sehr guter Übereinstimmung mit deutlich aufwendigeren Berechnungen) von

$$\frac{P}{A} \cdot 4\pi \cdot r_{Erde}^2 = 4,3 \cdot 10^{13} \text{W}. \quad (5.97)$$

Dies ist das etwa zweieinhalbfache des gegenwärtigen Leistungsumsatzes der Menschheit. Global gesehen ist die Geothermie folglich keine Alternative, da der jährliche Energiebedarf nicht nennenswert gedeckt werden kann, da man praktisch die gesamte Erdoberfläche abgreifen müsste, um einen signifikanten Betrag zu erzielen. Technische Wirkungsgrade und die Tatsache, dass Geothermie nur über Landflächen genutzt werden kann, wurden ebenfalls noch nicht berücksichtigt.

### 5.2.3 Zusammenschau der regenerativen Energieträger

In den vorangegangenen Unterkapiteln wurden einige regenerative Energieträger physikalisch näher auf die möglichen Potentiale untersucht. Auch wenn teilweise recht grobe Modelle verwendet wurden, so erhält man dennoch Werte, die in der gleichen Größenordnung liegen, meist etwas oberhalb, wie solche, die mit präziseren und gleichzeitig komplizierteren Modellen errechnet werden.

	Sonnenenergie	Windkraft	Wasserkraft	Biomasse	Geothermie
<b>Globales Potenzial</b>	$240 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Tabelle 5.10: **Potentiale der verschiedenen Energieträger. Die hier gelisteten Werte sind jeweils die maximale oberer Grenze, weitere technische Wirkungsgrade wurden nicht berücksichtigt.**

Vergleicht man zusätzlich die Fläche, die benötigt werden würde, um den aktuellen Primärenergiebedarf mit den jeweiligen Energieträgern zu decken, so erhielte man folgende Werte:

Leistungs- umsatz	Sonnenenergie	Windkraft	Wasserkraft	Biomasse	Geothermie
<b>Welt</b> ( $1,7 \cdot 10^{13} W$ )	$7,1 \cdot 10^{10} m^2$	$2,1 \cdot 10^{12} m^2$	$2,1 \cdot 10^{12} m^2$	$1,7 \cdot 10^{13} m^2$	$1,7 \cdot 10^{14} m^2$
<b>Deutschland</b> ( $4,3 \cdot 10^{11} W$ )	$1,8 \cdot 10^9 m^2$	$5,4 \cdot 10^{10} m^2$	$5,4 \cdot 10^{10} m^2$	$4,3 \cdot 10^{11} m^2$	$4,3 \cdot 10^{12} m^2$

Tabelle 5.11: Flächenbedarf einiger regenerativer Energieträger.

Bei diesen enorm großen Flächen sollte man allerdings nicht außer Acht lassen, dass die Oberfläche der Erde inklusive der Ozeane  $5,1 \cdot 10^{14} m^2$ , die von Deutschland  $3,6 \cdot 10^{11} m^2$  beträgt. Bei einigen Energieträgern wäre rechnerisch ein Bedarf gegeben, der in etwa diesen Flächen entspricht oder sogar darüber hinaus geht (s. Abb. 5.27). In solchen Fällen würde auch eine Kombination verschiedener regenerativer Energieträger keine Besserung bewirken.

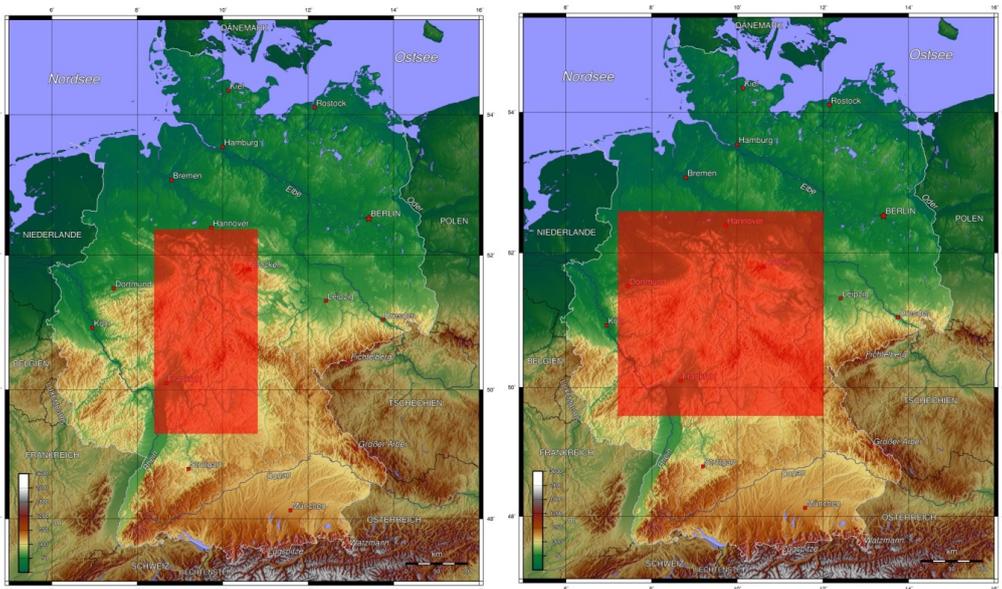


Abbildung 5.27: Fläche Deutschlands, die zur nationalen Primärenergiegewinnung benötigt werden würde, bei einem Potenzial von  $8 \frac{W}{m^2}$  (links) bzw.  $4 \frac{W}{m^2}$  (rechts) (eigene Darstellung, Quelle Hintergrundbild: [MyG]).

Ähnlich pessimistisch sieht es aus, wenn man die Zeiten betrachtet, über die hinweg ein erneuerbarer Energieträger auf einer bestimmten Fläche Leistung akku-

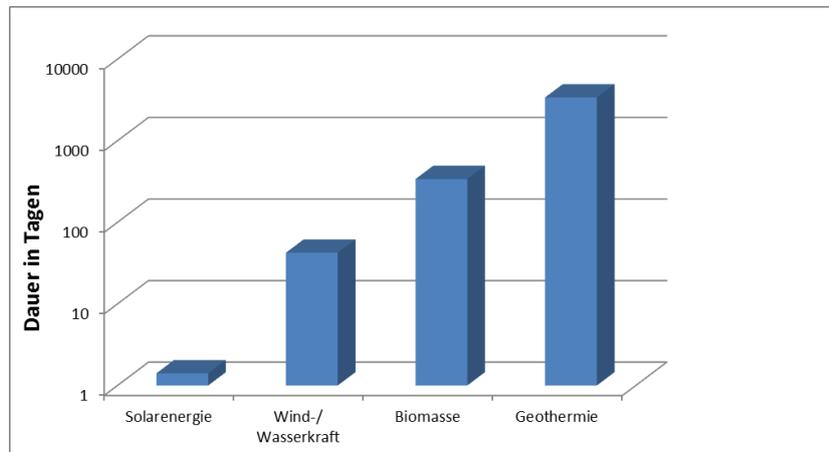


Abbildung 5.28: **Akkumulationszeiten für Sonnenenergie, Wind- und Wasserkraft, Biomasse und Geothermie.**

mulieren müsste, um die gleiche Energiemenge zu erhalten, die in einem Kilogramm Steinkohle gespeichert ist. Die sogenannten Akkumulationszeiten sind in Abbildung 5.28 dargestellt.

Um die Energie von 36 Gigajoule zu erhalten, müsste eine Fläche von einem Quadratmeter etwa 1,4 Tage von der Sonne mit durchschnittlich  $240 \frac{W}{m^2}$  beschienen, Wind- und Wasserkraft müssten 42 Tage genutzt, Biomasse mehr als 339 Tage geerntet und Erdwärme über mehr als 3390 Tage bzw. knapp 9 Jahre genutzt werden. Die Zeiten müssten bei genaueren Berechnungen der Potentiale jeweils deutlich nach oben korrigiert werden.

Die erneuerbaren Energieträger sind, wie gezeigt wurde, kaum in der Lage, den jetzigen Energiebedarf zu decken. Ein enormer Flächenbedarf (s. Abb. 5.27) ist die Folge, diese Areale stehen anderen zivilisatorischen Bedürfnissen nicht mehr bzw. nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Die Tatsache, dass die untersuchten Anlagen der unterschiedlichen Energieträger Werte im Bereich der Abschätzungen bzw. über dem Carnot-Wirkungsgrad liefern, ist damit zu begründen, dass durch geografische Gegebenheiten die Energie hochverdichtet ist, unsere Berechnungen aber immer von globalen Mittelwerten ausgehen. Die Energie an solchen Standorten abzugreifen ist durchaus sinnvoll, man denke an die heißen Quellen in Island (Geothermie) oder Offshore-Windparks in den Meeren. An weniger ausgesuchten Standorten werden solch hohe Werte, wie in den betrachteten Fällen, jedoch nicht erreicht. Der maximale Wirkungsgrad in den Geosystemen ist erheblich geringer als die Carnot-Effizienz. Eine globale Nutzung regenerativer Ener-

gieträger würde eine geringere Leistungsdichte ergeben, als diejenige, die man an den gegenwärtig ausgebauten, besonders exponierten Standorten erzielen kann. Wind- und Wasserkraftwerke greifen die regenerative Energie erst zu dem Zeitpunkt ab, nachdem sie durch Überführung in mechanische Vorgänge bereits die größte thermodynamische Entwertung in den Geosystemen erfahren haben. Solaranlagen, aber auch Pflanzen gehen diesen Umweg zunächst nicht, denn sie nutzen unmittelbar die thermodynamisch hochwertige Sonnenstrahlung (wir lassen mechanische Vorgänge des Nährstofftransports hierbei außer Acht). Pflanzen nutzen also die Solarstrahlung direkt, bevor diese in Wärme bei niedriger Temperatur umgewandelt wird. Rein physikalisch könnte also die Umwandlungsrate größer als ca.  $8 \frac{W}{m^2}$  sein, in der Realität unterschreitet sie diesen Wert jedoch deutlich. Der Grund liegt auf der Hand: die Photonen im Sonnenlicht gehören thermodynamisch zu einer Temperatur von 6000 Kelvin. Sich in das Strahlungsgleichgewicht mit der Sonnenstrahlung zu begeben, würde theoretisch bedeuten, dass sich ein Objekt auf eine größenordnungsmäßig gleiche Temperatur erhitzen müsste. Pflanzen (aber auch jegliche Form der technischen Nutzung) können also das volle Planck-Spektrum energetisch nicht im Sinne eines schwarzen Empfängers ausschöpfen. Vielmehr müssen sie den weitaus größten Teil der spektralen Photonenenergieverteilung ungenutzt passieren lassen, um nicht selbst zu schmelzen oder zu verdampfen. Die Blätter der Pflanzen absorbieren nur zwei kleine spektrale Energiebänder im blauen und roten Bereich. Ähnlich verhält es sich mit Solarzellen. Bei der Solarthermie setzt man Stoffgemische mit hohem Schmelzpunkt ein, jedoch muss auch hier eine permanente Kühlung durchgeführt werden, um den Turbinenbereich, der eben nicht unmittelbar mit dichten Flüssigkeiten durchströmt werden kann, nicht zu zerstören. Auch muss man leider bewusst einen großen Teil des thermodynamischen Potenzials „entsorgen“.

Ein weiteres Indiz für den niedrigen Gesamtwirkungsgrad der regenerativen Energien ist der bislang gescheiterte Versuch durch großräumige Verteilung von Solar- und Windkraftanlagen auf der Fläche Deutschlands durch wechselseitige Kompensation eine Grundlastzeugung im Bereich der Stromgewinnung zu bewirken.

### 5.2.3.1 Potenzielle Auswirkungen durch Nutzung erneuerbarer Energien

Auch wenn bei den regenerativen Energien oft gleichzeitig von der sogenannten „sauberen“ Energie geredet wird, hat die Nutzung dieser ebenfalls Auswirkungen auf die Umwelt. Diese Folgen beschränken sich nicht nur auf ökologische oder

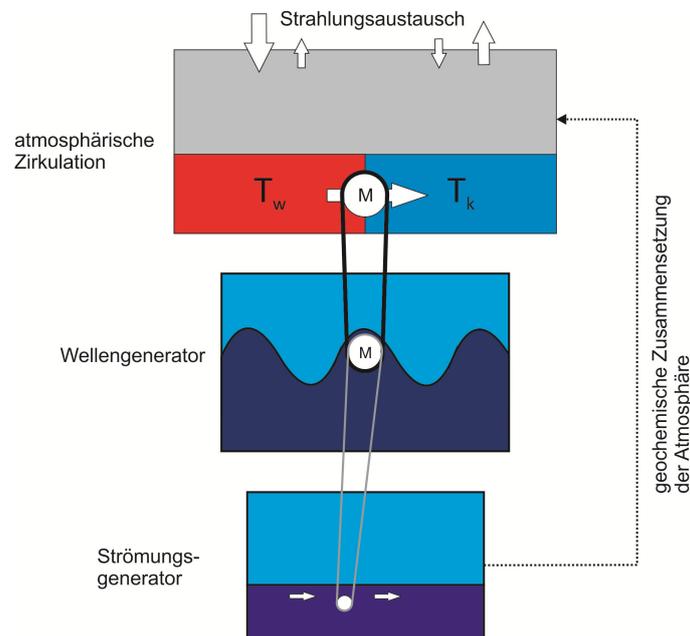


Abbildung 5.29: **Der Wind treibt, ähnlich wie ein Motor, nachfolgende Prozesse an, welche die geochemische Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen.**

ökonomische Aspekte, vielmehr haben sie Konsequenzen, welche ganze Geo- oder gar Klimasysteme stören können und somit verhalten sie sich im Prinzip wie andere Energienutzungsvarianten auch.

Durch die Nutzung von erneuerbaren Energien im großen Stil bzw. nahe der Potenziale verbleibt in den Geosystemen weniger freie Energie, welche notwendig ist, um die Dynamik des System zu erhalten und die Erdsystemprozesse anzutreiben. Wird diese Dynamik durch Entzug der Energie geschwächt, so können Gradienten weniger effizient abgebaut werden. Dies soll am folgenden Beispiel kurz erläutert werden (s. Abb. 5.29, vgl. [Kle10]):

Durch Temperaturdifferenzen bzw. durch horizontale Druckdifferenzen entsteht Wind. Über offenem Meer dissipiert ein Teil der kinetischen Energie des Windes durch Turbulenzen an der Oberfläche. Wellen und Strömungen entstehen. Durch den Wärmefluss werden Stoffaustauschflüsse, z.B. durch Verdunstung, aufrechterhalten, wodurch letztendlich die geochemische Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst wird.

Wird jedoch ein Teil der Energie, beispielsweise durch Windkraftanlagen, entzo-

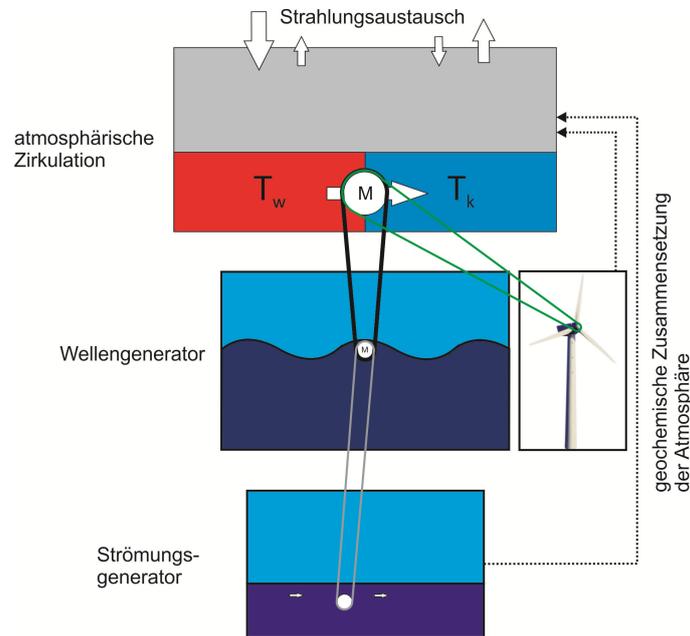


Abbildung 5.30: **Durch Entzug von Energie werden nachfolgende Prozessen abgeschwächt, wodurch weitreichendere Konsequenzen auftreten können.**

gen, so werden die beschriebenen Prozesse aufgrund der fehlenden Energie abgeschwächt. Dadurch beeinflusst die Windkraftanlage nicht nur bodennahe Prozesse, sondern der Einfluss reicht deutlich weiter (s. Abb. 5.30).

Dieser beschriebene Entzug von Energie verursacht nicht zwangsläufig eine Änderung im Strahlungsantrieb der Erde, Klimaveränderungen sind bei Nutzung im großen Stil dennoch zu erwarten. Mit anderen Worten: Entzieht man dem Geosystem einen Energiebetrag, der dem Potenzial nahe kommt, bleibt kaum noch Energie zur Erhaltung der mechanischen Strömungsvorgänge in den Geo- und Ökosystemen übrig.

### 5.2.3.2 Interpretation des Strombedarfs und der -bereitstellung anhand von Realdaten

Anhand von Realdaten der Stromerzeugung und des Strombedarfs in Deutschland lassen sich einige der in diesem Lernmodul erarbeiteten Erkenntnisse erneut darlegen und bestätigen. Ebenso lassen sich typische Muster und damit Verhaltensweisen der Menschen erkennen (s. Abb. 5.31).

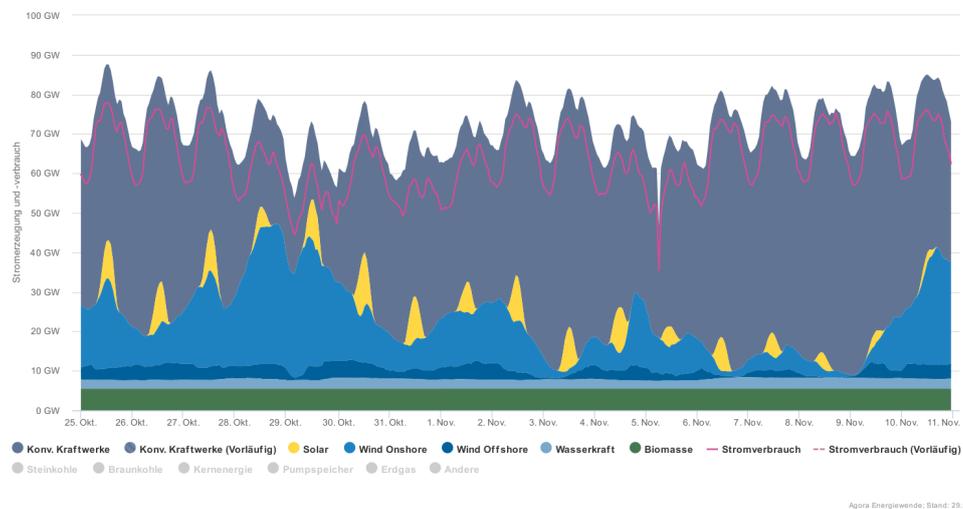


Abbildung 5.31: Dieses Diagramm zeigt die Stromerzeugung, aufgeteilt nach Energieträgern, und den jeweiligen Strombedarf (magenta-farbene Kurve) (Quelle: [Ago]).

Betrachten wir zunächst den „Stromverbrauch“, so lässt sich erkennen, dass jeden Tag zwei Peaks bzw. Zeitpunkte existieren, zu denen vermehrt Strom umgesetzt wird: einmal um die Vormittagszeit und abends gegen 19-20 Uhr. Vergleicht man die Wochentage untereinander, so kann man feststellen, dass der Strombedarf am Wochenende (28. und 29.10, 4. und 5.11.) und auch an Feiertagen (31.10. und 1.11.) geringer ist, als an Werktagen. Dies ist durchaus nicht verwunderlich, schließlich werden Dienstleistungen oder Produktionen an Wochenenden häufig heruntergefahren, so dass dadurch der Energiebedarf sinkt.

Betrachtet man auf der anderen Seite die Energiebereitstellung durch die verschiedenen Energieträger, so erkennt man deutlich, dass große Anteile durch konventionelle Kraftwerke, also Kohle, Erdgas, Kernenergie, erzeugt werden. Es lässt sich ebenso erkennen, dass von den regenerativen Energien nur die Bioenergie (grün), die Wasserkraft (sehr helles blau) und in Grundzügen die Offshore-Windenergie (in diesem Beispiel) relativ konstant verfügbar sind – allerdings tragen die letztgenannten Energieträger kaum zur Gesamtstromerzeugung bei. Dies wird besonders deutlich, wenn man die anderen Energieträger einzeln betrachtet (s. Abb. 5.32).

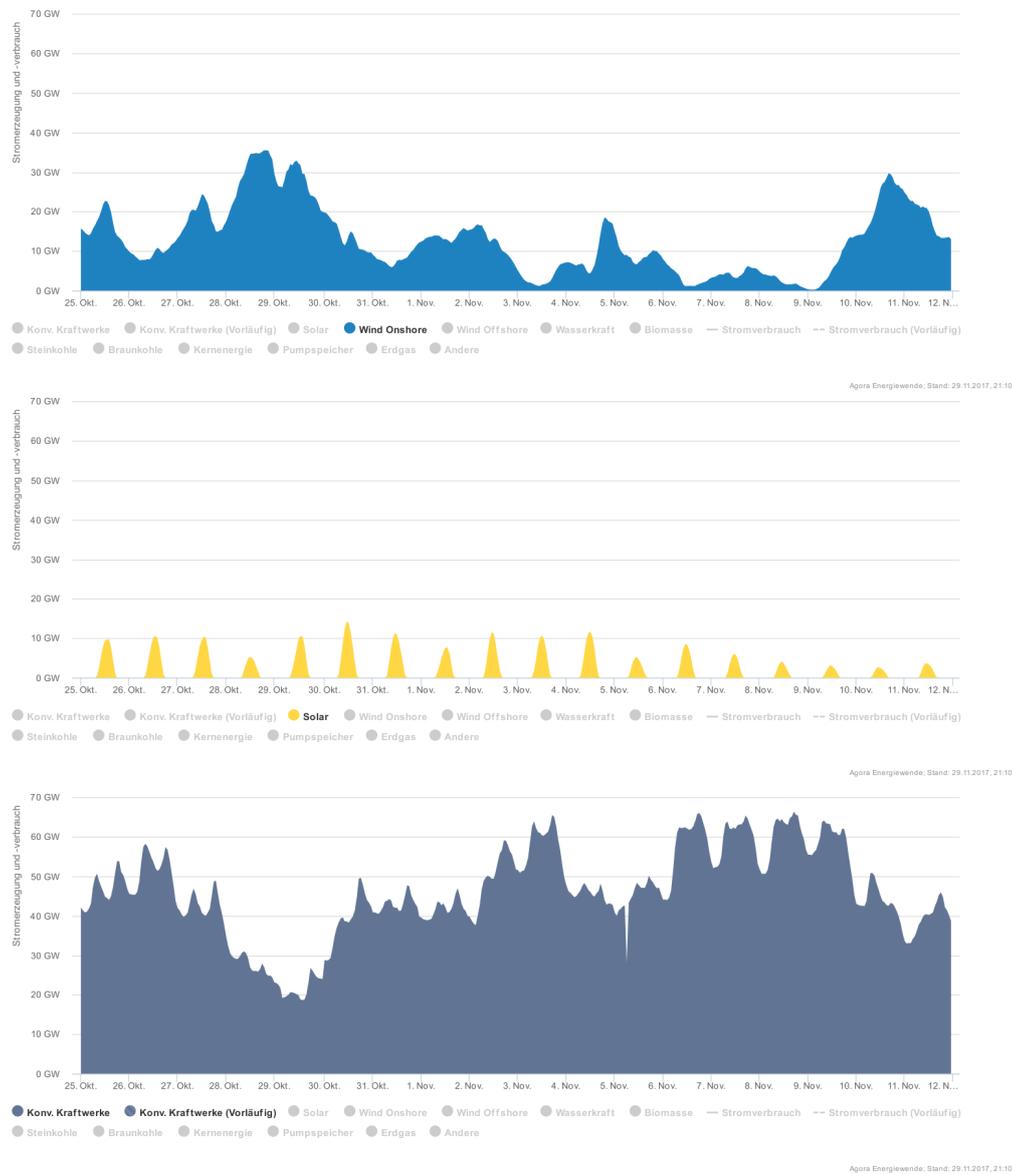


Abbildung 5.32: Die Strombereitstellung durch Windkraft (Oben) und Solarenergie (Mitte) ist sehr wechselhaft, je nach Verfügbarkeit. Die konventionellen Kraftwerke (Unten) müssen diese Fluktuationen ausgleichen (Quelle: [Ago]).

Bei der Solarenergie ist natürlich nicht verwunderlich, dass starke Schwankungen aufgrund des Tag-Nacht-Wechsels auftreten. Je nach Wetter verstärken sich die Schwankungen innerhalb der Tage (s. beispielsweise 30. Okt. mit 14,3 GW, ver-

glichen mit 2,7 GW am 10. November). In den Sommermonaten wird die Stromerzeugung natürlich höher liegen, als in diesem Beispiel, Schwankungen werden allerdings ebenso vorhanden sein.

Betrachtet man die Onshore-Windkraft, so erkennt man noch größere Schwankungen. Auch wenn die Erzeugung im Mittel deutlich höher liegt als bei der Solarenergie, so lassen sich deutlich schlechtere Vorhersagen bzgl. der Verfügbarkeit tätigen. Der Höchstwert in dem betrachteten Zeitraum liegt bei etwa 36 GW (28. Okt.), das Minimum am 9. November mit etwa 0,24 GW. Windenergie ist also extrem volatil.

Auch wenn man alle in Deutschland verfügbaren regenerativen Energieträger zusammen nimmt, konnte man lediglich knapp unter 9 GW an Strom an besagtem 9. November erzeugen. Der Strombedarf betrug allerdings zu diesem Zeitpunkt etwa 57 GW, am Abend davor lag dieser bei ca. 75 GW, bei einer kaum größeren Stromerzeugung durch die erneuerbaren Energien.

An diesem Beispiel lässt sich deutlich erkennen, dass mit dem jetzigen Ausbau an regenerativen Energien keine Grundversorgung gewährleistet werden kann. Fluktuationen, die bei natürlichen Energieträgern immer auftreten, müssen durch andere Energieträger kompensiert werden – in unserem Fall durch konventionelle Kraftwerke. Da im schlimmsten Fall fast nichts an Strom durch erneuerbare Energien erzeugt wird, muss für dieses Szenario prinzipiell die Möglichkeit der Versorgung durch konventionelle Kraftwerke bestehen. Selbst wenn eine Speicherung von Energie im großen Stil umsetzbar wäre, würde dies nur dazu führen, dass etwaige Spitzen in der Stromerzeugung gespeichert und an Tagen mit Flaute verbraucht werden würden. Dadurch würde die dargestellte Kurve geglättet und damit auch noch flacher werden.

Die Speichertechnologie, um das in derartigen Größen zu bewerkstelligen, existiert zurzeit noch nicht. Man beachte: hier wurde nur die elektrische, keineswegs die Primärenergie betrachtet.

An der Existenz des absoluten Minimums der regenerativen Energieeinspeisung am 9. November erkennt man, wie sinnlos die Strategie ist, durch weiteren Ausbau von Wind- und Solarenergie Versorgungssicherheit zu erreichen. Selbst 1000% mehr Wind- und Solaranlagen hätten nicht vorhandenen Sonnenschein bei trübem Wetter oder Dunkelheit und absolute Windstille nicht kompensieren können.

### 5.2.3.3 Folgerungen aus den Erkenntnissen

Es wurde gezeigt, dass auch durch intensive Nutzung regenerativer Energien Klimafolgen wahrscheinlich sind. Auswirkungen auf das Klima sind allerdings ebenso durch Verbrennung fossiler Energiequellen, man denke an den anthropogenen Treibhauseffekt und daraus resultierende Klimaerwärmung, zu erwarten. Durch den immensen menschlichen Leistungsumsatz werden zwangsläufig Spuren im Erdsystem hinterlassen, unabhängig davon, welcher momentan zur Verfügung stehende Energieträger genutzt wird. Daher wurde im Jahr 2000 vom niederländischen Atmosphärenforscher Paul Crutzen der Begriff „Anthropozän“ als Vorschlag für eine neue geochronologische Epoche geprägt, um zu verdeutlichen, dass der Mensch ein großer Einflussfaktor für das Erdsystem geworden ist, speziell für biologische, atmosphärische und geologische Prozesse (vgl. [SCM07]).

Da der Einfluss kaum bzw. nicht vermeidbar ist, stellt sich die Frage, wie das Anthropozän „gestaltet“ werden kann. Der Energiebedarf der Menschheit befindet sich bereits in einer Größenordnung von den Potenzialen regenerativer Energieträger bzw. den natürlichen Erzeugungsraten. Die Nutzung muss nachhaltig sein, die Fähigkeit des Erdsystems Prozesse am Laufen zu halten, darf also nicht geschwächt werden. Auswirkungen, welche diese Fähigkeit reduzieren, müssen minimiert werden. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise Wind- und Wasserkraft nur an herausragenden Standorten genutzt werden und gleichzeitig sorgfältig mögliche Auswirkungen auf die Umgebung zu beobachten sind. Global gesehen hat die direkte Nutzung der Solarenergie das größte Potenzial, da das Sonnenlicht technologisch abgegriffen wird, bevor es in natürlichen Zwischenprozessen thermodynamisch entwertet wird.

Es lassen sich aus den Betrachtungen zwingend notwendige Handlungsmöglichkeiten bzw. –perspektiven erschließen. Diese können und müssen auf verschiedenen Ebenen greifen – auf der planetaren, der lokal territorialen und der persönlichen Ebene:

- Ein großes Problem bzgl. der Energiebereitstellung ist das enorme Bevölkerungswachstum. Auch wenn eine Beschränkung der Bevölkerung vordergründig unethisch erscheinen mag, würde ein unkontrolliertes Wachstum selbst bei gleich bleibendem Pro-Kopf-Leistungsumsatz eine weitere Zunahme im Energiebedarf bewirken.
- Die Energiebereitstellung muss sich, unter anderem aufgrund zur Neige gehender Vorräte und Ressourcen, von fossilen Brennstoffen lösen. Wie schon

erwähnt, birgt die Solarenergie von allen erneuerbaren Energieträgern das größte Potenzial. Allerdings kann eine Grundversorgung nicht ohne Kernenergie auskommen, alleine schon aufgrund von momentan fehlenden Speichermöglichkeiten für die Energie. Hier muss einerseits eine erweiterte Gewinnung von Brennstoffen (z.B. durch die in den Meeren gelösten Uransalze) und andererseits die Kernfusion eingeschlossen werden.

- Da die Energiedebatte eigentlich eine „Leistungsproblematik“ ist, muss sich ein extremes Sparen einstellen. Die aktuelle Situation kann durch zwei verschiedene Möglichkeiten verbessert werden:  
Die Leistung ist, so wird es in der Schule gelehrt, eine Energiemenge, die in einer gewissen Zeit umgesetzt wird. Die Menschen müssen also einerseits anfangen, die benötigte Energie zu verringern, so dass Bedarf und Bereitstellung im Einklang miteinander sind.  
Andererseits müssen die Zeiträume, in denen man eine bestimmte Energiemenge abrufen, vergrößert werden. Es muss ein Umdenken stattfinden, dass nicht immer alles möglichst schnell passieren muss. Man kommt beispielsweise bei einer langsamen Zugfahrt genauso von Ort A nach B, wie bei einer schnellen. Nur ist der Leistungsumsatz bei der schnelleren Fahrt viel höher. Es muss sich insgesamt eine „neue Langsamkeit“ einstellen (s. [JS14], S. 200). Dazu muss beispielsweise die gesamte Infrastruktur der Industrie umgestellt werden. Eine ausgedehnte Lagerhaltung ermöglicht den Transport von Gütern immer dann, wenn die Energiebereitstellung gerade günstig ist. „Just in time“-Produktion ohne Lagerhaltung setzt einen gewaltigen Energieumsatz voraus, der konstant gewährleistet werden muss. Gerade das passt aber nicht zur zeitlich schwankenden regenerativen Energiebereitstellung.
- Die Diskussion um die Nutzung der verschiedenen Energieträger darf sich nicht auf die „unsachliche“ und „unwissentliche“ Meinung Weniger stützen. Vor allem dürfen keine übereilten Entscheidungen getroffen werden. Es muss vielmehr betrachtet werden, welche Alternativen welches Leistungsvermögen haben. Man kann nicht auf die konventionellen Energieträger verzichten, ohne beispielsweise die Unsicherheiten der Energiebereitstellung der regenerativen Energieversorgung zu überwinden.  
Nachvollziehbar wird dies, da inzwischen tagesaktuell Datensätze zur diversifizierten Energiebereitstellung in Deutschland zur Verfügung stehen (s. Abb. 5.31).

Die Kurve des tatsächlichen Verbrauches ist relativ gut zu prognostizieren (Sinusförmiger Verlauf wegen Tag-Nacht, Rückgang des Leistungsbedarfs an Wochenenden und an Feiertagen). Chaotisch und zufällig erfolgt die Einspeisung der regenerativen Energien Wind und Sonne, relativ konstant die von Bio- und Wasserenergie. Um die fluktuierende Einspeisung zu kompensieren, wären Zwischenspeicher notwendig. Ein weiterer drastischer Ausbau der regenerativen Energien ist hingegen nicht sinnvoll, da es immer wieder Zeitpunkte gibt, an denen weder der Wind weht, noch die Sonne scheint, so dass die Kompensationslücke, die von klassischen Kraftwerken zu tragen ist, ebenso groß ist, als hätte es überhaupt keine Energiewende gegeben. Durch angepasstes menschliches Verhalten könnte man lernen, besser mit den Energiefluktuationen umzugehen, indem man beispielsweise Transportaufgaben oder besonders energieaufwändige Produktionsprozesse nur dann vornimmt, wenn das Dargebot der regenerativen Energien besonders groß ist.

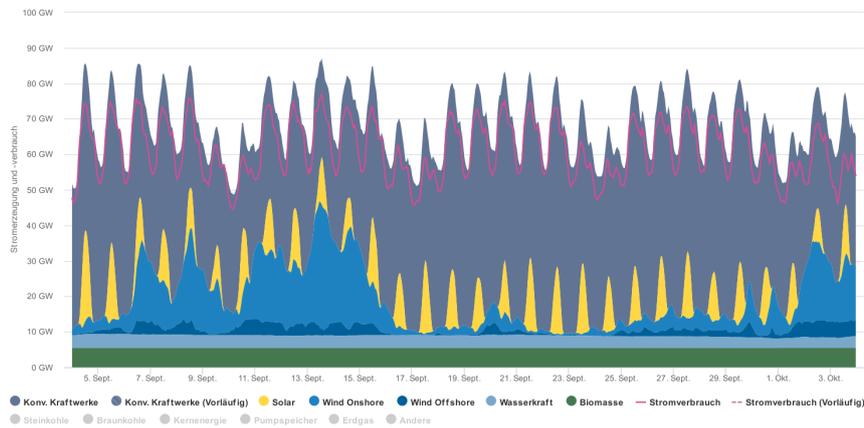
- Eine Umstellung im Verhalten der Menschen darf sich nicht nur auf einzelne Personen beschränken. Es muss die Mehrheit der Menschheit daran teilnehmen. Jeder Mensch hat grundsätzlich die Freiheit, das zu tun was er will (im Rahmen der Gesetze), jedoch ist es daher umso wichtiger den Menschen – und damit den Schülern als angehende Erwachsene der nächsten Generation – die Denkwerkzeuge an die Hand zu geben, vernunftgeleitet und zukunftsorientiert zu handeln.

### 5.3 Aufgaben zu Lernmodul 3

1. Die Sonnenenergie versagt wegen schlechtem Wetter, gleichzeitig herrscht Windstille. Wie viel Wasserstoff müsste gelagert werden, wenn er die gesamte Primärenergie der Menschheit für 3 Wochen aufbringen müsste? Gehen Sie für alle Teilprozesse vom energetischen Wirkungsgrad 1 aus.
2. Wie lang müsste ein mit Steinkohle beladener Güterzug sein, damit er den Energiebedarf von Nordrhein-Westfalen für ein Jahr decken kann?
3. Begründen Sie mithilfe der Biomassenkonstante, dass Deutschland unmöglich seinen Primärenergiebedarf durch Biomasse decken kann. Welche minimale Fläche würde ein Kamin der Heizleistung 8000 W bei Dauerbetrieb

allein verbrauchen?

4. Interpretieren Sie das nachfolgende Diagramm der Stromerzeugung und des Strombedarfs.



Agora Energiewende; Stand: 29.11.2017, 21:45

Abbildung 5.33: **Stromverbrauch in Deutschland (Quelle: [Ago]).**

5. Erläutern Sie, warum insbesondere Wasser- und Windkraft so viel Fläche benötigen?
6. In welcher Größenordnung liegt der geothermische Energiefluss? Warum kann man den Primärenergiebedarf der Menschheit nicht nennenswert durch Geothermie decken?
7. Schätzen Sie den Flächenbedarf für Ihr eigene Ernährung ab und vergleichen Sie diese Fläche mit der mittleren Fläche, die pro Einwohner in Deutschland zur Verfügung steht.
8. Wie viel Wasser muss bei einer Fallhöhe von 30m strömen, damit eine Stunde lang ein Wäschetrockner mit der Leistung 2000 Watt betrieben werden kann?

# Kapitel 6

## Erprobung der Lernmodule

### 6.1 Allgemeines zur Erprobung

In die zuvor präsentierten Lernmodule sind zwei Erprobungen eingeflossen. Das Ziel bestand darin, zu sondieren, ob das angebotene Leistungsniveau von den Schülern der betreffenden Altersstufe erreicht werden kann bzw. ob die Modellentwicklung adressatengerecht ist. Ebenso sollten die Lernenden ihr Reflexionsvermögen erweitern und selbständig mit vorgegebenen Materialien arbeiten können.

Die erste Schülergruppe (s. Kap. 6.2) bestand aus Lernenden mit besonderer Begabung im Rahmen einer Schülerakademie, die zweite aus Oberstufenschülern der Einführungsphase eines Geographiekurses an einem Gymnasium (s. Kap. 6.3). Bei der Erprobung ging es nicht darum statistische Daten zu erheben, vielmehr sollten mit Interviewtechniken und Befragungen Angebote auf Kleingruppen individuell abgestimmt und die schülergerechte Themenbehandlung hinterfragt werden. Bei der ersten Erprobungsgruppe wurde zusätzlich ein Fragebogen verwendet. Dieser wurde, wie in Kapitel 2 vorgestellt, auch an andere, fachfremde Schülergruppen ausgegeben. So wurde das Prinzip von Test- und Kontrollgruppe gewahrt. Dieser Fragebogen ist ein grober Verfahrens- und Verständnistest und zielt nur auf die Erhebung von Wissen ab. Das Ergebnis, welches in Kapitel 6.2 vorgestellt wird, soll rein qualitativ betrachtet werden. Auf eine weitere statistische Auswertung wurde verzichtet.

## 6.2 Erprobung im Rahmen der Deutschen Schülerakademie

### 6.2.1 Die Deutsche Schülerakademie

Die Deutsche Schülerakademie ist eine Institution, gefördert u.a. vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und der Kultusministerkonferenz, welche sich zum Ziel gesetzt hat, Schülern „eine intellektuelle und soziale Herausforderung zu bieten“ (Quelle: [DSA]). Während der fast dreiwöchig andauernden Akademien, bei denen die Schüler durchgängig an einem Standort zusammen bleiben, werden Kurse zu verschiedenen Themengebieten der Natur-, Geistes-, Gesellschafts- und Sozialwissenschaften angeboten, die auf erhöhtem Niveau stattfinden. Dadurch werden neue Arbeits- und Denkweisen kennengelernt und der eigene Horizont erweitert mit Inhalten, die in einer Regelschule kaum umsetzbar sind. Teilnehmen können besonders lernfähige und leistungsbereite Jugendliche, die sich in der Oberstufe befinden. Betreut werden die Kurse durch Lehrer und Wissenschaftler. Neben den Kursen zu den gewählten Themengebieten werden weitere Ausgleichsaktivitäten in den sogenannten „Kursübergreifenden Kursangeboten“ (Musik, Sport, Kunst, Sprachen usw.) angeboten.

Um das Gelernte zu vertiefen und zu festigen, findet in der Mitte des Akademieaufenthalts die sogenannte „Rotation“ statt. Die Kursteilnehmer sollen hierfür einen Vortrag zu den in ihrem Kurs behandelten Themen vorbereiten und Schülern anderer Kurse präsentieren. Vor Ende der Akademie sollen die Lernenden zusätzlich zu den Kursen selbstständig einen wissenschaftlichen Text, die sogenannte „Dokumentation“, erstellen. Das Geschriebene soll dabei den Standards einer wissenschaftlichen Arbeit entsprechen. Speziell diese Aufgabe führt zu einem erneuten und vertiefenden Auseinandersetzen mit den gelernten Inhalten, das Verständnis des Themas wird umfassender.

### 6.2.2 Planung und Durchführung

Der Kurs, welcher auf den Grundlagen dieser Arbeit beruht, hat den Titel „Wachstumsgrenzen der Menschheit – Zukunft und Möglichkeiten regenerativer Energien“. Aufgrund der zeitlichen Dauer und des ganztägigen Angebots mussten etwa dreißig Doppelstunden geplant und durchgeführt werden (s. Abb. 6.1). Dabei

sollte während der Kursdurchführung möglichst auf eigenständiges Arbeiten Wert gelegt werden. Das modellhafte Denken sollte angeregt, die Lernenden zum kritischen Reflektieren angehalten werden. Experimente wurden als unterstützendes Mittel eingesetzt. Die Schüler befanden sich meist in der zehnten und elften Jahrgangsstufe, einige wenige bereits in der zwölften. Dies machte das Planen entsprechend schwierig, da sowohl die Reife als auch die Fähigkeiten in der Mathematik aufgrund der verschiedenen Jahrgangsstufen unterschiedlich ausgeprägt waren. Einige Schüler waren in der Lage Integrale auszurechnen, während andere noch keine Ableitung bilden konnten. Ähnlich verhielt es sich mit den physikalischen Kenntnissen. Daher mussten häufig verschiedene Zugänge aktiviert und das Niveau entsprechend angepasst werden.

Zeiten	Donnerstag 1. Tag	Freitag 2. Tag	Samstag 3. Tag	Sonntag 4. Tag	Montag 5. Tag	Dienstag 6. Tag	Mittwoch 7. Tag	Donnerstag 8. Tag	Freitag 9. Tag	Samstag 10. Tag	Sonntag 11. Tag	Montag 12. Tag	Dienstag 13. Tag	Mittwoch 14. Tag	Donnerstag 15. Tag	Freitag 16. Tag	Samstag 17. Tag	
07:30 bis 08:30		Frühstück	Frühstück	08:30-09:30 Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	08:30-09:30 Frühstück	Frühstück	Frühstück	08:30-09:30 Frühstück	Frühstück	Frühstück	Frühstück	
08:30		Plenum Kurs	Plenum Kurs	frei	Plenum Kurs	Plenum Kurs	Plenum Kurs	Plenum Kurs	Plenum Kurs	Plenum Kurs	frei	Plenum Kurs	Plenum Kurs	Vor- und Nach- bereitungen	Plenum Kurs	Plenum Kurs	Plenum Kurs	
daneben						Exkursion				Rotation							Nachbespr. mit den Teil- nehmenden	
bis zum			10:30 Kaffee/Teemilch Kurs	10:30 Kaffee/Teemilch Kurs			10:30 Kaffee/Teemilch Kurs	10:30 Kaffee/Teemilch Kurs	10:30 Kaffee/Teemilch Kurs	10:30 Kaffee/Teemilch Kurs	frei	10:30 Kaffee/Teemilch Kurs						
Mittagessen				frei		Exkursion				Rotation				Vor- und Nach- bereitungen			Abreise der Teil- nehmenden	
12:15 bis 13:30			Mittagessen Täglich um 13:00 Uhr Teemgespräch KOA	Mittagessen Täglich um 13:00 Uhr Teemgespräch KOA	Mittagessen Täglich um 13:00 Uhr Teemgespräch KOA		Mittagessen Täglich um 13:00 Uhr Teemgespräch KOA	frei	Mittagessen Täglich um 13:00 Uhr Teemgespräch KOA									
14:00 bis 16:00										Nach- besprechung								Nachbespr. mit den Mitarbeitern
16:00			16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch KOA	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs		16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch KOA	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch KOA	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs	16:00 Kaffee/Teemilch Kurs		
16:30 bis zum Abendessen		Anreise bis 17:00																
18:45 bis 19:30			Abendessen	Abendessen	Abendessen		Abendessen	Abendessen	Abendessen	Abendessen		Abendessen	Abendessen	Abendessen	Abendessen	Abendessen		
ab 20:00		19:30 Eröffnung anschl. erstes Kurstreffen	KOA	KOA	KOA	evtl. grillen	KOA	KOA	KOA	KOA		KOA	KOA	KOA	KOA	KOA		Abchluss- abend
21:00			Kursleiter stellen sich vor							Sport- turnier								20:00 Konzert

Abbildung 6.1: Das Programm während einer Schülerakademie ist sehr stark durchorganisiert. Mehrere Kurse zu den gewählten Themen und kursübergreifende Angebote finden pro Tag statt.

Der Kurs teilte sich thematisch in verschiedene Sinnabschnitte bzw. Kursblöcke auf. Diese sollen im Folgenden näher erläutert werden. Die Durchführung der einzelnen Themen beruht auf den in den Lernmodulen vorgestellten Inhalten.

### 1. **Kurskonzept und Motivation:**

Im ersten Kursabschnitt ging es in erster Linie um die Motivation des Kursthemas. Dabei sollten Erfahrungen zur Umweltphysik und der Energieproblematik aus Schule, Freizeit, Familie usw. ausgetauscht, die Notwendigkeit der Diskussion vor Augen geführt werden. Speziell sollte, wie in der Einleitung zu dieser Abhandlung, die Wichtigkeit der Argumentation aus physikalischer und astronomischer Sicht dargestellt und vermittelt werden.

### 2. **Energieträger:**

In diesem Block wurden von den Teilnehmern des Kurses vorbereitete Vorträge zu den verschiedenen Energieträgern bzw. -quellen gehalten. Wie zu erwarten war, wurden meist technische Aspekte aufgezeigt, Potenziale oder gar physikalische Betrachtungsweisen fehlten meist, was wiederum die Notwendigkeit der Einführung eines solchen Kurses aufzeigt. Die Vorträge dienten in erster Linie als Basis, auf der die nachfolgenden Betrachtungen aufbauen sollten.

### 3. **Astronomische Wachstumsgrenzen:**

Ähnlich wie in dieser Arbeit dienten die astronomischen Wachstumsgrenzen, insbesondere das Augenmerk auf das exponentielle Verhalten im Leistungsumsatz der Menschheit, zur Verdeutlichung der Existenz von planetaren Grenzen und somit auch zwangsläufig von Limits im Energieumsatz der Menschen. Ein Vergleich der jeweils benötigten Fläche zur Gewinnung von Energie sollte ebenso die Endlichkeit von Potenzialen aller Energieträger deutlich machen.

### 4. **Wärmeübertragungsprozesse:**

In diesem Abschnitt spielten die Wärmeübertragungsprozesse eine übergeordnete Rolle. Insbesondere wurde der Zusammenhang zwischen der Wind-, Wasser- und Bioenergie zur Sonnenenergie erläutert. Ebenso wurden hier klimatische Zusammenhänge und mögliche Auswirkungen beim meridionalen Wärmetransport näher behandelt. Die Untersuchung des

Verhaltens der Erde als thermodynamisches System führte zum Carnot-Wirkungsgrad und ersten Abschätzungen der Potenziale von regenerativen Energieträgern.

#### 5. Auf der Erde nutzbare Sonnenenergie:

Um die nutzbare Sonnenenergie auf der Erde zu berechnen, wurde - wie in dieser Arbeit vorgeschlagen - die Solarkonstante theoretisch berechnet und anhand verschiedener Experimente plausibel gemacht. Weitere Effekte, die sich auf das Potenzial auswirken (Albedo, Größe der Erde usw.), wurden ebenso besprochen.

#### 6. Strahlungsantrieb und Rückkopplungseffekte:

In diesem Abschnitt wurde ein einfaches Atmosphärenmodell entwickelt, welches dazu diente, den Strahlungsaustausch der Erde genauer zu betrachten. Dadurch erhielt man einen einfachen Zusammenhang zwischen dem Strahlungsantrieb bzw. einer Änderung der Solarkonstanten und der Temperatur auf der Erde. Ferner ergab sich, dass aufgrund von Rückkopplungseffekten kleine Strahlungsantriebe, die über lange Zeiten hinweg wirken, große Auswirkungen (z.B. Eiszeiten) nach sich ziehen können (s. Kapitel 4).

#### 7. Thermodynamik des Erdsystems und Flächenbedarf:

Hier wurde zunächst vorgestellt, dass die Erde als Wärmekraftmaschine angesehen werden kann und sie deshalb den thermodynamischen Gesetzen unterliegt. Daher ist zwingend erforderlich für die Verrichtung von Arbeit das Carnot-Limit als maximale Grenze der Prozesse im Erdsystem anzusehen. Mit typischen Werten von Temperaturunterschieden bzw. der mittleren globalen Temperatur an der Erdoberfläche, beträgt der Carnot-Wirkungsgrad beispielsweise wenige Watt pro Quadratmeter für die Wind- und Wasserkraft. Mit Hilfe dieser Werte, verglichen mit real existierenden Kraftwerken, konnten Aussagen über den Flächenbedarf bei Nutzung im globalen Maßstab getroffen werden. Insbesondere die Einsicht, dass der Leistungsumsatz der Menschheit bereits nahe oder gar oberhalb der globalen Potenziale liegt, wurde als zentrales Ergebnis herausgestellt.

### 8. Differenzierte Betrachtung ausgewählter Energiequellen an Fallbeispielen:

Mit Hilfe der mittleren Leistungspotenziale ( $8 \frac{W}{m^2}$  bei der Wind- und Wasserkraft,  $1 \frac{W}{m^2}$  bei der Biomasse;  $15 - 20 \frac{W}{m^2}$  bei der Solarenergie) konnten nähere Berechnungen zur Nutzung erneuerbarer Energien bei einigen Fallbeispielen durchgeführt werden. Einige dieser Beispiele wurden in dieser Arbeit vorgestellt, wie z.B. den Flächenbedarf bei Nutzung eines Autos mit Biokraftstoff oder einen Helikopterflug über einen Windpark. Andere Beispiele zielten eher auf eine Bewertung von (geplanten) Projekten mit regenerativen Energien ab, wie z.B. die Nutzung von Photovoltaik auf sämtlichen freien Dachflächen von Gebäuden in Deutschland. Mit Hilfe dieser Betrachtungen sollte bei den Lernenden ein noch tieferes Bewusstsein für die Ressourcenbegrenztheit geschaffen werden.

### 9. Bau einer Nachführung:

Im Gegensatz zu den Grundzügen dieser Arbeit, welche hauptsächlich die physikalische Betrachtungsweise bzw. die physikalischen Potenziale untersucht, sollte zum Abschluss eine Möglichkeit einer technisch optimierten Nutzung einer Solaranlage aufgezeigt werden. Da diese Anlagen meist fest installiert sind, variiert der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen im Laufe des Tages sehr stark. Dadurch kann ein Großteil der Sonnenenergie nicht genutzt werden. Um dem entgegenzuwirken, kann die Solarzelle mit einer Nachführung ausgestattet werden, die dem Lauf der Sonne folgt und somit für einen möglichst günstigen Einfallswinkel der Sonnenstrahlen sorgt. Um das Prinzip einer solchen Nachführung zu verdeutlichen, wurde von den Lernenden ein vereinfachtes Modell gebaut.

## 6.2.3 Ergebnisse der Umfrage

Im Folgenden soll auf den in Kapitel 2.3 vorgestellten Fragebogen Bezug genommen werden. Dieser wurde bei der Deutschen Schülerakademie eingesetzt. Insgesamt haben hier 63 Schüler teilgenommen. Es wurden zwei Gruppen gebildet, eine beinhaltete die Schüler anderer Kurse der Akademie, deren Ergebnisse bereits in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Diese Gruppe kann als Kontrollgruppe angesehen werden. Die zweite Gruppe bestand nur aus den Akademieteilnehmern, die den oben beschriebenen Umweltphysik-Kurs belegt hatten.

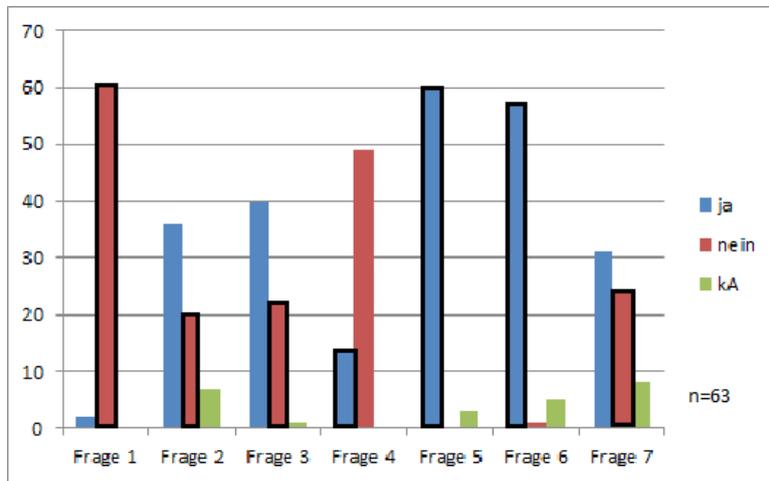


Abbildung 6.2: Ergebnisse der Kontrollgruppe (s. Kap. 2). Die korrekten Antworten sind schwarz umrandet .

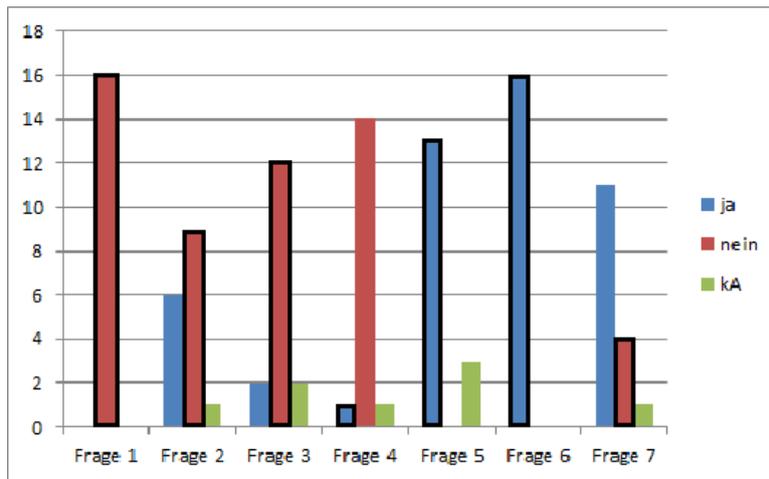


Abbildung 6.3: Ergebnisse der Teilnehmer des Umweltphysikkurses. Die korrekten Antworten sind schwarz umrandet.

Zunächst sollen die Ergebnisse des ersten Teils des Fragebogens, die Multiple-Choice-Aussagen, betrachtet werden. Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse der Kontrollgruppe erneut abgebildet.

Zunächst lässt sich erkennen, dass bei den Aussagen 1 (Radioaktive Stoffe entstehen nur in Kernkraftwerken), 4 (Das Abschmelzen des Meereises führt zu keinerlei Anstieg des Meeresspiegels), 5 (Die Atmosphäre kann Strahlung gewisser

Wellenlänge absorbieren) und 6 (Methan wird zu den Treibhausgasen gezählt) kaum Unterschiede zwischen beiden Gruppen erkennbar sind. Dies ist durchaus nicht verwunderlich, da die angeschnittenen Themen entweder nicht im Umweltphysikkurs behandelt wurden oder beispielsweise im regulären Schulunterricht behandelt werden und zum Allgemeinwissen gehören. Dadurch hatten bei diesen Aussagen alle Schüler die gleichen Voraussetzungen.

Bei den Aussagen 2 (Deutschland kann sich selbst mit regenerativen Energien versorgen), 3 (Regenerative Energien sind unbegrenzt verfügbar) und 7 (Jahreszeiten können durch die elliptische Erdbahn um die Sonne erklärt werden) sind deutlich Unterschiede erkennbar. Bei letztgenannter Aussage fällt das Ergebnis jedoch zugunsten der Kontrollgruppe aus. Bei dem Umweltphysik-Kurs hält ein Großteil der Teilnehmer die elliptische Bahn der Erde um die Sonne für die Ursache der Jahreszeiten. Ein Grund hierfür könnte sein, dass der Zusammenhang zwischen elliptischer Umlaufbahn und Strahlungseintrag im Laufe des Kurses im Rahmen der Milankovic-Zyklen hergestellt wurde. Da der Wechsel der Jahreszeiten Temperaturänderungen mit sich bringt, könnte so die vermehrt auftretende Verbindung zwischen der Erdbahn und den Jahreszeiten zustande gekommen sein. Die Ergebnisse bei den Aussagen 2 und 3, welche die Kernaussagen bzw. Kernziele des Kurses tangieren, erkennt man jedoch deutlich, dass eine Durchführung eines solchen Kurses positiven Einfluss auf das Wissen der Schüler hat. Auch wenn dies nicht weiter quantifiziert werden kann und auch die Nachhaltigkeit dieses Einflusses geprüft werden muss, lässt sich diese qualitative Aussage zunächst festhalten.

Die Ergebnisse des zweiten Teils des Fragebogens sehen bei beiden Gruppen relativ ähnlich aus. Bei den Fragen nach den Folgen globaler Erwärmung (Frage 9) und den Vor- und Nachteilen des Umstiegs von fossilen auf regenerative Energieträger (Frage 11) fällt jedoch auf, dass die Umweltphysik-Kursteilnehmer häufiger mit Spezialwissen geantwortet haben. Dies verwundert natürlich nicht, da die Schüler Kurse nach Interesse wählen und somit im Umweltkurs eher Teilnehmer sind, die in diesem Themengebiet über ein größeres Wissen verfügen. Außerdem fällt auf, dass die regenerativen Energien nicht negativ, aber dennoch kritischer gesehen werden bzw. dass eher auch Nachteile dieser Nutzung (Flächenverbrauch, der Aufwand bei der Herstellung der Kraftwerke, ...) genannt werden.

## 6.3 Erprobung am Peter-Paul-Rubens-Gymnasium Siegen

### 6.3.1 Allgemeines zu Erprobung am Peter-Paul-Rubens-Gymnasium

Die zweite Erprobung wurde am Peter-Paul-Rubens-Gymnasium in Siegen durchgeführt. Als Zielgruppe wurde ein Geographie-Kurs der Einführungsphase ausgewählt. Dieser bestand aus 24 Schülern im Alter zwischen 15 und 17 Jahren. Eine Besonderheit dieser Erprobung war, dass es sich um ein fächerverbindendes Projekt handelte. Zusammen mit einer Geographie-Kollegin wurde gemeinsam eine vollständige Unterrichtsreihe mit dem Titel: „Die regenerativen Energien auf dem Vormarsch – Eine realistische Alternative für den Energiehunger der Welt?“ unterrichtet.

### 6.3.2 Planung und Durchführung

Zunächst ist zu erwähnen, dass nicht alle der Schüler einen Oberstufenkurs in Physik besuchten. Dadurch musste teilweise erheblich differenziert werden, was die physikalischen Vorkenntnisse bzw. Denkwerkzeuge betraf. Begriffe, wie z.B. Energie und Leistung, waren häufig nur aus der Alltagssprache bekannt. Einfache Formeln, wie etwa die zur Berechnung der Leistung eines Windrads ( $P_{Windrad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{Rotor} \cdot v^3$ ), konnten zwar eingesetzt werden, eine Herleitung ging jedoch über das Verständnis der meisten Schüler hinaus. Durch die fehlenden mathematischen und physikalischen Fähigkeiten mussten daher in diesem Bereich Abstriche getätigt werden. Plausibilitätsbetrachtungen und Analogien wurden vermehrt hinzugezogen, um Sachverhalte adressatengerecht zu verdeutlichen.

Bei der Planung der Unterrichtsreihe war zu berücksichtigen, dass diese Reihe in den regulären Geographieunterricht eingebettet werden musste und demzufolge die geforderten Inhalte und Kompetenzen des Kernlehrplans Geographie zu erfüllen hatte. Die durchgeführte Reihe lässt sich dabei dem Inhaltsfeld „Raumwirksamkeit von Energieträgern und Energienutzung“ zuordnen. Einer der dortigen inhaltlichen Schwerpunkte heißt: „Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung regenerativer Energien als Beitrag eines nachhaltigen Ressourcen- und Umweltschutzes“ (s. [Min14]). Dadurch bot sich an, Teile der in dieser Arbeit entwickelten Module

gewinnbringend einzusetzen, um diese Thematik aus einem zusätzlichen Blickwinkel zu beleuchten. Man beachte, dass die für die Physik und Physikdidaktik teilweise ungewöhnliche Wahl in der Bezeichnung verschiedener Lehrmethoden aus der Geographiedidaktik entlehnt werden musste.

Die nachfolgende Tabelle gibt die detaillierte Unterrichtsreihe an. Die Studentitel beinhalten dabei sowohl den inhaltlichen Schwerpunkt als auch die angewendete Methodik. Nachfolgend werden jeweils die inhaltlichen Aspekte wiedergegeben (kursiv gedruckt).

<b>Stunde</b>	<b>Unterrichtsthema und -inhalt</b>
1./2.	<p>Das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) – regenerative Energien auf dem Vormarsch. Eine Betrachtung der Energiesituation in Deutschland mit Hilfe der Methode Diagramme auszuwerten und zu erstellen.</p> <p><i>Globales Energiepotential</i></p> <p><i>Formen der erneuerbaren Energien</i></p> <p><i>Bruttostromerzeugung in Deutschland</i></p> <p><i>Deutscher Strommix</i></p> <p><i>Begriff der physikalischen Leistung und ihrer Einheit Watt</i></p>
3./4.	<p>Energie aus der Sonne – Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten des Desertec-Projektes in der EUMENA-Region mit Hilfe einer Raumanalyse und anschließender Pro-Contra-Diskussion.</p> <p><i>Solarkonstante</i></p> <p><i>Globaler Strahlungseintrag</i></p> <p><i>Gewinnung und Nutzung von Solarenergie</i></p>
5./6.	<p>Windenergie – Klima- oder Landschaftsschutz? Möglichkeiten und Grenzen der Windenergie durch Onshore-Windkraftanlagen in Bezug auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft) mittels einer Internetrecherche.</p> <p><i>Funktionsweise von Windrädern</i></p> <p><i>Berechnung der nutzbaren Leistung</i></p>

7./8.	<p>„Unerschöpfliche Windenergie?“ – Eine Bewertung des Trianel-Offshore-Windparks „Borkum West“ mit Hilfe der geographiespezifischen Methode des Wertequadrats.</p> <p><i>Land-See-Wind</i></p> <p><i>Berechnung des Leistungspotenzials von Windenergieanlagen</i></p> <p><i>Amortisierungszeit</i></p>
9./10.	<p>Energielieferant Biomasse – Biogasproduktion als zweites Standbein für Landwirte. Eine Atlaskartenanalyse zur landwirtschaftlichen Nutzung und Eignung von Biogasanlagen unter Einführung der Methode „Wo ist was möglich?“.</p> <p><i>Bewertung des Energieträgers im Hinblick auf nachhaltiges Wirtschaften</i></p> <p><i>Biomassenkonstante</i></p>
11./12.	<p>Erdwärme – Nutzung geothermischer Energie auf Island. Eine Analyse der räumlichen Strukturen, Beziehungen und Veränderungen sowie der Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung in Form einer arbeitsteiligen Gruppenarbeit.</p> <p><i>Standortvoraussetzungen</i></p> <p><i>Möglichkeit und Grenzen der Nutzung</i></p>
13./14.	<p>Energieeffizienz – wie ist ein nachhaltiger Ressourcen- und Umweltschutz möglich? Bearbeitung und Diskussion des Energiesparens vom Haushalt bis zur Automobilbranche mit Hilfe der „World-Café-Methode“.</p> <p><i>„Smart Mobility“ und „Smart Grid“</i></p> <p><i>Einsparungen im Haushalt</i></p>
15.	<p>Kann der Energiehunger in Deutschland mit regenerativen Energien gestillt werden? Abschließende Diskussion über die Nutzung fossiler und erneuerbarer Energien in Deutschland in Form einer Fishbowl-Diskussion.</p>

**Tabelle 6.1: Detaillierte Struktur der Unterrichtsreihe „Die regenerativen Energien auf dem Vormarsch – Eine realistische Alternative für den Energiehunger der Welt?“**

## 6.4 Reflexion der Erprobungen

Generell lässt sich festhalten, dass die Ziele, die für die Erprobung gesteckt wurden, erreicht wurden. Bei den meisten Schülern wurde das Reflexionsvermögen in diesem Themengebiet erweitert, sie waren vermehrt in der Lage kritisch zu hinterfragen und sich ein eigenes Bild zu schaffen. Dies wurde auch bei solchen Schülern erreicht, welche mit der Mathematik und Physik, die während den Erprobungen benötigt wurde, Schwierigkeiten hatten.

Das angestrebte Leistungsniveau dieses Kurses entsprach im Wesentlichen dem Leistungsvermögen der Teilnehmer. An ein paar wenigen Stellen (beispielsweise der Berechnung der Strahlungsantriebe der Milankovic-Zyklen, speziell wenn Differenzial- oder die Integralrechnung benötigt wurde) waren die benötigten Denkwerkzeuge für die meisten Schüler überfordernd. Daher wurde in der Endfassung dieser Arbeit das mathematische Niveau etwas gesenkt, damit zumindest Plausibilitätsbetrachtungen gemacht werden können. So konnte die Grundbotschaft dieser Arbeit jeden Schüler erreichen.

Da die Thermodynamik in den Lehrplänen der meisten Bundesländer rar geworden ist oder nur ein Wahlpflichtmodul ist, wurden einige Gesetze in den Lernmodulen lediglich aufgestellt oder erklärt. Daher wurden in den Vorüberlegungen Herleitungen zum tieferen Verständnisses für die Lehrer und auch entsprechend interessierte Schüler platziert (s. z.B. Herleitung des Carnot-Limits).

Im Vergleich zur Erprobung in der Schülerakademie wurde an der Reihenfolge der Module wenig geändert. Es stellte sich heraus, dass die beschriebene Abfolge sinnvoll für die Schüler ist. Dennoch wurden einige wenige Änderungen vollzogen:

- Es musste ein größeres Augenmerk auf den Wachstumsgedanken gelegt werden, so dass besser verdeutlicht werden konnte, dass unabhängig von den genutzten Energieträgern in relativ kurzen Zeiträumen planetare Wachstumsgrenzen erreicht werden.
- Die nutzbare Sonnenenergie, welche während der Schülerakademie relativ zeitig behandelt wurde, sollte hier später, zusammen mit den anderen Energieträgern, behandelt werden. Die Solarkonstante selbst wird zwar schon im ersten Lernmodul eingeführt, wohingegen hier keinerlei technische Nutzung oder der Zusammenhang mit anderen Energieträgern behandelt wird.

Die Größe der Solarkonstanten ist an dieser Stelle jedoch essenziell, um die planetaren Wachstumsgrenzen zu ermitteln.

- Der Vergleich von den mit den Modellen berechneten Flächenpotenzialen mit real existierenden Kraftwerken wurde in dieser Arbeit unmittelbar vorgenommen. Es hat sich während der Erprobungen gezeigt, dass eine zeitliche Trennung (zuerst alle Flächenpotenziale zu berechnen, danach den Vergleich mit Realwerten anzustreben) nicht sinnvoll ist. So können die Schüler direkt den Bezug des abstrakten Modells zur Lebenswelt nachvollziehen und sich plausibel machen.

Speziell die zweite Erprobung hat gezeigt, dass auch Schüler mit wenig Vorkenntnissen und Fähigkeiten im Bereich der Mathematik und Physik in der Lage sind, die in diesem Kurs gesteckten Ziele zu erreichen. Dies kann man insbesondere an den zwei Tatsachen festmachen, dass erstens fast alle Lernenden den überproportional großen Flächenbedarf regenerativer Energien nachvollziehen konnten und zweitens die Dynamik exponentieller Wachstumsprozesse von den Lernenden verinnerlicht wurde, wie anhand der Abschlussdiskussion eindeutig festzustellen war.

Es bleibt darüber hinaus festzuhalten, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Lernmodule in Teilen prinzipiell auch in niedrigeren Klassenstufen oder in schwächeren Oberstufenkursen unterrichtet werden könnten. Ebenso hat sich ergeben, dass die Thematik der regenerativen Energien für einen fächerverbindenden oder fächerübergreifenden Unterricht geeignet ist.

# Kapitel 7

## Ergebnisse und Thesen

Die Resultate dieser Arbeit sollen nun als Antworten der im ersten Kapitel aufgestellten Forschungsfragen zusammenfassend vorgestellt werden.

### **Welche realistischen und unrealistischen Vorstellungen zur Energiewende haben Lernende?**

In Kapitel 2 wurden durch den Fragebogen teilweise eklatante Fehlvorstellungen oder Wissenslücken bei Schülern, aber auch bei Lehramtsstudenten erkannt. Zentrale und grundlegende Begriffe der Energiewende und des Klimaschutzes oder die Potenziale der verschiedenen Energieträger sind von dieser Feststellung genauso betroffen, wie auch Folgen eines Klimawandels auf der Erde. Die Vorstellungen bzw. das Vorwissen der Befragten stammen zumeist aus den Medien (speziell aus dem Fernsehen) sowie einer oberflächlichen Behandlung in der Schule. Daraus folgt:

#### **These 1:**

Die fachlichen Grundlagen sowohl für die Notwendigkeit als auch für die Risiken einer Energiewende sind offensichtlich auch bei Lernenden höherer Klassenstufen im Bereich der Abiturbildung und bei Lehramtsstudenten als nicht hinreichend einzuschätzen. Sie genügen nicht, um einer essenziellen und fruchtbringenden gesellschaftlichen Diskussion gewachsen zu sein.

---

**Welche Möglichkeiten gibt es aus Sicht der Schulbücher und Kernlehrpläne die Energiewende im Rahmen des Physikunterrichts zu behandeln?**

Es wurde gezeigt, dass - durch den Kernlehrplan legitimiert – durchaus umweltphysikalische Themen behandelt werden können bzw. sollen. Auch wenn der Schwerpunkt der Lehrpläne auf technischen Zusammenhängen liegt, sind diese dennoch offen genug gestaltet, so dass wesentliche Aspekte, wie etwa die Umwandlungsketten regenerativer Energien und deren Potenziale, behandelt werden können. Daraus resultiert ein zentrales Orientierungswissen, welches notwendig ist, um langfristige Folgen des immer weiter ansteigenden Leistungsumsatzes der Menschheit realistisch einschätzen zu können.

Die Untersuchung der Schulbücher in Kapitel 2 hat ebenso gezeigt, dass zwar Bezüge zur Umweltphysik vorhanden sind, diese aber eher selten auftreten und noch weniger Bezüge zur Energiedebatte haben. Für die Energiediskussion grundlegende Begriffe, wie beispielsweise Wärmekraftmaschine oder Strahlungsgleichgewicht, werden aufgrund der fehlenden Thermodynamik nicht mehr behandelt.

**These 2:**

Durch Unterlassung der fachsystematischen Behandlung thermodynamischer Zusammenhänge im Physikunterricht wird Lernenden eine wesentliche Grundlage zum Verständnis von energetischen Prozessen in der Gesellschaft entzogen. Dadurch konzentriert sich die Diskussion der regenerativen Energien lediglich auf technische Details und kann nicht hinreichend einen Gesamtzusammenhang zwischen energetischem Bedarf, physikalischer und geophysikalischer Machbarkeit, den Ressourcen der Geosysteme und der Notwendigkeit zur Änderung menschlichen Verhaltens herstellen.

**Welche elementaren Ansätze sind besonders geeignet um die Zusammenhänge zwischen „Energiekonsum“ und Energiebereitstellung und die Auswirkungen auf die Umwelt zu verdeutlichen?**

Um die Zusammenhänge zwischen der Energiebereitstellung und den Auswirkungen auf die Umwelt verdeutlichen zu können, ist der Begriff des Strahlungsantriebes von zentraler Bedeutung (s. Kapitel 4). Dieser stellt eine Verbindung zwischen

einem zusätzlichen Strahlungseintrag auf der Erde – sei es in Form einer Änderung der Solarkonstante oder durch Nutzung fossiler Brennstoffe – und einer Temperaturänderung her. Auch wenn dieser Zusammenhang keine Rückkopplungseffekte berücksichtigt und man nicht auf konkrete Folgen schließen kann, so können beispielsweise nicht-anthropogene Strahlungsantriebe, wie z.B. die Milankovic-Zyklen, ein warnendes Beispiel sein.

Ein zweiter Ansatz ist der Flächenbedarf bzw. die Flächenleistung. Da fossile Brennstoffe nur noch zeitlich begrenzt verfügbar sind, gelten die regenerativen Energien momentan als einzige Alternative. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass die Nutzung dieser – und zwar alle Formen einschließend – mit einem enormen Flächenbedarf einhergeht. Die jeweiligen Flächenleistungen betragen dabei nur wenige Watt pro Quadratmeter, bei Wind und Wasser etwa  $8W/m^2$  bei großzügigen Abschätzungen, bei Bioenergie weniger als 1 Watt pro Quadratmeter. Die Solarenergie bietet dabei noch das größte Potenzial. Eine Deckung des aktuellen Leistungsumsatzes der Menschheit nur durch erneuerbare Energieträger wäre nicht möglich, da sonst ein Großteil der Oberfläche der Erde benötigt werden würde. Diese stünde dann anderen zivilisatorischen Bedürfnissen, wie dem Nahrungsanbau oder als Siedlungsfläche, nicht mehr zur Verfügung.

### **These 3:**

Um die Auswirkungen des zivilisatorischen Energiehungers für Lernende verständlich zu machen, bieten sich vor allem zwei Grundlegende Begriffe an. Der Strahlungsantrieb – übrigens auch der Schlüsselbegriff für den Weltklimarat – charakterisiert anthropogene Einflüsse auf die mittlere Temperatur der Erde. Damit ist er wesentlich für die Beschreibung fossiler Energienutzung. Bislang kaum beachtet, aber dennoch fundamental ist der Begriff der Flächenleistung pro Quadratmeter. Er ermöglicht einfache Abschätzungen zu den Reichweiten regenerativer Energiebereitstellung und verdeutlicht, dass auch die regenerative Energie nicht unbegrenzt nutzbar ist und insbesondere nicht den Wunsch erfüllen kann, der Menschheit eine Umstellung im „Konsumverhalten“ von Energie zu ersparen.

---

**Wie kann verdeutlicht werden, dass das bisherige Wachstum im Leistungsumsatz der Menschheit nicht durch Einsatz regenerativer Energien oder durch Nutzung von Kernkraft aufrechterhalten werden kann?**

In Kapitel 3 wurde zunächst gezeigt, dass das Wachstum im Leistungsumsatz der Menschheit durch eine exponentielle Funktion genähert werden kann. Dies ermöglicht sowohl eine rechnerische, als auch eine durch verschiedene anschauliche Beispiele begreifbare Möglichkeit, um aufzuzeigen, dass jedwede Schranke schon in relativ kurzen Zeiträumen überschritten wird. Eben diese planetaren Schranken stellen absolute obere Limits für das zivilisatorische Wachstum im Energieumsatz der Menschheit dar. Diese können weder durch immer effizientere Umwandlungsprozesse, noch durch neue Technologien umgangen werden. Dieses Ergebnis ist unabhängig von den genutzten Energiequellen oder –trägern. Es spielt hierbei also keine Rolle, ob Kernenergie oder regenerative Energien genutzt werden.

**These 4:**

Die Untersuchung des Wachstums im Leistungsumsatz der Menschheit mit Hilfe der Exponentialfunktion bietet eine effektive Möglichkeit, um einerseits aufzuzeigen, dass überhaupt planetare Grenzen existieren und andererseits um diese näherungsweise abzuschätzen. Die Verdeutlichung der kleinen Zeiträume bis zur Überschreitung dieser Limits und der Unabhängigkeit von den genutzten Energieträgern zeigt die Notwendigkeit zur Veränderung im energetischen Konsumverhalten der Menschen auf.

**Welche Handlungsmöglichkeiten bieten sich für Menschen in der jetzigen Gesellschaft?**

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass der Leistungsumsatz der Menschheit schon eine solche Größenordnung erreicht hat, die teilweise den Potenzialen entspricht, welche vergleichbar sind mit Leistungsumsätzen in verschiedenen Geosystemen der Erde. Auch durch zusätzliche Energiezufuhr durch deponierte Energieträger, sei es durch fossile oder Kernbrennstoffe, stößt die Menschheit zwangsläufig an planetare Wachstumsgrenzen. Dies heißt im Umkehrschluss einerseits, dass die Tragfähigkeit für Menschen auf der Erde begrenzt ist, andererseits ist es nicht

möglich den Leistungsumsatz eines jeden Menschen auf der Erde auf das Niveau der westlichen Industrienationen anzuheben. Das jetzige wirtschaftliche und auch das persönliche Konsumverhalten der Menschheit müssen dauerhaft in Einklang mit natürlichen Gleichgewichtsbedingungen stehen. Der beste Antrieb zu einer solchen Veränderung ist die eigene Einsicht, das Eigeninteresse und die Vernunft. Damit ergeben sich vielfältige Handlungsoptionen für einen zukunftsgerichteten Physikunterricht.

**These 5:**

Die einzige Möglichkeit für dauerhafte zivilisatorische Strukturen besteht darin, diese dauerhaft in einen Einklang mit den natürlichen Gleichgewichtsbedingungen zu stellen. Dabei ist es erforderlich, dass die Menschen – im Idealfall von der eigenen Einsicht und Vernunft geleitet – ihren gesellschaftlichen und persönlichen Leistungsumsatz diesem übergeordneten Ziel anpassen.

# Anhang A

## A.1 Erstellung von Zufallspunkten mit exponentiellem Wachstum mit Hilfe von Geogebra

Geogebra ist eine kostenlose, frei verfügbare Software, die in vielen Schulen standardmäßig genutzt wird. Dieses vielseitige Programm kann unter anderem eingesetzt werden, um geometrische Objekte zu erstellen. Um Zufallspunkte erzeugen zu lassen, deren Anzahl mit jedem Schritt exponentiell zunimmt, kann folgende Anleitung genutzt werden.

1. Man erstellt zunächst eine Liste mit folgender Eingabe in das entsprechende Eingabefenster:

*Folge*((Zufallszahl(0, 5000)/1000, Zufallszahl(0, 5000) / 1000), i, 0,  $2^n - 1$ )

Mit dem Befehl *Folge* wird eine solche erstellt, die Eingabe (*Zufallszahl*(0, 5000) / 1000, *Zufallszahl*(0, 5000) / 1000) kreiert einen Vektor, dessen Koordinaten zwischen 0 und 5 (mit drei Nachkommastellen) variieren. *i* gibt den Laufindex an, 0 den Startwert bzw. das erste Folgeglied  $a_1$ . Der letzte Eintrag  $2^n - 1$  legt die Anzahl der zu erstellenden Punkte fest.

2. Nach Eingabe der Liste erscheint ein Fenster, in welchem gefragt wird, ob ein Schieberegler erstellt werden soll, um die Anzahl der Punkte festzulegen. Dieses kann man bejahen oder manuell einen Regler über den Reiter *Schieberegler* und Linksklick an eine freie Stelle im Koordinatensystem erstellen. In *Eigenschaften* (Rechtsklick auf den Regler) müssen die Bedingungen für  $n$  festgelegt werden (Intervall, Geschwindigkeit und Name). Bewegt man nun den Schieberegler manuell oder lässt ihn automatisch laufen, so erhöht sich die Anzahl der Punkte im erstellten Quadrat.

3. Will man zusätzlich die Anzahl der Punkte anzeigen lassen, so kann man ein Textfeld erstellen (ebenfalls unter dem Reiter *Schieberegler*) und den gewünschten Text eingeben. Die Ausgabe wird mit dem zuvor erstellten Regler verknüpft, in dem unter *Eigenschaften* die Bedingung  $2^n$  eingegeben wird. Steht der Schieberegler beispielsweise auf  $n=2$ , so wird die Zahl 4 ausgegeben.
  
4. Da die Punkte in einem abgeschlossenen Kasten bzw. Viereck erscheinen sollen, muss ein solcher virtuell erstellt werden. Dazu wählt man in dem „Reiter“ die *Option Punkt* aus. Anschließend setzt man vier Eckpunkte in das Koordinatensystem:  $A(0|0)$ ,  $B(0|5)$ ,  $C(5|5)$  und  $D(5|0)$ . Diese Punkte verbindet man mit Strecken, sodass ein Quadrat entsteht (*Strecke* unter dem Reiter *Gerade*). Die Eckpunkte des virtuellen Quadrates können anschließend unsichtbar gemacht werden (Rechtsklick auf den entsprechenden Punkt und Linksklick auf *Objekt anzeigen*).  
Das erstellte Vieleck kann aus optischen Gründen noch unter *Eigenschaften* mit einer Hintergrundfarbe versehen werden.

Auch wenn die Punkte zufallsbasiert und damit beim nächst größeren  $n$  wieder neu berechnet werden bzw. an anderen Positionen erscheinen, lässt sich das exponentielle Wachstum mit diesem Tool sehr gut veranschaulichen.

Bei der Anwendung ist es allerdings nicht ratsam, die Anzahl der Punkte für zu große  $n$  berechnen zu lassen. Bei  $n=12$  müssen beispielsweise 4096 Punkte abgebildet werden, bei  $n=14$  sind es schon 16384. In diesen Bereichen erscheinen schon die ersten Schwierigkeiten in der Darstellung. Es ist daher ratsam das Intervall maximal bis 13 oder 14 (je nach Leistungsstärke des Computers) zu wählen.

## A.2 Lösungen der Aufgaben

### Kapitel 3 – Wachstum

1. (a) Um die effektive Wachstumsrate zu erhalten, kann ein fiktiver Wert für den pro-Kopf-Leistungsumsatz  $P$  dienlich sein. Der Leistungsumsatz nach einem Jahr für die gesamte Menschheit berechnet sich zu:

$$P_{Gesamt} = 7 \cdot 10^9 \cdot P \cdot 1,02 + 1 \cdot 10^9 \cdot P. \quad (\text{A.1})$$

Um wiederum auf den mittleren Leistungsumsatz pro Kopf zu gelangen, muss durch die Anzahl der Menschen dividiert werden:

$$\frac{7 \cdot 10^9 \cdot P \cdot 1,02 + 1 \cdot 10^9 \cdot P}{8 \cdot 10^9} = 1,0175 \cdot P. \quad (\text{A.2})$$

Im Mittel erhöht sich also die umgesetzte Leistung um 1,75%.

- (b) Für das Wachstum gilt folgender funktionaler Zusammenhang:

$$P_{Aktuell} \cdot (1 + p)^t = P_{Zukunft}. \quad (\text{A.3})$$

Damit ergibt sich für die Zeit:

$$t = \frac{\ln(P_{Zukunft}) - \ln(P_{Aktuell})}{\ln(1 + p)} = \frac{\ln(5000) - \ln(2100)}{\ln(1 + p)} \approx 50a. \quad (\text{A.4})$$

Für eine Steigerung auf amerikanisches Niveau ergibt sich analog eine Zeit von etwa 90 Jahren.

Eine solche Anpassung wäre nicht sinnvoll. Einerseits spricht der enorme Energiebedarf dagegen – eine Versorgung von 8 Milliarden Menschen mit jeweiligem Leistungsbedarf von 10 000 Watt würde einem Gesamtbetrag von  $8 \cdot 10^{13}$  Watt entsprechen. Ob es allen Menschen bei einem solchen Leistungsumsatz entsprechend besser geht als mit dem jetzigen Umsatz ist fraglich. Eine Versorgung solcher Bedürfnisse würde jetzige Probleme in der Energiebereitstellung enorm verstärken.

2. Bei der Gezeitenenergie wird die Rotationsenergie der Erde umgesetzt. Man kann die Erde für unsere Zwecke durch eine homogene, starre Kugel nähern. Damit ergibt sich für die Rotationsenergie der Erde:

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} \cdot M \cdot R^2 \cdot \omega^2 = 2,6 \cdot 10^{29} J \quad (\text{A.5})$$

mit der Erdmasse  $M = 6 \cdot 10^{24} kg$ , dem Erdradius  $R = 6,4 \cdot 10^6 m$  und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{86400s} \approx 7,27 \cdot 10^{-5} \frac{1}{s}$ .

Das Energiewachstum kann durch die nachfolgende Exponentialfunktion genähert werden:

$$E = 5,0 \cdot 10^{20} J \cdot (1 + p)^t. \quad (\text{A.6})$$

Der Vorfaktor  $5,0 \cdot 10^{20} J$  ergibt sich aus dem gegenwärtigen Leistungsumsatz von  $1,6 \cdot 10^{13} W$ . Für  $p$  kann das jeweilige Wachstum eingesetzt werden.

Aus der Fragestellung ergibt sich folgende Gleichung:

$$5,0 \cdot 10^{20} J \cdot (1 + p)^t = 2,6 \cdot 10^{29} J \quad (\text{A.7})$$

$$\Leftrightarrow (1 + p)^t = 5,2 \cdot 10^8 \quad (\text{A.8})$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{\ln(5,2 \cdot 10^8)}{\ln(1 + p)} \quad (\text{A.9})$$

Daraus ergibt sich, dass bei einem Wachstum von 2% pro Jahr das Energie-limit in etwa 1013 Jahren erreicht werden müsste, bei 4% Wachstum bereits nach rund 512 Jahren.

3. (a) Analog zur Herleitung der „heimischen“ Solarkonstante ergibt sich die Formel:

$$s = \frac{L_{Rigel}}{4\pi \cdot r^2} \quad (\text{A.10})$$

Für die Leuchtkraft von Rigel A erhält man:

$$L_{Rigel} = 40000 \cdot L_{Sonne} = 40000 \cdot 3,8 \cdot 10^{26} W = 1,52 \cdot 10^{31} W \quad (\text{A.11})$$

Damit ergibt sich für die Solarkonstante für Rigel A:

$$s = \frac{L_{Rigel}}{4\pi \cdot r^2} = \frac{1,52 \cdot 10^{31} W}{4\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{11} m)^2} = 5,38 \cdot 10^7 \frac{W}{m^2} \quad (\text{A.12})$$

- (b) Wir können die bereits in Kapitel 3 hergeleitete Formel zur Berechnung nehmen:

$$P_{Menschheit} \cdot 1,04^t = L_{Rigel}. \quad (\text{A.13})$$

Daraus ergibt sich für die Zeit, nach der der Leistungsumsatz der Menschheit die Leuchtkraft von Rigel A erreicht hat:

$$t = \frac{\ln(L_{Rigel}) - \ln(P_{Menschheit})}{\ln(1,04)} \approx 1055a \quad (\text{A.14})$$

Zum Vergleich: Bei der Sonne betrug dieser Wert 785 Jahre, nur rund 270 Jahre weniger als bei einem der hellsten Sterne am Nachthimmel.

4. (a) Die Leistung, die von der Sonne auf die Querschnittsfläche der Erde gelangt, ergibt sich zu:

$$P_{\text{Querschnitt}} = \frac{L}{4\pi \cdot R^2} \cdot A_{\text{Querschnitt}} \cdot (1 - A) \quad (\text{A.15})$$

$$= \frac{L}{4\pi \cdot R^2} \cdot \pi r_{\text{Erde}}^2 \cdot (1 - A) \quad (\text{A.16})$$

$$= 1,2 \cdot 10^{17} \text{W}. \quad (\text{A.17})$$

$R$  gibt dabei den Radius der Erdbahn um die Sonne an,  $A$  die mittlere Albedo der Erde.

In drei Stunden gelangen somit  $1,3 \cdot 10^{21} \text{J}$  auf die Erde.

Um zu berechnen, nach welcher Zeit die Menschheit die gleiche Energiemenge umgesetzt hat, muss dies mit dem Leistungsumsatz verglichen werden:

$$E = P_{\text{Menschheit}} \cdot t \quad (\text{A.18})$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{E}{P_{\text{Menschheit}}} = \frac{1,3 \cdot 10^{21} \text{J}}{1,6 \cdot 10^{13} \text{W}} \quad (\text{A.19})$$

$$= 8,13 \cdot 10^7 \text{s} \approx 940 \text{d} \approx 2,6a \quad (\text{A.20})$$

- (b) Mit Hilfe der Verdopplungszeit, ergibt sich das Ergebnis der Fragestellung:

$$t_{\text{Verdopplungszeit}} \approx \frac{70}{p [\text{in } \%]} \quad (\text{A.21})$$

Für ein Wachstum von 2% ergibt sich somit eine Verdopplungszeit von 35 Jahren, bei 4% Wachstum entsprechend 17,5 Jahre.

## Kapitel 4 – Strahlungsantrieb und Gleichgewichtstemperatur

1. Man benötigt die Leistung, die von der Sonne auf die Querschnittsfläche des Mars gelangt. Diese ergibt sich zu:

$$P_{\text{Querschnitt}} = \frac{L}{4\pi \cdot R_{\text{Marsbahn}}^2} \cdot A_{\text{Querschnitt}} \cdot (1 - A) \quad (\text{A.22})$$

$$= \frac{L}{4\pi \cdot R_{\text{Marsbahn}}^2} \cdot \pi r_{\text{Mars}}^2 \cdot (1 - A). \quad (\text{A.23})$$

Die sphärische Albedo des Mars beträgt etwa 0,25.

Die absorbierte Leistung wird nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz über die gesamte Marsoberfläche abgestrahlt (der Mars wird hierfür als schwarzer Strahler genähert). Damit ergibt sich die Gleichung:

$$\frac{L}{4\pi \cdot R_{\text{Marsbahn}}^2} \cdot \pi r_{\text{Mars}}^2 \cdot (1 - A) = \sigma \cdot T^4 \cdot 4\pi r_{\text{Mars}}^2. \quad (\text{A.24})$$

Elementare Umformungen ergeben:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\frac{L}{4\pi \cdot R_{\text{Marsbahn}}^2} \cdot (1 - A)}{4\sigma}} \quad (\text{A.25})$$

$$= \sqrt[4]{\frac{\frac{3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi \cdot (2,28 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} \cdot (1 - 0,25)}{4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}^4}}} \quad (\text{A.26})$$

$$\approx 209,4 \text{ K} \quad (\text{A.27})$$

Dies entspricht einer Temperatur von etwa  $-64^\circ\text{C}$ . Die Literatur gibt an dieser Stelle einen mittleren Wert von etwa 218 Kelvin bzw.  $-55$  Grad Celsius an.

2. (a) Analog zur Berechnung der mittleren Temperatur der Erde (ohne Atmosphäre) in Kapitel 4 ergibt sich:

$$\frac{L}{4\pi \cdot R_{\text{Erdbahn}}^2} \cdot \pi r_{\text{Mond}}^2 \cdot (1 - A) = \sigma \cdot T^4 \cdot 4\pi r_{\text{Mond}}^2 \quad (\text{A.28})$$

und damit:

$$T = \sqrt[4]{\frac{s \cdot (1 - A_{\text{Mond}})}{4\sigma}} = 270 \text{ K} \approx -3^\circ\text{C}. \quad (\text{A.29})$$

Aufgrund des in etwa gleichen Abstands zur Sonne, kann die Solar-konstante der Erde genutzt werden.

Die mittlere Temperatur würde  $-3^\circ\text{C}$  betragen. Allerdings ergibt das Konzept der mittleren Temperatur für den Mond kaum einen Sinn, da es keine nennenswerten Wärmeaustauschprozesse zwischen den Hemisphären gibt.

- (b) Wie soeben festgestellt, lässt sich sinnvoll nur eine lokale Temperatur definieren. Steht die Sonne im Zenit, dann ist die Empfangsfläche gleich der Abstrahlungsfläche.

Passt man das Modell so an, so lässt sich leicht erkennen, dass sich die resultierende Temperatur aus folgendem Term ergibt:

$$T = \sqrt[4]{\frac{s \cdot (1 - A_{\text{Mond}})}{\sigma}} = 380\text{K} \approx 110^\circ\text{C}. \quad (\text{A.30})$$

Die Literatur gibt einen Wert von etwa  $130^\circ\text{C}$  für den betrachteten Fall an. Die Anpassung des Modells scheint daher recht plausibel zu sein.

3. Analog kann auch hier die mittlere Temperatur berechnet werden. Der Merkur umkreist im Abstand von etwa  $5,8 \cdot 10^{10}\text{m}$  die Sonne. Damit ergibt sich eine Solarkonstante für den Merkur von:

$$s_{\text{Merkur}} = \frac{L}{4\pi \cdot R_{\text{Merkurbahn}}^2} \approx 8989 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (\text{A.31})$$

Daraus ergibt sich für die mittlere Temperatur:

$$T = \sqrt[4]{\frac{s_{\text{Merkur}} \cdot (1 - A_{\text{Merkur}})}{\sigma}} \approx 613\text{K} \approx 440^\circ\text{C}. \quad (\text{A.32})$$

Wie beim Mond findet man zwar Mittelwerte, physikalisch sinnvoll ist das Modell an dieser Stelle jedoch nur für die Temperatur der Tagseite.

4. (a) Für die Solarkonstante erhält man mit den passenden Werten:

$$s_{\text{Zweite Erde}} = \frac{L_{\text{Gliese 581}}}{4\pi \cdot R_{\text{Zweite Erde-Bahn}}^2} \quad (\text{A.33})$$

$$= \frac{\frac{1}{50} \cdot 3,8 \cdot 10^{26}\text{W}}{4\pi \cdot (1,1 \cdot 10^{10}\text{m})^2} \quad (\text{A.34})$$

$$\approx 4998 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (\text{A.35})$$

Damit erhält man für die mittlere Temperatur:

$$T = \sqrt[4]{\frac{s_{\text{Zweite Erde}}}{4\sigma}} \approx 385\text{K} \approx 112^\circ\text{C}. \quad (\text{A.36})$$

- (b) Die in (a) berechnete Temperatur ist natürlich lebensfeindlich. Um eine Albedo zu berechnen, bei der die Temperatur niedrig genug ist, kann man folgende Gleichung verwenden:

$$s_{\text{Zweite Erde}} \cdot (1 - A) = 4\sigma \cdot T^4 \quad (\text{A.37})$$

bzw.

$$\Leftrightarrow A = 1 - \frac{4\sigma \cdot T^4}{s_{\text{Zweite Erde}}} \quad (\text{A.38})$$

$$\approx 1 - 0,44 = 0,56 \quad (\text{A.39})$$

Das Reflexionsvermögen des Planeten müsste ca. 56% betragen, um eine mittlere Temperatur von  $40^\circ\text{C}$  zu erreichen.

- (c) Es verringert bzw. erhöht sich die Solarkonstante des Sterns auf diesem Planeten auf:

$$s_{\text{Zweite Erde}; \min} = 3749 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{bzw.} \quad s_{\text{Zweite Erde}; \max} = 6248 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}.$$

Damit ergeben sich für die Temperaturen (zunächst ohne Albedo):

$$T_{\min} = 357\text{K} \quad \text{bzw.} \quad T_{\max} = 407\text{K}.$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Albedo von 56%, so ergeben sich für die Temperaturen folgende Werte:

$$T_{\min} = 292\text{K} \quad \text{bzw.} \quad T_{\max} = 332\text{K}.$$

- (d) Würde man rein die mittleren Temperaturen auf dem Planeten betrachten, so wäre es durchaus denkbar, dass Leben möglich ist. Die Temperaturen liegen in dem Bereich, in dem Wasser in flüssiger Form vorliegt. Der Planet befindet sich in der sogenannten habitablen Zone. Allerdings liegt der Planet so dicht an dem Zentralgestirn, dass durchaus eine gebundene Rotation vorliegen kann. Dadurch sind der Umlauf um Gliese 581 und die Rotation des Planeten synchron, was gleichbedeutend damit ist, dass lediglich eine Planetenseite vom Stern

angestrahlt wird, die andere niemals. Ein solche gebundene Rotation lässt sich beispielsweise bei der Erde und dem Mond beobachten: von der Erde aus können wir immer nur die gleiche Seite des Mondes erblicken. Für die Entwicklung von Leben hätte eine solche gebundene Rotation erhebliche Auswirkungen. Heftige Stürme aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zwischen Tag- und Nachtseite wären nur eine davon, welche die Entwicklung von Leben erschweren würde.

## Kapitel 5 – Energieströme

1. Der Primärenergiebedarf der Menschheit beträgt zurzeit etwa  $1,6 \cdot 10^{13}$  Watt. Für eine Versorgung über drei Wochen hinweg müsste eine Energiemenge von

$$E = P \cdot t = 1,6 \cdot 10^{13} \text{W} \cdot (3 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{s}) = 2,9 \cdot 10^{19} \text{J} \quad (\text{A.40})$$

bereitgestellt werden.

Bei der Nutzung von Wasserstoff findet in der Brennstoffzelle eine sogenannte Knallgasreaktion statt. Hierbei verbinden sich zwei Wasserstoffmoleküle mit einem Sauerstoffmolekül zu zwei Wassermolekülen. Dabei werden pro Mol Wasserstoff 242 kJ an Energie freigesetzt:



Um die oben berechnete Energie aufzubringen, müssten somit  $1,2 \cdot 10^{14}$  Mol bzw.  $2,4 \cdot 10^{11}$  kg an molekularem Wasserstoffgas zur Reaktion gebracht werden. Dies wären rund  $3 \cdot 10^{12} \text{m}^3$  Wasserstoffgas unter Normalbedingungen.

Zur Veranschaulichung hierzu folgende Vergleiche:

Das soeben berechnete Volumen entspricht etwa dem Zehntausendfachen des in der Bleilochtsperre gespeicherten Wasservolumens (der größte Stausee Deutschlands). Damit wird deutlich: Diese Wasserstoffmenge müsste stark komprimiert werden. Deshalb ein weiteres Beispiel zur Veranschaulichung:

In einem Auto, welches mit Wasserstoff betrieben wird, beträgt das Fassungsvermögen des Tanks etwa 5,6 kg (dies entspricht ca. 62000 Litern des

Gases bei Normaldruck, s. [Ank]). Um also den gesamten Energiebedarf der Menschheit mit Wasserstoff abdecken zu können, würden  $4,3 \cdot 10^{13}$  solcher Tanks benötigt werden.

2. Der Primärenergiebedarf von Nordrhein-Westfalen lag im Jahr 2014 bei 1188,4 Milliarden Kilowattstunden bzw. etwa  $1,2 \cdot 10^{12} kWh$ . Dies entspricht einem Energieumsatz von  $4,3 \cdot 10^{18} J$  (s. [Fö]). Dies korrespondiert in etwa mit dem Energiegehalt von  $1,5 \cdot 10^{11} kg$  Steinkohle (als Umrechnungsfaktor wurde die Steinkohleeinheit genutzt,  $1 SKE = 29,307 \cdot 10^6 J$ ). Bei einer Dichte von etwa 1,3 Gramm pro Kubikzentimeter bzw. 1,3 Tonnen pro Kubikmeter ergibt dies ein Volumen von:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1,5 \cdot 10^{11} kg}{1300 \frac{kg}{m^3}} = 1,1 \cdot 10^8 m^3. \quad (A.42)$$

Ein typischer Schüttgutwagon zum Transport von Kohle hat ein Fassungsvermögen von ca. 85 Kubikmeter. Für den Transport der gesamten Kohle würden somit  $1,3 \cdot 10^6$  Wagen mit einer Länge von 13,5 Metern (Schüttgutwagen Typ „Falns“, s. [VTG]) benötigt werden. Dies ergibt eine Gesamtlänge des Güterzuges von etwa 17 835 km. Jeden Tag müsste also im Mittel ein knapp 49 Kilometer langer Güterzug mit Steinkohle nach NRW gefahren werden, um den Primärenergiebedarf des Bundeslandes zu decken. In Wirklichkeit wurden zu früheren Zeiten deutlich mehr Kohlewagons benötigt, da die Wirkungsgrade für Folgeprozesse heute höher sind als in der Vergangenheit.

3. Es lässt sich beim Stromverbrauch der typische Wochenverlauf erkennen. An Werktagen ist der Verbrauch deutlich höher als an den Wochenenden. Bei der Stromerzeugung gibt es große Unterschiede zwischen den Energieträgern. Bioenergie und die Wasserkraft sind relativ konstant, Sonnenenergie und Windkraft sehr wechselhaft. Die Werte schwanken zwischen sehr hohen Werten, so dass fast der Stromverbrauch gedeckt werden kann (s. beispielsweise 13.09.), und sehr niedrigen (s. beispielsweise 23.09.). Dadurch muss fast der ganze benötigte Strom durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt werden. Gerade bei der Windenergie lassen sich kaum Vorhersagen bzgl. der Verfügbarkeit tätigen.
4. Die Biomassenkonstante beträgt  $1 \frac{W}{m^2}$ . Die Fläche von Deutschland beträgt, unabhängig von der Beschaffenheit der Landschaft, 357 376 Quadratkilo-

meter bzw.  $3,57 \cdot 10^{11} \text{m}^2$ . Rechnerisch ist also eine Leistung durch Biomasse möglich von etwa:

$$P = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 3,57 \cdot 10^{11} \text{m}^2 = 3,57 \cdot 10^{11} \text{W}. \quad (\text{A.43})$$

Der Primärenergiebedarf von Deutschland beträgt 3821 Milliarden Kilowattstunden bzw.  $4,36 \cdot 10^{11} \text{W}$ . Hier ist ersichtlich, dass sogar ohne Berücksichtigung weiterer Wirkungsgrade, welche die Leistung der Biomasse weiter schmälern würden, eine Versorgung alleine durch diesen Energieträger nicht möglich ist.

5. Die Wind- und Wasserkraft sind „Folgeprodukte“ der Sonneneinstrahlung auf der Erde. Wind entsteht aufgrund von Temperatur- bzw. horizontalen Druckdifferenzen, Wasserdampf wird mit Hilfe des Windes transportiert, um an anderer Stelle abzuregnen. Typische Temperaturdifferenzen zur Erzeugung von Wind betragen 10 Kelvin. Mit Hilfe des Carnot-Limits kann daher der maximale Wirkungsgrad der dynamischen Prozesse im Erdsystem abgeschätzt werden. Dieser beträgt mit dem oben genannten Wert und der mittleren globalen Temperatur auf der Erde etwa 3,5%. Von der auf der Erde ankommenden Strahlungsleistung von  $240 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  können so nur etwa 8 Watt pro Quadratmeter genutzt werden.
6. Wir können annehmen, da der Transport der thermischen Energie aus dem Erdinneren zur Oberfläche schon seit mehreren Milliarden Jahren erfolgt, dass im Mittel jede vertikale Schicht des Gesteins im Inneren der Erde pro Sekunde von der gleichen Wärme durchströmt wird.

Um die Leistung der Geothermie abschätzen zu können, wird folgende Formel für die Leistung pro Flächeneinheit genutzt:

$$P = \frac{Q}{t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta h} \quad \text{bzw.} \quad \frac{P}{A} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta h} \quad (\text{A.44})$$

$\lambda$  gibt die Wärmeleitfähigkeit des Materials an,  $A$  ist die Fläche, durch welche die Wärme geleitet wird,  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen dem heißen und kalten Reservoir,  $\Delta h$  ist die Länge bzw. Höhe der wärmeleitenden Schicht.

Werte für die Wärmeleitfähigkeit von typischen Gesteinsarten liegen bei etwa  $\lambda = 2,8 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ , für den Temperaturgradienten lassen sich ebenfalls typische

Werte von ca. 30 Kelvin pro Kilometer Tiefe finden. Damit erhält man die Flächenleistung des Wärmestroms:

$$\frac{P}{A} = 2,8 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,03 \frac{K}{m} = 0,084 \frac{W}{m^2} \approx 0,1 \frac{W}{m^2} \quad (\text{A.45})$$

Hochgerechnet auf die gesamte Erdoberfläche ergibt dies eine Leistung für die Geothermie von:

$$\frac{P}{A} \cdot 4\pi \cdot r_{Erde}^2 = 4,3 \cdot 10^{13} W. \quad (\text{A.46})$$

Dies übersteigt nur um den Faktor 2,5 den gegenwärtigen Leistungsumsatz der Menschheit – ohne etwaige technische Wirkungsgrade zur Umsetzung der thermischen Energie. Global gesehen ist die Geothermie daher keine Alternative zu konventionellen Energieträgern.

7. Zurzeit leben ca. 83 Millionen Menschen in Deutschland, die Fläche beträgt 357 376 Quadratkilometer. Im Mittel stehen jedem Bürger prinzipiell

$$\frac{A_{\text{Deutschland}}}{\#\text{Menschen}} = \frac{3,57 \cdot 10^{11} m^2}{8,3 \cdot 10^6} \approx 4,3 \cdot 10^4 m^2$$

zu.

Dies entspricht einem Quadrat mit einer Kantenlänge von weniger als 210 Metern.

Der menschliche Körper hat einen Grundumsatz von etwa 90 Watt, abhängig von Größe und Masse der Person. Tätigkeiten erhöhen den Leistungsbedarf des menschlichen Körpers, bei einem leicht arbeitenden Menschen beträgt der Gesamtumsatz ca. 130 Watt. Legt man eine rein vegetarische Ernährung zu Grunde, so kann zunächst die Biomassenkonstante genutzt werden.

Pflanzen setzen hiernach etwa  $1 \frac{W}{m^2}$  in Biomasse um, sprich potenzielle Nahrung. Um den Grundumsatz zu decken wird also eine Fläche von  $130 m^2$  pro Person benötigt. Allerdings müssen die besagten 1 Watt pro Quadratmeter nach unten korrigiert werden: Realistischere Werte für den Wirkungsgrad der Photosynthese betragen eher  $0,05 - 0,1 \frac{W}{m^2}$ . Nutzbar bzw. essbar ist ebenso nicht die komplette Pflanze, sondern nur ein Teil. Damit erhöht sich die benötigte Fläche auf etwa 1300 bis  $2600 m^2$ .

Berücksichtigt man noch den Fleischkonsum, bedarf es deutlich mehr Fläche für die Nahrungsproduktion (s. Kapitel 3.2.2), jedenfalls dann, wenn wir von exzessiver, industrieller Fleischproduktion ausgehen. Diese bedeutet, dass die Tiere nicht mehr solche Pflanzenteile fressen, die für Menschen ohnehin nicht verdaulich sind, sondern eigene Anbauflächen mit reinen Futterpflanzen verbrauchen. Bei solcher exzessiver Tierhaltung werden für ein Kilogramm Fleisch ca. 16 Kilogramm Getreide benötigt. Dadurch verringert sich die Leistung für solche genutzten Flächen auf 3,8 Milliwatt pro Quadratmeter.

Insgesamt erkennt man deutlich, dass der Flächenbedarf fast in der Größenordnung angekommen ist, die jeder Mensch in Deutschland prinzipiell zur Verfügung hat. Eine Selbstversorgung bzw. Autarkie von Deutschland ist vielleicht gerade möglich. Die Versorgung umfasst dann aber nur heimische Massennahrungsmittel (Kartoffeln, Rüben...). Vor allem unter dem Gesichtspunkt, dass die zur Verfügung stehende Fläche auch anderweitig genutzt werden muss (Wohnraum, Produktion von Gütern, Infrastruktur usw.), ergeben sich sehr starke Zielkonflikte.

8. Um einen Wäschetrockner mit einer Leistung von 2000 Watt eine Stunde zu betreiben benötigt man eine Energie von

$$E = P \cdot t = 2000W \cdot 3600s = 7,2 \cdot 10^6 J. \quad (\text{A.47})$$

Um diese Energie mit einem Wasserkraftwerk bereit zu stellen, wird die potenzielle Energie gehobenen Wassers genutzt. Mit einer Fallhöhe von 30 Metern ergibt sich folgende Gleichung:

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \quad (\text{A.48})$$

$$\Leftrightarrow P \cdot t = m \cdot g \cdot h \quad (\text{A.49})$$

$$\Leftrightarrow m = \frac{P \cdot t}{g \cdot h} \quad (\text{A.50})$$

$$\Leftrightarrow m = \frac{7,2 \cdot 10^6 J}{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 30m} = 2,45 \cdot 10^4 kg. \quad (\text{A.51})$$

Es müssen also ca. 24500 Liter Wasser durch eine Turbine fließen, um die Energie für den Wäschetrockner bereit zu stellen (bei Wirkungsgrad 1!).

# Abbildungsverzeichnis

1.1	<b>Logo der Agentur für erneuerbare Energien</b> . . . . .	2
2.1	<b>Konzepte des fächerübergreifenden und fächerverbindenden Unterrichts</b> . . . . .	19
2.2	<b>Fragebogen zu grundlegenden Begriffen</b> . . . . .	23
2.3	<b>Zweiter Fragebogen</b> . . . . .	25
2.4	<b>Umfrageergebnisse Universitätsgruppe</b> . . . . .	26
2.5	<b>Umfrageergebnisse Schülergruppe</b> . . . . .	27
3.1	<b>Weltweite Ölproduktion</b> . . . . .	43
3.2	<b>Papier mit 2, 5 und 6 Faltungen</b> . . . . .	46
3.3	<b>Darstellung von Punkten, deren Anzahl der Funktion <math>f(x) = 2^n</math> folgt</b> . . . . .	47
3.4	<b>Vergleich Exponentialfunktion mit linearer und konstanter Funktion</b> . . . . .	49
3.5	<b>Erdumlaufbahn mit Exzentrizität von 0 (links) und 0,5 (rechts)</b>	51
3.6	<b>Tragfähigkeit der Erde</b> . . . . .	54
3.7	<b>Weltweite Getreideproduktion pro Kopf</b> . . . . .	57
3.8	<b>Weltweite Produktion der wichtigsten Getreidesorten</b> . . . . .	57
3.9	<b>Zusammenhang zwischen Bruttoinlandsprodukt und Energiebedarf</b> . . . . .	58
3.10	<b>Leistungsumsatz pro Kopf weltweit</b> . . . . .	59
3.11	<b>Primärenergiebedarf in Deutschland zwischen 1990 und 2012</b> .	60

3.12	<b>Leistungsumsatz pro Kopf im Oman zwischen 1971 und 2011 .</b>	61
3.13	<b>Dyson-Sphäre . . . . .</b>	64
4.1	<b>Die Badewanne als einfaches Beispiel für den Budgetgedanken.</b>	73
4.2	<b>Plancksches Strahlungsspektrum . . . . .</b>	75
4.3	<b>Wärmeleitung zwischen zwei Flächen mit unterschiedlichen Temperaturen . . . . .</b>	78
4.4	<b>Konvektion in einem Kochtopf . . . . .</b>	79
4.5	<b>Intensität der Sonnenstrahlung in Abhängigkeit der Wellen- länge . . . . .</b>	81
4.6	<b>Verschiedene Strahlungsantriebe (Radiative Forcing) unter- teilt in anthropogene und natürliche Antriebe. . . . .</b>	85
4.7	<b>Die Erde befindet sich im Strahlungsgleichgewicht mit der Umgebung. Die ankommende kurzwellige Strahlung wird in Form langwelliger Wärmestrahlung zurück ins All emittiert (Grafik: C. Springob). . . . .</b>	87
4.8	<b>Energieflüsse in einem einfachen Modell der Atmosphäre . . .</b>	88
4.9	<b>Schematische Darstellung der Präzessionsbewegung der Erdachse . . . . .</b>	92
4.10	<b>Schematische Darstellung der Periheldrehung mit übertriebe- ner Exzentrizität der Erdbahn . . . . .</b>	93
4.11	<b>Schematische Darstellung der unterschiedlichen Einstrahlung von Nord- und Südhalbkugel . . . . .</b>	94
4.12	<b>Erdumlaufbahn mit Exzentrizität von 0 (links) und 0,5 (rechts)</b>	95
4.13	<b>Schematische Darstellung der sich ändernden Neigung der Erdachse . . . . .</b>	96
4.14	<b>Klimaparameter der letzten 42000 Jahre . . . . .</b>	98
4.15	<b>Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche hat sich zwischen 1901 und 2012 erhöht . . . . .</b>	100
5.1	<b>Prinzip einer klassischen Wärmekraftmaschine . . . . .</b>	107
5.2	<b>Unterschied Reserven und Ressourcen . . . . .</b>	110

5.3	<b>Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon</b> . . . . .	115
5.4	<b>Tröpfchenmodell als Analogie für die Instabilität eines Atomkerns</b> . . . . .	116
5.5	<b>Fusion eines Deuterium- und eines Tritium-Kerns</b> . . . . .	118
5.6	<b>Potenzialtopf in der klassischen Physik</b> . . . . .	120
5.7	<b>Potenzialtopf in der Quantenmechanik</b> . . . . .	120
5.8	<b>Versuchsaufbau 1 zur Bestimmung der Solarkonstanten</b> . . .	123
5.9	<b>Messkurve des zweiten Exoeriments zur Bestimmung der Solarkonstanten</b> . . . . .	125
5.10	<b>Darstellung des lokalen Strahlungseintrages in Europa</b> . . . .	127
5.11	<b>Energiegehalt des Windes in Abhängigkeit von der Höhe</b> . . .	133
5.12	<b>Strömungsverlauf in einer Windkraftanlage</b> . . . . .	134
5.13	<b>Betz'sche Leistungskurve</b> . . . . .	135
5.14	<b>Aufbau der Versuchsanordnung zum Betzlimit</b> . . . . .	137
5.15	<b>Graph mit den Messergebnissen der Versuchsreihe zur Untersuchung des Leistungsbeiwertes</b> . . . . .	138
5.16	<b>Verschiedene Windzonen Deutschlands</b> . . . . .	140
5.17	<b>Histogramm einer Windgeschwindigkeitsverteilung</b> . . . . .	141
5.18	<b>Realdaten von Windgeschwindigkeiten</b> . . . . .	142
5.19	<b>Schematische Anordnung der Windräder in einem Windpark</b>	144
5.20	<b>Hubschrauber des Typs Aérospatiale AS 532 „Cougar“</b> . . . .	145
5.21	<b>Schema des Wasserkreislaufs auf der Erde</b> . . . . .	146
5.22	<b>Raster über einer topographischen Karte von Deutschland</b> . .	148
5.23	<b>Eckdaten des Elbflusses</b> . . . . .	151
5.24	<b>Geographischen Daten des Elbflusses</b> . . . . .	152
5.25	<b>Höhenprofil der Elbe</b> . . . . .	153
5.26	<b>Flächenbedarf eines Autos</b> . . . . .	160
5.27	<b>Benötigte Fläche Deutschlands zur Gewinnung der Primärenergie</b> . . . . .	165

---

5.28	<b>Akkumulationszeiten für Sonnenenergie, Wind- und Wasserkraft, Biomasse und Geothermie. . . . .</b>	166
5.29	<b>Antrieb geochemischer Prozesse durch den Wind. . . . .</b>	168
5.30	<b>Beeinflussung geochemischer Prozesse durch Entzug von Energie. . . . .</b>	169
5.31	<b>Stromerzeugung und -verbrauch aufgeteilt nach Energieträgern. . . . .</b>	170
5.32	<b>Strombereitstellung verschiedener Energieträger in Deutschland . . . . .</b>	171
5.33	<b>Aufgabe zum Stromverbrauch in Deutschland. . . . .</b>	176
6.1	<b>Programm einer Schülerakademie . . . . .</b>	180
6.2	<b>Ergebnisse der Kontrollgruppe (DSA) . . . . .</b>	184
6.3	<b>Ergebnisse der Teilnehmer des Umweltphysikkurses (DSA) . .</b>	184

# Tabellenverzeichnis

3.1	<b>Energiebedarf eines interstellaren Raumschiffes . . . . .</b>	66
4.1	<b>Beispiele für einige wichtige Haushaltselemente . . . . .</b>	74
4.2	<b>Überblick über die Periodendauern und Strahlungsantriebe der Milankovic-Zyklen. . . . .</b>	97
5.1	<b>Lineare Verbrauchsreichweiten fossiler Energierohstoffe . . .</b>	111
5.2	<b>Dynamische Verbrauchsreichweiten fossiler Energierohstoffe .</b>	111
5.3	<b>Flächenleistung einiger Solaranlagen . . . . .</b>	128
5.4	<b>Messwerte der Versuchsreihe zur Untersuchung des Leis- tungsbeiwertes . . . . .</b>	138
5.5	<b>Flächenleistung einiger Windparks . . . . .</b>	143
5.6	<b>Auszählung des Rasters einer topographischen Karte . . . . .</b>	149
5.7	<b>Ermittelte lineare Abschnitte der Elbe . . . . .</b>	153
5.8	<b>Flächenleistung einiger Wasserkraftwerke . . . . .</b>	155
5.9	<b>Leistung pro Quadratmeter bei verschiedenen Baumarten. . .</b>	158
5.10	<b>Potenziale der verschiedenen Energieträger. . . . .</b>	164
5.11	<b>Flächenbedarf einiger regenerativer Energieträger. . . . .</b>	165
6.1	<b>Detaillierte Struktur der am PPR unterrichteten Reihe . . . .</b>	188

# Literaturverzeichnis

- [Ack14] ACKERMANN, Peter: *Fokus Physik S II*. [Westl. Bundesländer]. Berlin : Cornelsen, 2014. – 309 S. – ISBN 9783060155552
- [Age] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN E.V.: *Logo der Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE)*. <https://www.unendlich-viel-energie.de/>, Abruf: 10.12.2017
- [Ago] AGORA ENERGIEWENDE: *Agorameter*. <https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/76/Agorameter/>, Abruf: 10.12.2017
- [Ago17] AGORA ENERGIEWENDE: *Kohlekraftwerke sind nicht zwangsläufig ein Hindernis für den Ausbau Erneuerbarer Energien*. [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Flexibility\\_in\\_thermal\\_plants/PM\\_Agora\\_FlexCoal\\_06062017.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Flexibility_in_thermal_plants/PM_Agora_FlexCoal_06062017.pdf). Version: 2017, Abruf: 10.12.2017
- [Alp] *Fact Sheet alpha ventus*. [https://www.alpha-ventus.de/fileadmin/Dateien/publikationen/av\\_Factsheet\\_de\\_2017.pdf](https://www.alpha-ventus.de/fileadmin/Dateien/publikationen/av_Factsheet_de_2017.pdf), Abruf: 10.12.2017
- [And10] ANDERER, PIA ET AL.: Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland. In: *WASSERWIRTSCHAFT* 100 (2010), Nr. 9, S. 17–22
- [ANH78] AUSUBEL, David P. ; NOVAK, Joseph D. ; HANESIAN, Helen: *Educational psychology: A cognitive view*. 2nd ed. New York and London : Holt, Rinehart and Winston, 1978. – ISBN 9780030899515
- [Ank] ANKER, Stefan: *Mein Auto schluckt 11.000 Liter auf 100 Kilometer*. <https://www.welt.de/motor/article120222757/>

- Mein-Auto-schluckt-11-000-Liter-auf-100-Kilometer.html, Abruf: 10.12.2017
- [Bac] *Bachtuari-Talsperre*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bachtuari-Talsperre>, Abruf: 10.12.2017
- [Bam95] BAMBERGER, Richard: Methoden und Ergebnisse der internationalen Schulbuchforschung im Überblick. In: OLECHOWSKI, Richard (Hrsg.): *Schulbuchforschung*. Frankfurt am Main and New York : P. Lang, 1995 (Schule, Wissenschaft, Politik). – ISBN 978-3631463789, S. 65
- [BGR17] BGR: *BGR energiestudie 2017 – Daten und entwicklungen der deutschen und globalen energieverorgung*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie\\_2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=4). Version: 2017, Abruf: 10.12.2017
- [BKRS01] BERGMANN, Ludwig ; KASSING, Rainer ; RAITH, Wilhelm ; SCHAEFER, Clemens: *Lehrbuch der Experimentalphysik: Zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 2001. – ISBN 3110168375
- [BMK] BMK - FAO: *Welternten-Mais,-Reis,-Weizen-2011-BMK; CC BY-SA 3.0*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25849378>, Abruf: 10.12.17
- [Bre] BREDTHAUER, Wilhelm: *Impulse Physik*. Neubearb., 1. Aufl., [Nachdr.]. Stuttgart [u.a.] : Klett. – ISBN 9783127726008
- [Bri] BRITISH PETROLEUM: *Statistical Review of World Energy 2015*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>, Abruf: 10.12.17
- [Buna] BUNDESVERBAND DEUTSCHER PFLANZENZÜCHTER E.V.: *Deutschland an der Spitze*. [http://www.bdp-online.de/de/Pflanzenzuechtung/Kulturarten/Getreide/Weizen/Deutschland\\_ist\\_fuehrend/](http://www.bdp-online.de/de/Pflanzenzuechtung/Kulturarten/Getreide/Weizen/Deutschland_ist_fuehrend/), Abruf: 10.12.2017

- [Bunb] BUNDESWEHR-FOTOS - COUGAR AS 532 MK2, VIP-HUBSCHRAUBER: *Eurocopter Cougar (Luftwaffe) AS532 4843260970; CC BY 2.0*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eurocopter\\_Cougar\\_\(Luftwaffe\)\\_AS532\\_4843260970.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eurocopter_Cougar_(Luftwaffe)_AS532_4843260970.jpg), Abruf: 10.12.2017
- [Bv97] BOEKER, Egbert ; VAN GRONDELLE, Rienk: *Physik und Umwelt*. Braunschweig [u.a.] : Vieweg, 1997 (Vieweg-Lehrbuch Umweltwissenschaften). – 32 f S. – ISBN 3528067802
- [Car13] CARLOWITZ, HANS CARL VON : *Sylvicultura oeconomica: Oder hauswirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baumzucht*. Neuausgabe. oekom, 2013. – ISBN 978-3-86581-411-1
- [Cla14] CLAUSER, Christoph: *Einführung in die Geophysik: Globale physikalische Felder und Prozesse in der Erde*. Heidelberg : Springer Spektrum, 2014 (Lehrbuch). – 260 ff S. – ISBN 9783642044953
- [Cop] *Copper Mountain Solar Facility*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Copper\\_Mountain\\_Solar\\_Facility](https://en.wikipedia.org/wiki/Copper_Mountain_Solar_Facility), Abruf: 10.12.2017
- [Cor] *Physik - Oberstufe*. 1. Aufl., 1. Dr. Berlin : Cornelsen. – ISBN 9783060130061
- [Deg] DEGREEN: *Sonne Strahlungsintensitaet; CC BY-SA 2.0 de*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonne\\_Strahlungsintensitaet.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg), Abruf: 10.12.2017
- [Der] *Deriner-Talsperre*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Deriner-Talsperre>, Abruf: 10.12.2017
- [Deua] *Deuterium-tritium fusion; Gemeinfrei*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deuterium-tritium\\_fusion.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Deuterium-tritium_fusion.svg), Abruf: 10.12.2017
- [Deub] DEUTSCHE UNESCO-KOMMISSION E.V.: *Bildung für nachhaltige Entwicklung*. <http://www.bne-portal.de/>, Abruf: 10.12.2017
- [Deuc] DEUTSCHE UNESCO-KOMMISSION E.V.: *Welterbe und Nachhaltigkeit*. <https://www.unesco.de/kultur/welterbe/welterbe-und-nachhaltigkeit.html>, Abruf: 10.12.2017

- [DK14] DEITERSEN, Christian ; KRAUSE, Eduard: Wie viele Menschen kann die Erde tragen? In: *Astronomie und Raumfahrt* (2014), Nr. 3-4
- [Dom] DOMINIKLENNE: *World cereal production per capita; CC0*.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World\\_cereal\\_production\\_per\\_capita.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_cereal_production_per_capita.svg), Abruf: 10.12.17
- [Dor12] DORN, Franz Friedrich; B. Friedrich; Bader: *Physik - Gymnasium SEK II*. Dr. A,3. Braunschweig : Schroedel, 2012. – 228 S. – ISBN 9783507107755
- [DR14] DIEKMANN, Bernd ; ROSENTHAL, Eberhard: *Energie: Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung*. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Springer Spektrum, 2014. – ISBN 9783658005016
- [DSA] DSA: *Ziel der Akademien*. <https://www.deutscheschuelerakademie.de/dsa/dsa-ziele>, Abruf: 10.12.2017
- [Ecca] *Eccentricity half*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eccentricity\\_half.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eccentricity_half.png), Abruf: 10.12.2017
- [Eccb] *Eccentricity zero*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Milankovi%C4%87-Zyklen#/media/File:Eccentricity\\_zero.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Milankovi%C4%87-Zyklen#/media/File:Eccentricity_zero.png), Abruf: 10.12.2017
- [Ed6] ED629 - ENGLISCHE WIKIPEDIA: ; *Copyrighted free use*.  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10261321>, Abruf: 10.12.2017
- [EnBa] *EnBW Baltic 1*. <https://www.enbw.com/erneuerbare-energien/windenergie/unsere-windparks-auf-see/baltic-1/>, Abruf: 10.12.2017
- [EnBb] *Die Wasserkraft am schiffbaren Neckar*. [https://www.enbw.com/media/konzern/docs/energieerzeugung/neckar\\_flyer\\_wasserkraft\\_am\\_neckar\\_endfassung.pdf](https://www.enbw.com/media/konzern/docs/energieerzeugung/neckar_flyer_wasserkraft_am_neckar_endfassung.pdf), Abruf: 10.12.2017

- [Enea] *Binding energy curve - common isotopes DE; Gemeinfrei.*  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes\\_DE.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes_DE.svg),  
Abruf: 10.12.2017
- [Eneb] Steife Brise gesucht. In: *Energie Perspektiven* 14, Nr. 3/2013. [http://www2.ipp.mpg.de/ippcms/ep/download/2013/ep\\_2013\\_03.pdf](http://www2.ipp.mpg.de/ippcms/ep/download/2013/ep_2013_03.pdf), Abruf: 10.12.2017
- [Eur] EUROPEAN CLIMATE ASSESSMENT & DATASET: *Winddaten.* <http://www.ecad.eu/>, Abruf: 10.12.2017
- [Eyr] EYRIAN: *ConvectionCells; CC BY-SA 3.0.* <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2525196>, Abruf: 10.12.2017
- [Fö] FÖDERAL ERNEUERBAR: *Primärenergieverbrauch NRW 2014.* [https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/NRW/kategorie/energiemix/auswahl/259-primaerenergieverbrauch/\#goto\\_259](https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/NRW/kategorie/energiemix/auswahl/259-primaerenergieverbrauch/\#goto_259), Abruf: 10.12.2017
- [FC13] FARMER, G. T. ; COOK, John: *Climate change science: a modern synthesis.* Bd. ; Vol. 1: *The physical climate.* Dordrecht [u.a.] : Springer, 2013. – 300 ff S. – ISBN 9789400757561
- [GE10] GIANCOLI, Douglas C. ; EIBL, Oliver: *Physik: Lehr- und Übungsbuch.* 3., erw. Aufl. München and Boston, Mass. [u.a.] : Pearson Studium, 2010 (Physik). – ISBN 9783868940237
- [Gem] GEMEINDEVERWALTUNG GOLDISTHAL (Hrsg.): *Das Pumpspeicherwerk (PSW) Goldisthal.* <http://www.goldisthal.de/pumpspeicherwerk.html>, Abruf: 10.12.2017
- [GHK06] GIRWIDZ, Raimund ; HÄUSSLER, Peter ; KIRCHER, Ernst: *Physikdidaktik: Eine Einführung.* 2. Aufl. Berlin : Springer Berlin, 2006 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783540419365
- [Gre] GREHN, Joachim: *Metzler-Physik.* Ausg. Nordrhein-Westfalen, [S II], Dr. A. Braunschweig : Schroedel. – ISBN 978-3-507-17028-5

- [Ham12] HAMM, H.: Immer mehr Länder planen den Ausstieg: ein Jahr nach Fukushima. In: *Natur + Kosmos* (2012), Nr. 3, S. 12–16
- [Han] HANKWANG: *Peakoil*; CC BY 2.5. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4201781>, Abruf: 10.12.2017
- [Har13] HARRIS, Randy: *Moderne Physik: [Lehr- und Übungsbuch]*. 2., aktualis. Auflage. München : Pearson Studium ein Imprint von Pearson Deutschland, 2013. – 701 ff S. – ISBN 978–3–86894–115–9
- [Hei97] HEINLOTH, Klaus: *Die Energiefrage: Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten*. Braunschweig and Wiesbaden : Vieweg, 1997 (Vieweg-Handbuch Umweltwissenschaften). – 320 ff S. – ISBN 9783528031060
- [Hey97] HEYMANN, Hans W.: *PB Buch*. Bd. 34: *Allgemeinbildung und Fachunterricht*. Hamburg : Bergmann + Helbig, 1997. – ISBN 3–925836–39–X
- [HK12] HALL, CHARLES A. S ; KLITGAARD, Kent A.: *Energy and the wealth of nations: Understanding the biophysical economy*. New York, NY : Springer Verlag, 2012. – ISBN 9781441993977
- [Hoe64] HOERNER, SEBASTIAN VON: *The general Limits of space travel*. Astronom. Rechen-Institut, 1964
- [Hoo] *Hoover Dam*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Hoover\\_Dam](https://de.wikipedia.org/wiki/Hoover_Dam), Abruf: 10.12.2017
- [Hub09] HUBER, L.: Vereint, aber nicht eins: Fächerübergreifender Unterricht und Projektunterricht. In: HÄNSEL, Dagmar (Hrsg.): *Projektunterricht*. Weinheim : Beltz, 2009 (Beltz-Handbuch). – ISBN 978–3407831477
- [IPCa] IPCC: *Fifth Assessment Report (AR5)*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>, Abruf: 10.12.2017
- [IPCb] IPCC: *WG1 Abbildung SPM.5*. <http://www.de-ipcc.de/224.php>, Abruf: 10.12.2017
- [Ita] *Itaipu*. <http://www.itaipu.gov.br/en/energy-home>, Abruf: 10.12.2017

- [JS14] JACOBY, Wolfgang ; SCHWARZ, Oliver: *Die Grenzen der Erde: Über die Endlichkeit natürlicher Ressourcen*. Erstausg. [Dinslaken] : AtheneMedia, 2014. – ISBN 978–3869921181
- [Kai] KA111: *Betzsche Leistungskurve*; CC BY-SA 3.0. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1155427>, Abruf: 10.12.2017
- [Kal14] KALTSCHMITT, Martin: *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 5. Aufl., erw. und korr. Nachdruck. Berlin : Springer, 2014. – ISBN 9783642032486
- [Kal16] KALUSCHE, Dietmar: *Ökologie in Zahlen: Eine Datensammlung in Tabellen mit über 10.000 Einzelwerten*. 2. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer Spektrum, 2016. – 65 S. – ISBN 978–3–662–47987–2
- [Kle10] KLEIDON, Axel: Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth. In: *Physics of life reviews* 7 (2010), Nr. 4, S. 424–460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plrev.2010.10.002>. – DOI 10.1016/j.plrev.2010.10.002. – ISSN 1873–1457
- [Kle12] KLEIDON, Axel: Was leistet die Erde? In: *Physik in unserer Zeit* 43 (2012), Nr. 3, S. 136–144. <http://dx.doi.org/10.1002/piuz.201201294>. – DOI 10.1002/piuz.201201294
- [Köp08] KÖPPEN, Bernhard: Kann es zu viele Menschen geben? Eine ungelöste Grundfrage der Bevölkerungsforschung. In: *Astronomie + Raumfahrt* (2008), Nr. 45, S. 19–22
- [Kra04] KRAUS, Helmut: *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004. – 103 S. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-35017-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-35017-9>. – ISBN 9783540206569
- [Kul] KULTUSMINISTERKONFERENZ: „*Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule*“. [http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2007/2007\\_06\\_15\\_Bildung\\_f\\_nachh\\_Entwicklung.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2007/2007_06_15_Bildung_f_nachh_Entwicklung.pdf), Abruf: 10.12.2017

- [Kul80] KULTUSMINISTERKONFERENZ: *Umwelt und Unterricht*. [http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1980/1980\\_10\\_17\\_Umwelt\\_Unterricht.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1980/1980_10_17_Umwelt_Unterricht.pdf). Version: 1980, Abruf: 10.12.2017
- [Leu93] LEUSCHNER, Udo: Strom aus Wasserkraft. In: *StromBASISWISSEN* (193), Nr. 107, S. 3
- [Lex] LEXAS ONLINE: *Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf*. [http://www.laenderdaten.de/wirtschaft/BIP\\_pro\\_kopf.aspx](http://www.laenderdaten.de/wirtschaft/BIP_pro_kopf.aspx), Abruf: 10.12.2017
- [Löf] LÖFKEN, Jan O. ; BILD DER WISSENSCHAFT (Hrsg.): *Jeder kennt jeden über sechs Ecken*. [http://www.wissenschaft.de/home/-/journal\\_content/56/12054/1149217/](http://www.wissenschaft.de/home/-/journal_content/56/12054/1149217/)
- [Mac13] MACKAY, DAVID J. C: *Sustainable energy - without the hot air*. Reprinted. Cambridge : UIT Cambridge, 2013. – ISBN 9780954452933
- [Max] MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK: *Kernfusion - Stand und Perspektiven*. [https://www.ipp.mpg.de/46293/fusion\\_d.pdf](https://www.ipp.mpg.de/46293/fusion_d.pdf), Abruf: 10.12.2017
- [May15] MAYRING, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. 12., Neuausgabe, 12., vollständig überarbeitete und aktualisierte Aufl. Weinheim, Bergstr : Beltz, J, 2015 (Beltz Pädagogik). – ISBN 9783407257307
- [Min13] MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG: Kernlehrplan für das Gymnasium / Gesamtschule – Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen Physik. (2013), S. 11
- [Min14] MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG: Kernlehrplan für das Gymnasium / Gesamtschule – Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen Geographie. (2014), S. 23
- [Min08] MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG: Kernlehrplan für das Gymnasium / Gesamtschule - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Physik. (2008), S. 20; 36

- [MMR92] MEADOWS, Donella ; MEADOWS, Dennis ; RANDERS, Jorgen: *Die neuen Grenzen des Wachstums: Zur Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunftschancen*. Stuttgart : DVA, 1992. – ISBN 3421066264
- [Moe98] MOEGLING, Klaus: *Fächerübergreifender Unterricht - Wege ganzheitlichen Lernens in der Schule*. Bad Heilbrunn/Obb : Klinkhardt, 1998. – ISBN 978–3781509535
- [MyG] MYGEO (Hrsg.): *Topographische Karte von Deutschland; GNU Free Documentation License*. [http://www.mygeo.info/landkarten/deutschland/Deutschland\\_Topographie.jpg](http://www.mygeo.info/landkarten/deutschland/Deutschland_Topographie.jpg), Abruf: 10.12.2017
- [Myr11] MYRRHE, ANKE ; TAGESSPIEGEL (Hrsg.): *Merkel weiht ersten Offshore-Windpark in der Ostsee ein*. <http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/energie-merkel-weiht-ersten-offshore-windpark-in-der-ostsee-ein/4124890.html>. Version: 2011, Abruf: 10.12.2017
- [Mys] MYSID: *Earth precession; Gemienfrei*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Milankovi%C4%87-Zyklen#/media/File:Earth\\_precession.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Milankovi%C4%87-Zyklen#/media/File:Earth_precession.svg), Abruf: 10.12.2017
- [NAS] NASA, Mysid: *Earth obliquity range*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth\\_obliquity\\_range.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_obliquity_range.svg), Abruf: 10.12.2017
- [Nec] *Neckar*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Neckar>, Abruf: 10.12.2017
- [NRE] *Ivanpah Solar Electric Generating System*. [https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=62](https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=62), Abruf: 10.12.2017
- [Pet00] PETERSEN, Wilhelm: *Fächerverbindender Unterricht: Begriff-Konzept-Planung-Beispiele ; ein Lehrbuch*. München : Oldenbourg, 2000 (EGS-Texte). – ISBN 978–3486024623
- [Pla] *BlackbodySpectrum lin 150dpi de; CC BY-SA 3.0*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=853040>, Abruf: 10.12.2017

- [Pre] PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG: *Endlagergesetz in Kraft getreten*. <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2017/03/2017-03-24-atom-endlagergesetz.html>, Abruf: 10.12.2017
- [PVT] *Work underway on 8minutenergy Renewables 266MW Mount Signal solar farm*. [https://www.pv-tech.org/news/8minutenergy\\_renewables\\_begins\\_building\\_266mw\\_mount\\_signal\\_solar\\_farm](https://www.pv-tech.org/news/8minutenergy_renewables_begins_building_266mw_mount_signal_solar_farm), Abruf: 10.12.2017
- [Qua13] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation ; mit 117 Tabellen*. 8., aktualisierte und erw. Aufl. München : Hanser, 2013. – 243–245; 291 S. – ISBN 9783446435261
- [Raf] RAFFELSIEFER, MARION : *Fächerübergreifender Unterricht*. [http://www.studienseminar-koblenz.de/medien/wahlmodule\\_unterlagen/2004/149/2\%20F\%E4cher\%FCbergreifender\%20Unterricht\%20\(PPT\).pdf](http://www.studienseminar-koblenz.de/medien/wahlmodule_unterlagen/2004/149/2\%20F\%E4cher\%FCbergreifender\%20Unterricht\%20(PPT).pdf)
- [Rot99] ROTH, Eike: *Sonnenergie: Was sie bringt - was sie kostet ; Chancen und Grenzen erneuerbarer Energien*. München : Friedmann, 1999. – 108 S. – ISBN 9783933431059
- [Sar] *Sarnia Photovoltaic Power Plant*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Sarnia\\_Photovoltaic\\_Power\\_Plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Sarnia_Photovoltaic_Power_Plant), Abruf: 10.12.2017
- [Sch78] SCHÖPF, Hans-Georg: *Von Kirchhoff bis Planck: Theorie der Wärmestrahlung in historisch-kritischer Darstellung*. 1. Aufl. Braunschweig : Vieweg, 1978 (Reihe Wissenschaft). – ISBN 978-3-528-06840-0
- [Sch04] SCHULER, Stephan: *Alltagstheorien von Schülerinnen und Schülern zum globalen Klimawandel*. In: KROSS, Eberhard (Hrsg.): *Globales Lernen im Geographieunterricht*. Nürnberg : Hochschulverband für Geographie und ihre Didaktik, 2004 (Geographiedidaktische Forschungen). – ISBN 978-3925319259
- [Sch05] *Schulgesetz für das Land Nordrhein-Westfalen*. <https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Recht/Schulrecht/Schulgesetz/Schulgesetz.pdf>. Version: 2005, Abruf: 10.12.2017

- [Sch06] SCHWARZ, Oliver: Die menschliche Zivilisation und das globale Energiegleichgewicht. In: *Praxis der Naturwissenschaften* (2006), Nr. 8/ 55, S. 2–7
- [Sch08] SCHWARZ, Oliver: Ausgewählte kosmische und anthropogene Einflüsse auf die Energiebilanz der Erde in elementarisierter Darstellung; Habilitationsschrift. (2008)
- [Sch09a] SCHWARZ, Oliver: Das Konzept des Strahlungsantriebes verstehen. Kosmische Strahlungsantriebe in elementarer Darstellung als Weg zum Verständnis anthropogener Strahlungsantriebe. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* (2009), Nr. (20) 111/ 112, S. 13–19
- [Sch09b] SCHWARZ, Oliver: Die Leuchtkraftzunahme der Sonne in elementarer Darstellung. In: *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* (2009), Nr. 3-4 (46), S. 56–60
- [SCM07] STEFFEN, Will ; CRUTZEN, Paul J. ; MCNEILL, John R.: The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. In: *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36 (2007), Nr. 8, S. 614–621. [http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2). – DOI 10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2. – ISSN 0044-7447
- [SD13] SCHWARZ, O. ; DEITERSEN, C.: Die Energiewende aus fachdidaktischer Sicht. In: *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (2013)
- [Seea] SEEN.DE: *Die Bleilochtalsperre*. <https://www.seen.de/bleilochtalsperre/>, Abruf: 10.12.2017
- [Seeb] SEEN.DE: *Die Hohenwarte-Talsperre*. <https://www.seen.de/hohenwarte-talsperre/>, Abruf: 10.12.2017
- [Smi13] SMITH, Adam: *Wohlstand der Nationen*. Köln : Anaconda, 2013. – ISBN 9783730600184
- [Sol] SOLARGIS © 2011 GEOMODEL SOLAR S.R.O.: *SolarGIS-Solar-map-Europe-de*; CC BY-SA 3.0. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15359790>, Abruf: 10.12.2017

- [Spi] SPIEGEL ONLINE (Hrsg.): *Indien baut weltgrößte Solaranlage: "Ultra Mega Solar Power Plant"*. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/ultra-mega-solar-power-plant-indien-baut-weltgroesste-solaranlage-a-951652.html>, Abruf: 10.12.2017
- [SS09] STRAHLER, Alan H. ; STRAHLER, Arthur N.: *UTB*. Bd. 8159 : Geowissenschaften: *Physische Geographie*. 4., vollst. überarb. Aufl. Stuttgart : Ulmer, 2009. – 230 S. – ISBN 9783825281595
- [Sta16] STARK, Florian ; WELT N24 GMBH (Hrsg.): *Warum Dschingis Khan 16 Millionen Nachkommen hat*. <https://www.welt.de/geschichte/article157995653/Warum-Dschingis-Khan-16-Millionen-Nachkommen-hat.html>. Version: 2016
- [Stö] STÖRFIX: *Windzonenkarte; CC BY 2.5*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=350185>, Abruf: 10.12.2017
- [Stü] STÜNDLE: *Drehung der Apsidenlinie; CC0*. [https://de.wikipedia.org/wiki/Apsidendrehung\#/media/File:Drehung\\_der\\_Apsidenlinie.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Apsidendrehung\#/media/File:Drehung_der_Apsidenlinie.svg), Abruf: 10.12.2017
- [tal] TALSPERREN.NET (Hrsg.): *Bleilochalsperre*. <http://www.talsperren.net/Thuringen/Bleiloch/bleiloch.html>, Abruf: 10.12.2017
- [TBD14] TIPLER, Paul A. ; BASLER, Michael ; DOHMEN, Renate: *Paul A. Tipler: Für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7th ed. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2014. – ISBN 9783642541650
- [Tra] *Transfer 21*. <http://www.transfer-21.de/>, Abruf: 10.12.17
- [Tra13] TRAN NGOC CHAT: Die Bedeutung von Wasserkraftwerken für die zukünftige Energieversorgung Vietnams. In: *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung (2013)*
- [Umw] UMWELTBUNDESAMT: *Entwicklung des Primärenergieverbrauchs*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch\#textpart-2>, Abruf: 10.12.2017

- [Uni] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME: *Environmental Data Explorer*. <http://ede.grid.unep.ch/results.php>, Abruf: 10.12.2017
- [Use] USER:MIAOW MIAOW: *Elbe tributaries discharge diagram; Gemeinfrei*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elbe\\_tributaries\\_discharge\\_diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elbe_tributaries_discharge_diagram.svg), Abruf: 10.12.2017
- [Ver] VERMIP: *Windvertln: CC BY-SA 3.0*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windvertln.png>, Abruf: 10.12.2017
- [VTG] *Schüttgutwagen Typ: Falns*. <http://www.txlogistik.eu/assets/Uploads/Falns-Kohle.pdf>, Abruf: 10.12.2017
- [Was] *Wasserkreislauf; CC BY-SA 3.0*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=313136>, Abruf: 10.12.2017
- [Wia03] WIATER, Werner: *Beiträge zur historischen und systematischen Schulbuchforschung*. Bd. Bd. 1: *Schulbuchforschung in Europa: Bestandsaufnahme und Zukunftsperspektive*. Bad Heilbrunn/Obb. : Klinkhardt, 2003. – 13f S. – ISBN 978–3781512863
- [wis] WISSEN.DE kaminholz: *Brennholz Holz Brennwerte / Brennwertvergleich*. <http://www.kaminholz-wissen.de/holz-brennwerte.php>, Abruf: 10.12.2017
- [Wor] WORLD BANK GROUP: *Daten zum Leistungsumsatz*. <http://www.worldbank.org>, Abruf: 10.12.2017
- [Wor17] WORLD ENERGY COUNCIL ; WELTENERGIERAT – DEUTSCHLAND E.V. (Hrsg.): *Energie für Deutschland: Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext*. [http://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2014/02/Energie-f\%C3\%BCr-Deutschland-2017\\_.pdf](http://www.weltenergierat.de/wp-content/uploads/2014/02/Energie-f\%C3\%BCr-Deutschland-2017_.pdf). Version: 2017, Abruf: 10.12.2017
- [Xub] XUBOR: *Milankovic-Zyklen 2017 (cropped); CC BY-SA 4.0*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Milankovic-Zyklen\\_2017\\_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Milankovic-Zyklen_2017_(cropped).jpg), Abruf: 10.12.2017

- [ZB10] ZIEREP, Jürgen ; BÜHLER, Karl: *Grundzüge der Strömungslehre*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010. – 172 f S. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9756-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9756-5>. – ISBN 978-3-8348-0834-9