

# **Integration von Umweltaspekten bei der Entwicklung von Energiesystemen**

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Zusammenhang von Strom, Umwelt- und Ökosystem</b> .....	1
1.1	Ökologie als Wissenschaft.....	3
1.2	Ökologische Begriffe.....	3
1.3	Komponenten des Ökosystems.....	5
1.4	Biogeochemischer Zyklus .....	10
1.4.1	Der Wasserkreislauf.....	10
1.4.2	Der Kohlenstoffkreislauf .....	11
1.4.3	Der Stickstoffkreislauf .....	13
1.4.4	Der Phosphorkreislauf.....	14
1.4.5	Der Schwefelkreislauf.....	15
1.5	Schadstoffe im Ökosystem .....	16
<b>2</b>	<b>Der ökologische Fußabdruck von Energiesystemen</b> .....	21
2.1	Ökologischer Fußabdruck.....	22
2.1.1	Notwendigkeit des ökologischen Fußabdrucks .....	22
2.1.2	Ökologischer Fußabdruck und verwandte Begriffe .....	24
2.1.3	Gebrauch von ÖF-Daten.....	28
2.1.4	Komponenten des ökologischen Fußabdrucks .....	30
2.2	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck.....	31
2.3	Ökologischer Fußabdruck der Energieerzeugungssysteme .....	34
2.3.1	Vergleich der Energieerzeugungssysteme .....	35
2.4	Kernenergie .....	39
<b>3</b>	<b>Konventionelle Energiegewinnungssysteme:</b>	
	<b>Wärme Kraftwerke</b> .....	46
3.1	Wie funktioniert ein Wärme Kraftwerk? .....	48

3.2	Einfluss von Wärmekraftwerken auf das Ökosystem .....	48
3.3	Globaler Klimawandel.....	53
3.3.1	Gründe für den Klimawandel.....	54
3.3.2	Umweltfolgen der globalen Erwärmung.....	58
3.3.3	Sozioökonomische Folgen der globalen Erwärmung .....	59
3.4	Ozonabbau.....	60
3.5	Saurer Regen .....	63
3.5.1	Umweltfolgen von saurem Regen.....	65
3.5.2	Auswirkungen von saurem Regen auf Bauwerke und Denkmäler.....	67
<b>4</b>	<b>Ökologische und ökonomische Dimensionen von Kernkraftwerken.....</b>	<b>70</b>
4.1	Einführung.....	71
4.2	Risiken von Kernkraftwerken.....	75
4.2.1	Abbau von Uran .....	75
4.2.2	Anreicherung von Uran .....	76
4.2.3	Betrieb eines Reaktors.....	76
4.2.4	Endlagerung der Brennstäbe .....	78
4.2.5	Herunterfahren des Reaktors.....	81
4.2.6	Kosten .....	81
4.2.7	Kernkraftwerke als mögliches Angriffsziel in Kriegen und von Terroristen .....	82
4.3	Beurteilung von Kernkraftwerken unter ökologischen Aspekten 84	
5	Solarenergiesysteme .....	91

5.1	Technologische Aspekte der Energieerzeugung in Solaranlagen	92
5.1.1	Solarthermie.....	93
5.1.2	Konzentrierende Solarenergie (CSP) .....	97
5.1.3	Photovoltaik .....	101
5.1.4	Solarthermie: Umweltauswirkungen .....	104
5.1.5	Photovoltaik: Umweltauswirkungen .....	107
<b>6</b>	<b>Windenergie</b> .....	<b>118</b>
6.1	Windenergie .....	118
6.2	Windturbinenelemente.....	119
6.2.1	Rotorblätter .....	120
6.2.2	Gondel.....	122
6.2.3	Windkrafttürme .....	123
6.3	Umweltauswirkungen der Windenergie Nutzung .....	124
6.3.1	Auswirkungen auf die Tierwelt .....	125
6.3.2	Visuelle Auswirkungen .....	125
6.3.3	Lärmemissionen .....	126
<b>7</b>	<b>Wellen-, Gezeiten- und Wasserenergie</b> .....	<b>133</b>
7.1	Wellen- und Gezeitenpotenzial für die Stromerzeugung .....	134
7.2	Umweltauswirkungen von Wellen- und Gezeitenenergie .....	143
7.3	Wasserstoffenergie .....	146
7.3.1	Wasserstoffherzeugungstechnologien .....	148
7.3.2	Auswirkungen auf die Umwelt.....	153
<b>8</b>	<b>Geothermie</b> .....	<b>157</b>
8.1	Geothermische Energieerzeugung .....	160

8.2	Umweltauswirkungen der Nutzung von Geothermie .....	170
<b>9</b>	<b>Wasserkraft</b> .....	175
9.1	Wasserkraftsysteme .....	176
9.2	Umweltauswirkungen .....	192
<b>10</b>	<b>Bioenergie</b> .....	196
10.1	Biomasse-Energie.....	196
10.2	Verbrauch von Biomasseenergie .....	198
10.2.1	Globaler Verbrauch.....	198
10.2.2	Verbrauch in der Europäischen Union .....	200
10.3	Biomassequellen für die Energieerzeugung .....	201
10.3.1	Nahrungspflanzen .....	201
10.3.2	Kohlenwasserstoffreiche Pflanzen .....	202
10.3.3	Abfall .....	202
10.3.4	Unkraut und wildes Wachstum .....	202
10.3.5	Schnell wachsende Gräser und Holzarten.....	202
10.4	Umwandlung von Biomasse in andere Energieformen.....	204
10.5	Technische Wege für die Erzeugung von verschiedenen Arten von Energie aus Biomasse .....	205
10.5.1	Thermochemische Umwandlung von Biomasse.....	205
10.5.2	Strom aus Biomassekraftwerken .....	205
10.5.3	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) .....	206
10.5.4	Verwendung von Biomasse-Vergasern .....	208
10.6	Biochemische Verarbeitung .....	209
10.6.1	Fermentation zu Ethanol.....	209
10.6.2	Ethanolproduktion aus Lignocellulose-Kulturen .....	209

10.6.3	Anaerobe Verdauung .....	210
10.6.4	Veresterung zu Biodiesel .....	210
10.6.5	Neue Technologien .....	210
10.7	Umweltauswirkungen von Biomasseenergie .....	210
10.7.1	Produktion von Biomasse .....	210
10.7.2	Land- und Wasserressourcen .....	212
10.7.3	Bodenerosion und Wasserabfluss .....	212
10.7.4	Nährstoffentfernung und –verluste .....	213
10.7.5	Verlust natürlicher Lebensräume, Lebensräume und Wildtiere .....	213
10.8	Umwandlung in nutzbare Energie .....	213
10.8.1	Umweltauswirkungen von thermischen Prozessen .....	213
10.8.2	Brennendes Holz .....	214
10.8.3	Verwendung von Biomasse für Strom und Wärme.....	214
10.8.4	Verbrennen von Siedlungsabfällen oder Holzabfällen .	215
10.8.5	Ascheentsorgung aus Müllverbrennungsanlagen.....	216
10.8.6	Sammeln von Deponiegas oder Biogas .....	216
10.8.7	Einfluss von Fermentationsprozessen; flüssige Biokraftstoffe: Ethanol und Biodiesel .....	216

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2.1 Äquivalenter Kohlendioxid-Lebenszyklus, Opportunitätskosten-Emissionen .....	37
Tabelle 3.1 Umweltauswirkungen verschiedener Emissionen .....	51
Tabelle 3.2 Zeitleiste des Klimawandels .....	56
Tabelle 4.1 Bewertung von Kernkraftwerken aus ökologischer Sicht .....	85
Tabelle 5.1 Umweltauswirkungen von kleintechnischer Solarthermie zum Heizen. ....	105
Tabelle 5.2 Umwelteinflüsse durch konzentrierende Solarenergie.....	106
Tabelle 5.3 Umweltauswirkungen von PV in seinem Lebenszyklus .....	108
Tabelle 5.4 Wasserfußabdruck pro Einheit Elektrizität aus verschiedenen Energiequellen.....	110
Tabelle 6.1. Materialeinsatz bei Windkraftanlagen .....	122
Tabelle 6.2 Umweltauswirkungen von Windenergieanlagen .....	124
Tabelle 8.1 Zusammenfassung der verschiedenen Kategorien der Direktnutzung von Geothermie weltweit für das Jahr 2015. ....	166
Tabelle 10.1 Beispiele für Biomasse und ihre Nutzung für Energie.....	204

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1 Beispiel einer Nahrungskette .....	7
Abbildung 1.2 Beispiel Nahrungsnetz .....	8
Abbildung 1.3 Ökologische Pyramiden .....	9
Abbildung 1.4 Der Wasserkreislauf .....	12
Abbildung 1.5 Der Kohlenstoffkreislauf .....	13
Abbildung 1.6 Stickstoffkreislauf .....	14
Abbildung 1.7 Phosphorzyklus .....	15
Abbildung 1.8 Schwefelkreislauf .....	16
Abbildung 1.9 Biomagnifikation .....	18
Abbildung 1.10 Transportprozess von Verunreinigungen durch das Grundwasser.....	20
Abbildung 2.1 Ökosystemdienstleistungen .....	23
Abbildung 2.2 Globaler ökologischer Fußabdruck und Biokapazität: Entwicklung des in gha .....	27
Abbildung 2.3 Aufgliederung ökologischer Fußabdruck in gha.....	28
Abbildung 2.4 Komponenten des ökologischen Fußabdrucks.....	31
Abbildung 2.5 Globaler ökologischer Fußabdruck.....	32
Abbildung 2.6 Größenvergleich des ökologischen Fußabdrucks von Energiesystemen .....	38
Abbildung 3.1 Darstellung eines Wärmekraftwerks.....	48
Abbildung 3.2 Brennstoffkettenkonzept.....	50
Abbildung 3.3 Treibhauseffekt.....	56
Abbildung 3.4 Ozonschicht.....	62
Abbildung 3.5 Ozonabbaumechanismus .....	63
Abbildung 3.6 Auswirkungen von saurem Regen in den Great Smoky Mountains Wäldern .....	66
Abbildung 4.1 Kernspaltung und Kettenreaktion .....	72
Abbildung 4.2 Globale nukleare Stromerzeugung .....	73

Abbildung 4.3 Vertikal aufgestellte Behälter aus Beton- und Stahlkonstruktionen.....	79
Abbildung 4.4 Horizontal aufgestellte Behälter .....	79
Abbildung 5.1 Solarthermische Systemkomponenten, Zwangsumlaufsystem .....	96
Abbildung 5.2 Schema eines Parabolrinnenkollektors .....	98
Abbildung 5.3 Betrieb eines Solarturms.....	99
Abbildung 5.4 Betrieb eines linearen Fresnel Kollektors .....	100
Abbildung 5.5 Betrieb eines Parabolspiegels .....	101
Abbildung 5.6 Übersicht eines netzungebunden und eines netzgebundenen PV-Systems .....	102
Abbildung 5.7 Umweltauswirkungen von Photovoltaik, konzentrierter Solarenergie und Windkraft .....	112
Abbildung 6.1 Windenergieanlage mit ihren Komponenten .....	121
Abbildung 7.1 Gezeitenstaudamm .....	136
Abbildung 7.2 Oszillierende Wassersäule .....	140
Abbildung 7.3 Wellenerfassungsgeräte .....	141
Abbildung 7.4 Umwandlung thermischer Meeresenergie .....	142
Abbildung 7.5 Gezeiten Zaun .....	144
Abbildung 7.6 Einsatzstoffe und Prozesstechnologien für die Wasserstoffproduktion .....	149
Abbildung 7.7 Prinzip der photoelektrolytischen Zelle .....	152
Abbildung 7.8 Prinzip der photobiologischen Wasserstoffproduktion .....	152
Abbildung 8.1 Trockendampfkraftwerk .....	163
Abbildung 8.2 Flash Dampfkraftwerk.....	163
Abbildung 8.3 Geothermisches Kraftwerk des binären Zyklus .....	164
Abbildung 8.4 Erdwärmepumpe .....	164
Abbildung 8.5 Vergleich der weltweiten Geothermie mit direkter Nutzung in TJ / Jahr von 1995, 2000, 2005, 2010 und 2015 .....	167
Abbildung 8.6 Europa thermal atlas .....	169

Abbildung 9.1 Reservoir Wasserkraft .....	177
Abbildung 9.2 Laufwasserkraftdiagramm .....	179
Abbildung 9.3 Pumpspeicher-Wasserkraftanlage.....	181
Abbildung 9.4 Komponenten eines Wasserkraftwerks.....	186
Abbildung 9.5 Pelton Turbine .....	187
Abbildung 9.6 Turgo Turbine .....	187
Abbildung 9.7 Francis Turbine.....	189
Abbildung 9.8 Kaplan Turbine.....	190
Abbildung 9.9 Querstrom-Turbine .....	190
Abbildung 9.10 Arten von Kleinwasserkraft nach Kopfhöhe, Abfluss oder Kapazität .....	192
Abbildung 10.1 Der Prozess der Fotosynthese.....	197
Abbildung 10.2 Globaler Endenergieverbrauch 2013 .....	199
Abbildung 10.3 Entwicklung der Primärenergieproduktion von festen Biomasse und des Inlandsverbrauchs in der EU seit 2000 (in Mio. t RÖE) .....	201
Abbildung 10.4 Biomassequellen zur Energiegewinnung.....	203
Abbildung 10.5 Biomassequellen für die Stromerzeugung .....	206
Abbildung 10.6 Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur getrennten Stromproduktion .....	207
Abbildung 10.7 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Gasmotoren	208

# 1 Zusammenhang von Strom, Umwelt- und Ökosystem

**Autor:** Başak TAŞELİ<sup>1</sup> und Evren ALTIÖK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Giresun, Ingenieurwissenschaftliche Fakultät, Bereich Umwelttechnik, Giresun, Türkei

e-mail: [basak.taseli@giresun.edu.tr](mailto:basak.taseli@giresun.edu.tr)

<sup>2</sup> Universität Giresun, Ingenieurwissenschaftliche Fakultät, Bereich Umwelttechnik, Giresun, Türkei

e-mail: [evren.altiok@giresun.edu.tr](mailto:evren.altiok@giresun.edu.tr)

**Kurzfassung:** Ökologie ist zwar so alt wie die Existenz der Menschheit, doch in der Wissenschaft eine der jüngsten Forschungsbereiche. In diesem Teil der Broschüre soll das Basiswissen der Ökologie vermittelt werden, wobei Teile des Systems genauer beleuchtet werden.

Ökologie, ökologische Zusammenhänge, aber auch der Energiefluss und der Wasserkreislauf werden genauer vorgestellt. Das Konzept der Nahrungskette und des Energieflusses in Ökosystem- und Stoffkreislauf der Biosphäre, im Nahrungsnetz und in der Nahrungskette sowie der Einfluss des Menschen auf diesen Kreislauf werden untersucht. Am Ende dieses Kapitels werden die Auswirkungen und der Transport von Schadstoffen im Ökosystem dargestellt.

## **Lernziele:**

Am Ende des Kapitels sollte der Student:

- den Terminus Ökologie beherrschen
- die Komponenten des Ökosystems benennen können
- die unterschiedlichen ökologischen Ebenen kennen
- Sowohl die abiotische als auch die biotische Struktur vergleichen können
- diskutieren können, inwiefern das Ökosystem einen Einfluss auf den Energie- und Nährstofffluss hat
- wissen, dass die Sonne maßgeblichen Einfluss auf den Nährstoff- und Energiekreislauf hat
- erklären können, was es mit der Nährstoffkette und dem Energiefluss in Ökosystemen auf sich hat
- erklären können, wie sich Materialien in der Biosphäre bewegen.
- Zwischen Nahrungskette und Nahrungsnetz unterscheiden können
- Erklären können, wie menschliche Eingriffe in den Kreislauf der Biosphäre diesen beeinflussen

## 1.1 Ökologie als Wissenschaft

Die Ökologie ist eine Teildisziplin der Biologie, sie befasst sich mit der ungestörten, wechselseitigen Beziehung der Lebewesen zueinander und zu ihrer Umwelt. Sie ist eine multidisziplinäre Wissenschaft, die, die Werkzeuge anderer Wissenschaften benutzt, um natürlich beobachtete Phänomene zu erklären.

Der Terminus Ökologie kommt aus dem Griechischen 'oikos' und bedeutet 'Haus' oder auch 'Lebensraum' und bezeichnet die Beziehung des Organismus zu seiner physischen und chemischen Außenwelt. Der griechische Terminus 'logos' bedeutet Lehre (Ambelu et al., 2007).

## 1.2 Ökologische Begriffe

**Biome/Bioregion:** eine grosse, relative unterschiedliche terrestrische Region, die durch ähnliches Klima, aber auch Boden, Flora und Fauna gekennzeichnet ist, unabhängig davon, wo auf der Erde sie sich befindet.

**Tundra:** Charakteristisch für die verschiedenen Formen der Tundra ist eine offene, zumeist baumfreie Landschaft über Permafrostböden. Je nach Typus ist diese von Flechten, Moosen, Gräsern und kleineren Sträuchern bewachsen. Etwa 5% der Landmassen gehören zur Tundra.

**Taiga:** bezeichnet den borealen Nadelwald, den nördlichsten Waldtypus der Erde, welcher nahezu flächendeckend mit Nadelhölzern bewachsen ist. Etwa 9% der Landmassen gehören zur Taiga.

**Grasland:** ist das größte Biom der Erde und bezeichnet Gebiete in denen Gräser vorherrschen

**Wüste:** Als *Wüste* bezeichnet man die vegetationslosen oder vegetationsarmen Gebiete der Erde. In *Wüsten* bedeckt die Vegetation weniger als 5 % der Oberfläche.

**Tropischer Regenwald:** ist durch seine hohe Temperatur, dem hohen jährlichen Niederschlag und seiner großen Vielfalt von Tier- und Pflanzenarten charakterisiert.

**Aquatische Biome:** Mündungen sind Teile von Gewässern, in denen sich Süßwasser aus Bächen und Flüssen und Salzwasser aus dem Ozean miteinander vermischen. Sie sind nicht nur die biologisch produktivsten Ökosysteme auf dem Planeten, sondern fungieren auch als Filter für Schadstoffe und als Schutz vor Überschwemmungen

**Habitat:** das Habitat (Lebensraum) bezeichnet den charakteristischen Aufenthaltsbereich einer bestimmten Tier- und Pflanzenart.

**Ökologische Nische:** Jeder Organismus nimmt seine eigene Rolle in der Struktur und Funktion der Gemeinschaft ein. Dieser Status oder die Rolle des Organismus im Ökosystem, wird als ökologische Nische bezeichnet. Es macht also Sinn, den Lebensraum als die Adresse des Organismus (also da wo er lebt) und die ökologische Nische als seinen Beruf (was er biologisch tut) zu betrachten.

**Nahrungskette:** stellt den direkten und indirekten Zusammenhang der Nahrungsbeziehungen im Ökosystem dar.

**Biogeochemischer Kreislauf:** physikalisch-chemische Betrachtung der Stoffverlagerung im Ökosystem.

**Eutrophierung:** Der Prozess in dem, als Folge von Überdüngung, ein Gewässer mit Nährstoffen überbelastet wird, was wiederum zu einem vermehrten Absterben von Pflanzen führt.

**Biomasse:** Gesamtmasse der in einem Lebensraum vorkommenden Lebewesen.

**Gemeinschaft:** die Gesamtbevölkerung in einem Lebensraum.

**Trophieniveau:** Kennzeichnung für eine bestimmte Stufe in einer linearen Nahrungskette im Ökosystem.

**Ökosystem:** der natürliche Lebensraum von Lebewesen. Das Ökosystem besteht aus belebten (biotischen) und unbelebten (abiotischen) Komponenten.

### 1.3 Komponenten des Ökosystems

#### Unbelebte Komponenten des Ökosystems:

Die nicht lebenden oder abiotischen Teile von Ökosystemen haben sowohl physische (Wind, Gelände, Bodenfeuchtigkeit, Wasserströmung, Temperatur, Bodenporosität etc.) als auch chemische Eigenschaften (Wasser, Gase, Mineralien und andere komplexe Chemikalien).

**Lebende Komponenten des Ökosystems:** alle lebenden Organismen.

**Produzenten (Erzeuger):** alle Grünpflanzen sind Produzenten, sie wandeln Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe von Sonnenenergie in organische Substanz um. Dieser Umwandlungsprozess wird als Photosynthese bezeichnet.



Abgesehen von Chemotrophen, sind alle Lebewesen, die keine Grünpflanzen sind, Konsumenten. Sie verbrauchen chemische Energie und Nährstoffe, die von anderen Lebewesen stammen.

**Konsumenten (Verbraucher):** Kühe essen Pflanzen und deshalb werden sie Pflanzenfresser genannt. Sie könnten auch Vegetarier genannt werden. Da sie ihre Nahrung quasi direkt vom Erzeuger beziehen, werden reine Pflanzenfresser auch als Primärverbraucher bezeichnet. Organismen, die den Pflanzenfresser fressen, werden Sekundärkonsumenten oder auch Fleischfresser genannt. Ein Tier, welches einen Sekundärkonsumenten frisst, wird auch als tertiärer Verbraucher bezeichnet.

**Destruenten (Zersetzer):** Zersetzer sind Verbraucher, die Energie und Nährstoffe erhalten, indem sie Abfallstoffe und abgestorbenes pflanzliches oder tierisches Material verdauen.

Zersetzer sind die Organismen, meist Bakterien und Pilze, die für Zerfall, Zersetzung oder Fäulnis zuständig sind. Sie sind verantwortlich für die Fertigstellung von Ökosystem-Mineralzyklen.

**Nitrifikation:** Ein Prozess, bei dem bestimmte Bodenbakterien Ammoniak oder Ammonium von Elektronen abstreifen und Nitrit ( $\text{NO}_2$ ) als Reaktionsprodukt freigesetzt wird. Andere Bodenbakterien nutzen Nitrit für den Energiestoffwechsel, wobei Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) entsteht.

**Ammonifikation:** Zersetzung von stickstoffhaltigen Abfällen und Resten von Organismen durch bestimmte Bakterien und Pilze.

**Denitrifikation:** Reduktion von Nitrat oder Nitrit, mit Hilfe von Bodenbakterien, zu gasförmigem Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und einer geringen Menge Lachgas ( $\text{NO}_2$ ).

**Stickstofffixierung:** einige Bakterien assimilieren gasförmigen Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) aus der Luft; durch Reduktionsreaktionen werden Elektronen an den Stickstoff gebunden, indem Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) oder Ammonium ( $\text{NH}_4$ ) gebildet wird.

Ökosysteme sind offene Systeme und erfordern daher kontinuierliche Energie- und Nährstoffeinträge. Die Funktionsweise eines Ökosystems umfasst eine Reihe von Zyklen, wie Wasserkreislauf, Nährstoffkreislauf etc.

**Trophische Organisation:** Ökosysteme besitzen eine Schichtstruktur, basierend auf der Anzahl der Energieübertragungen von einem Organismus zu einem anderen, weg von dem anfänglichen Energieeintrag in das System. Folglich werden alle Organismen, die sich in derselben Anzahl von Übertragungsschritten von der Energiezufuhr entfernt befinden, als auf der gleichen trophischen Ebene befindend, angesehen. Die Übertragung von Nahrungsenergie von Pflanzen auf Tiere und dann auf andere Tiere durch aufeinanderfolgende

Fütterungsstadien (trophische Ebenen), wird als Nahrungskette bezeichnet.

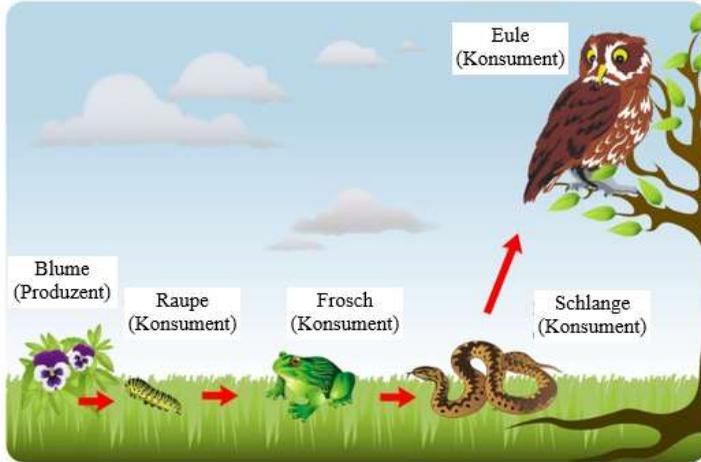


Abbildung 1.1 Beispiel einer Nahrungskette

<https://www.google.com.tr/search?q=food+chain>

Bei jedem Transfer wird in einer Nahrungskette (siehe Abbildung 1.1) ein großer Teil der potenziellen Energie, die in den chemischen Bindungen des Lebensmittels vorhanden ist, in Form von Wärme freigesetzt. Aufgrund dieses fortschreitenden Energieverlusts (im Nahrungsmittelprozess) von Wärme, wird der Gesamtenergiegehalt auf jeder nachfolgenden Ebene immer geringer. Dies begrenzt die Anzahl der Schritte in einer Nahrungskette normalerweise auf vier oder fünf. In den meisten Fällen sind die Beziehungen zwischen den beteiligten Organismen so komplex, dass die Kette in Form eines hoch komplizierten und in sich verzweigten Netzwerks namens Nahrungsnetz (vgl. Abb. 1.2) vorliegt.

Das Ökosystem kann auch als ökologische Pyramide (Nahrungspyramide) dargestellt werden. Es gibt drei unterschiedliche Arten von Pyramiden (vgl. Abb.1.3).

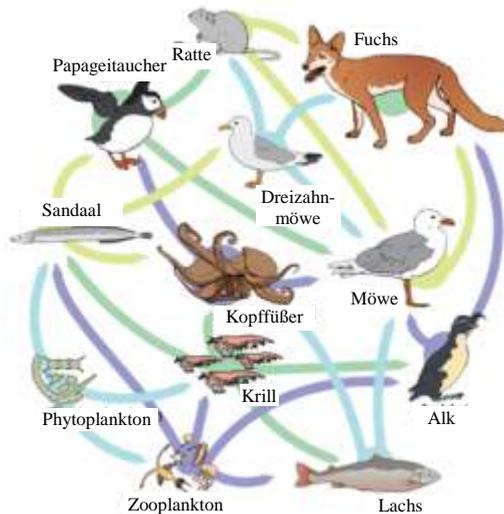


Abbildung 1.2 Beispiel Nahrungsnetz

(<https://www.google.com.tr/search?q=food+web>)

## Zahlenpyramide

Diese Pyramide wird konstruiert, indem die Anzahl der Individuen gezählt wird, die auf jeder trophischen Ebene beteiligt sind.

**Biomassenpyramide:** Abnahme der als Biomasse festgelegten organischen Substanz von einer Trophiestufe zur anderen.

**Energiepyramide:** festgelegt durch den Energiegehalt der einzelnen Trophienebenen.

## Produktivitätspyramide: Produktivitätspyramiden zeigen den Fluss von Energie im Verlauf der Nahrungskette.

### Energiepyramide

In einer Energiepyramide repräsentiert jedes Level die Energiemenge, die auf dieser trophischen Ebene verfügbar ist. Mit jedem Schritt steigt der Energieverlust um 90%.

### Biomassenpyramide

In einer Biomassenpyramide repräsentiert jede Ebene die Menge an Biomasse, die von der darüber liegenden Ebene verbraucht wird.

### Zahlenpyramide

In einer Zahlenpyramide repräsentiert jede Ebene die Anzahl der einzelnen Organismen, die von der darüber liegenden Ebene verbraucht werden.

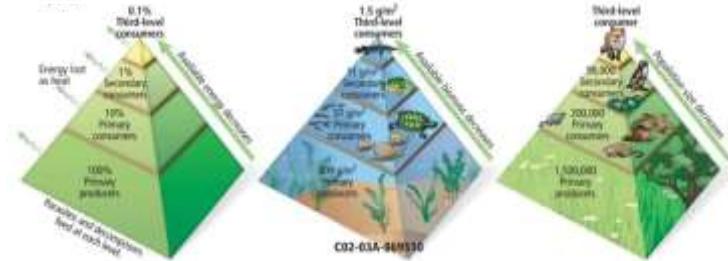


Abbildung 1.3 Ökologische Pyramiden

(<https://www.google.com.tr/search?q=food+web>)

Wenn Energie auf die nächste trophische Ebene übertragen wird, werden nur 10% davon für den Aufbau neuer Biomasse und der Rest für Stoffwechselprozesse verwendet (10%-Regel).

## Funktion des Ökosystems

Die Funktion eines Ökosystems hängt mit dem Energiefluss und dem Materialkreislauf des Ökosystems zusammen.

## Energiefluss

Letztendlich hängen die meisten Organismen von der Sonne ab da sie deren Energie benötigen um Strukturen zu schaffen und Lebensprozesse durchzuführen. Der Energietransfer durch das Ökosystem beginnt, wenn die Sonnenenergie in einer grünen Pflanze durch Photosynthese fixiert wird. Bei jedem Energietransfer in einer Nahrungskette gehen ungefähr 90% der chemischen Energie, die auf der unteren Ebene gespeichert werden, verloren und sind daher für die höhere Ebene nicht verfügbar. Da die gesamte Energiemenge, die in die Nahrungskette gelangt, durch photosynthetische Aktivierungen von Pflanzen

fixiert wird, steht Organismen, die eine niedrigere Position in der Nahrungskette einnehmen, mehr nutzbare Energie zur Verfügung als jenen auf einem höheren trophischen Niveau. Um dieses Konzept einfacher auszudrücken, könnte man zum Beispiel sagen: Mais-Rindfleisch-Mensch; 10000 Energieeinheiten - 1000 Energieeinheiten- 100 Energieeinheiten. Indem man den Menschen einen Schritt weiter in der Nahrungskette bewegt, wird zehnmal mehr Energie direkt verfügbar. Mais-Fleisch; 1000 Energieeinheiten.

## **1.4 Biogeochemischer Zyklus**

Alle lebenden Organismen sind nicht nur von einer Energiequelle abhängig, sondern auch von einer Reihe anorganischer Materialien, die ständig im Ökosystem zirkulieren. Wenn solche Moleküle synthetisiert oder abgebaut werden, während sie sich durch das Ökosystem bewegen, werden sie von einer Form in eine andere umgewandelt, dabei geht Energie verloren. Der Kreislauf von Erdmaterial durch lebende Systeme und zurück zur Erde wird als biogeochemischer Kreislauf bezeichnet. Von den 92 natürlich vorkommenden chemischen Elementen, sind etwa 40 für die Existenz von lebenden Organismen essentiell und werden als Nährstoffe bezeichnet. Die Erhaltung des Lebens auf diesem Planeten ist letztlich abhängig von der wiederholten Rückführung von anorganischen Materialien auf mehr oder weniger kreisförmigen Pfaden von der abiotischen Umgebung zu Lebewesen und zurück zur Umwelt. Ein solcher Zyklus beinhaltet eine Veränderung der Elemente von einer anorganischen Form zu einem organischen Molekül und zurück (vgl. Kumar, 1997).

### **1.4.1 Der Wasserkreislauf**

Die Sonne dirigiert den Zyklus des Wassers, sie erwärmt das Wasser der Meere, wobei einiges des Wassers verdunstet. Eis und Schnee sublimieren auf direktem Wege zu Wasserdampf.

Zunehmender Wind, Oberflächenverdunstung und Wasserdampf steigt auf und kondensiert in den Wolken, die Wolken ziehen über das Land, Wolkenpartikel kollidieren und fallen irgendwann als Niederschlag auf den Boden. Ein Teil des Niederschlages fällt in Form von Schnee, welcher in Form von Gletschern jahrtausendlang Wasser speichern kann. Ein Hauptteil des Niederschlages geht über den Ozeanen nieder, ein weiterer Teil über dem Festland. Flüsse und Grundwasserspeicher füllen sich, ebenso wie Seen, mit frischem Wasser. Nicht alle Flüsse enden in Ozeanen oder anderen Flüssen, viele versickern und werden in Grundwasserspeichern „aufgefangen“, welche dieses über eine weite Zeitperiode speichern können (vgl. Abb. 1.4).

#### **1.4.2 Der Kohlenstoffkreislauf**

Kohlenstoff ist der Grundbestandteil organischer Verbindungen. Da der Energietransfer im Verbrauch- und dem Speichern von Kohlenstoffen besteht. Kohlenstoff bewegt sich im Energiekreislauf des Ökosystems. Die Quelle von fast allem in der Atmosphäre und in Wasser gelöstem Kohlenstoff ist Kohlenstoffdioxid (Vgl. Abb. 1.4)

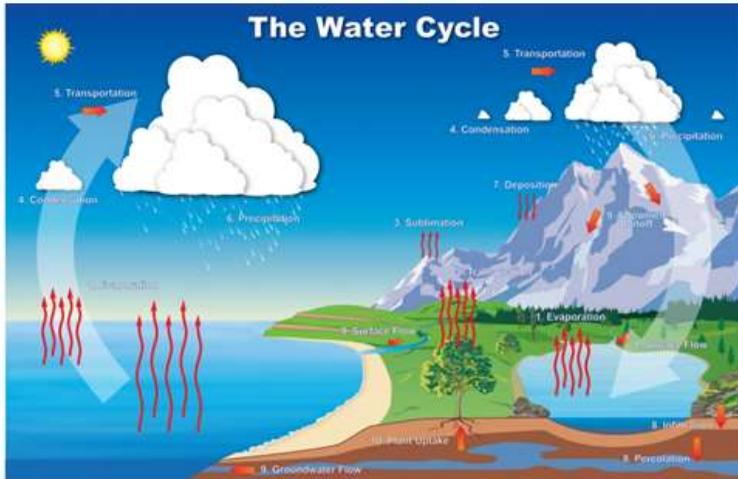


Abbildung 1.4 Der Wasserkreislauf

(<https://www.google.com.tr /search?q=biogeochemical+cycles>)

Der aus der Atmung von Pflanzen oder Tieren freigesetzte Kohlenstoff wird von einer Pflanze im Zuge der Photosynthese aufgenommen. Wenn ein Tier oder eine Pflanze stirbt, wird der darin enthaltene Kohlenstoff von Zersetzern genutzt oder kann sich in der Umwelt ansammeln, um Kohle, Öl oder Erdgas zu bilden.

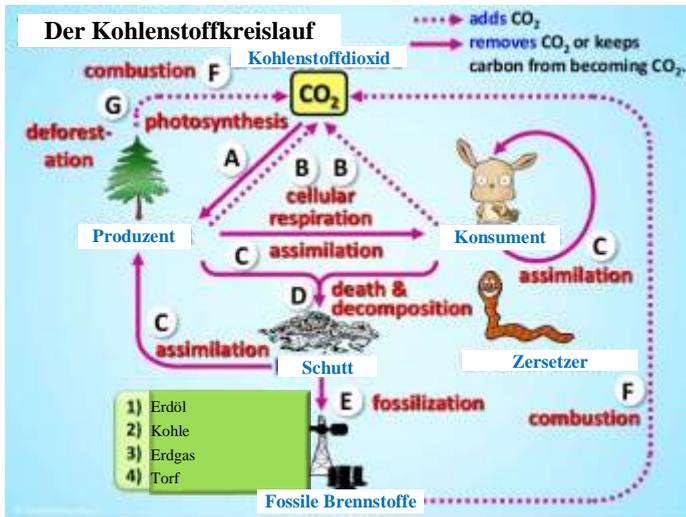


Abbildung 1.5 Der Kohlenstoffkreislauf

(<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

### 1.4.3 Der Stickstoffkreislauf

Stickstoff ist für alle Organismen von entscheidender Bedeutung da er essentieller Bestandteil in Proteinen und Nukleinsäuren ist. Das wichtigste Stickstoffreservoir ist mit etwa 78% die Atmosphäre. Stickstoffgas wird durch stickstofffixierende Bakterien und photosynthetische Cyanobakterien (Blaualgen) aus der Atmosphäre aufgenommen. Beide nehmen Stickstoff entweder in Form von Nitrat oder in Form von Ammoniak auf.

Wenn die Pflanzen oder Tiere absterben, werden sie durch Bakterien oder Pilze samt ihrer Ammoniumsäuren zersetzt wobei Ammoniakgas (NH<sub>3</sub>) freigesetzt wird. Nitritbakterien wandeln das Ammoniak in Nitratmoleküle um und Nitratbakterien im Boden produzieren Nitrate. An diesem Punkt haben Pflanzen wieder eine verwertbare Form von Stickstoff. Stickstoff wird durch denitrifizierende Bakterien aus den Nitraten im Boden entfernt und in das atmosphärische Reservoir zurückgeleitet, von wo

stickstofffixierende Bakterien ihn wieder freisetzen können (siehe Abbildung 1.6)

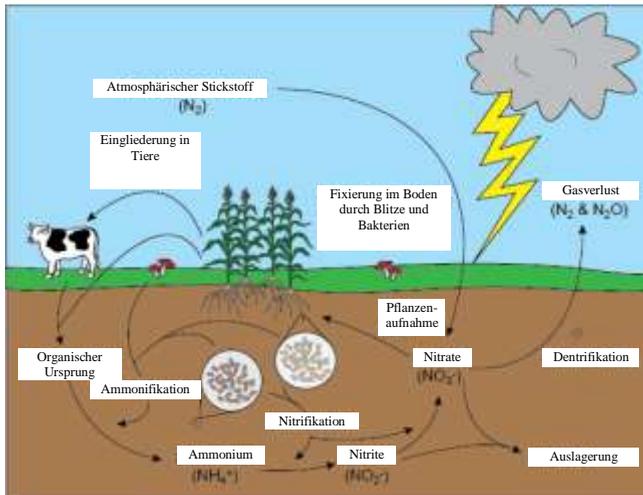


Abbildung 1.6 Stickstoffkreislauf

(<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

#### 1.4.4 Der Phosphorkreislauf

Der Phosphorkreislauf beschreibt den Kreislauf des Phosphors in der Biosphäre. Das Hauptreservoir von Phosphor stellen phosphorhaltige Gesteine dar. Die Phosphate innerhalb des Ökosystems stammen aus der Verwitterung dieses oder aus phosphorhaltigem Bestandsabfall.

Durch Niederschlag und Erosion wird Phosphat aus den Reservoiren gelöst, Pflanzen verwenden dieses durch ihre Wurzeln und absorbieren es zur zellulären Synthese.

Tiere erhalten Phosphor über die Pflanzen die sie fressen. Sie geben Phosphor durch Ausscheidung oder durch Ihren Tod in den gelösten Phosphor-Pool zurück. In gelöster Form geht jedoch eine große Menge an Phosphor verloren, da es sich auf

dem Gewässerboden absetzt. Ein Teil dieses Phosphors wird von Seevögeln zurück auf die Landoberfläche gebracht, da es durch den Konsum von Garnelen freigesetzt wird. Die Beteiligung des Menschen ist ein wichtiger Faktor im Phosphorkreislauf (siehe Abbildung 1.7). Die Folge ist, dass einige Süßwasserströme und Seen einen bioverfügbaren Phosphatüberschuss aufweisen. Da Phosphat in solchen Gewässern im Allgemeinen ein limitierender Faktor für die Photosynthese ist. Es erlaubt Wasserpflanzen also, übermäßig schnell zu wachsen. Dieser Prozess wird als Eutrophierung bezeichnet (Kumar, 1997).

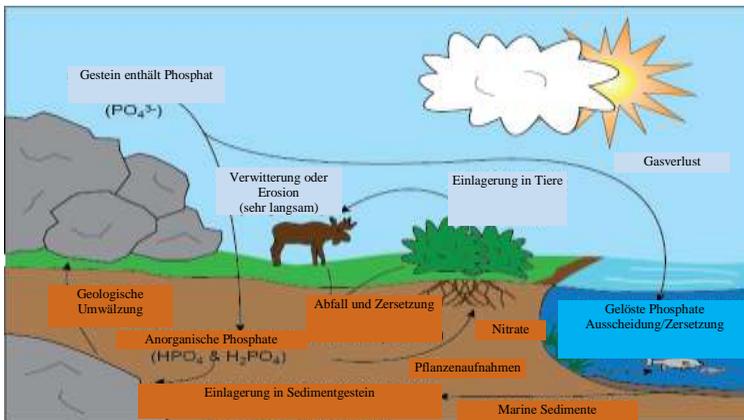


Abbildung 1.7 Phosphorzyklus

(<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

### 1.4.5 Der Schwefelkreislauf

Schwefel ist ein wesentliches Element biologischer Moleküle. Man findet ihn auf der Erde in Form von Sulfaten in Gesteinen, als freien Schwefel oder als Kombination mit verschiedenen Metallen wie Blei und Quecksilber. Mit der Verdauung scheiden Bakterien Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) aus, ein Gas dessen Geruch an faule Eier erinnert. Dieser Geruch ist ein Charakteristikum für Sümpfe und Abwasser.

Das größte Schwefelreservoir befindet sich in der Erdkruste in Form von Gips ( $\text{CaSO}_4$ ) und Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ). Süßwasser enthält Sulfat, Schwefelwasserstoff und elementaren Schwefel, die Landoberfläche enthält Sulfat, die Atmosphäre enthält Schwefeloxid ( $\text{SO}_2$ ) und vulkanische Aktivität gibt etwas Schwefelwasserstoff an die Luft ab (siehe Abbildung 1.8).

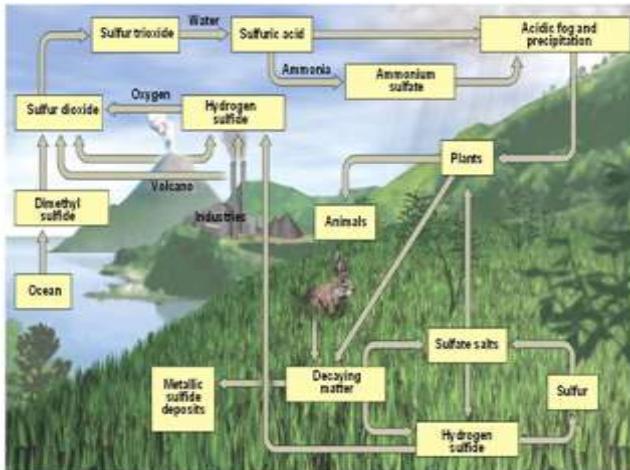


Abbildung 1.8 Schwefelkreislauf

(<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

## 1.5 Schadstoffe im Ökosystem

**Schadstoff:** Jedes Mittel, welches die Gesundheit, das Überleben oder die Aktivitäten lebender Organismen beeinträchtigt oder die Umwelt in unerwünschter Weise verändert.

**Persistente organische Schadstoffe (POP):** Persistente organische Schadstoffe sind synthetische organische Verbindungen, die in verschiedenen Produkten (von der Elektronik bis zum Automobil) verwendet werden, die in der Umwelt nur sehr langsam abgebaut werden und sich als nachteilig für diese

erwiesen haben. Das Gleiche gilt für Polychlorierte Biphenyle (PCBs) und Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT).

Wie gelangen Schadstoffe in die Umwelt?

**Punktuelle Quellen:** durch spezifische Standorte mit hochkonzentrierenden Schadstoffableitungen wie Fabriken, Kraftwerke und Abwasserleitungen.

**Nicht-punktuelle Quellen:** Vereinzelte, diffuse Schadstoffquellen wie Abflüsse von landwirtschaftlichen Feldern und Baustellen.

Faktoren die die Bewegung von Schadstoffen durch das Ökosystem beeinflussen:

Die Löslichkeit des Schadstoffs bestimmt, wie, wann und wo sich ein Schadstoff durch die Umwelt bewegt.

Wasserlösliche Schadstoffe bewegen sich schnell und weit  
Fettlösliche Schadstoffe benötigen in der Regel einen Träger, um sich durch die Umwelt aber auch in und im Körper zu bewegen.

Sobald sie im Körper sind, dringen fettlösliche Schadstoffe leicht in Gewebe und Zellen ein, wo sie sich ansammeln und als Lipidablagerungen gespeichert werden und so vor einem metabolischen Abbau geschützt sind.

Fettlösliche Schadstoffe können viele Jahre bestehen bleiben. Das Fortbestehen eines Schadstoffs ist so lange gesichert, wie lange es dauert, bis er zusammenbricht und aus dem Ökosystem entfernt werden kann.

Kunststoffe und Chlorkohlenwasserstoffe können nicht abgebaut werden.

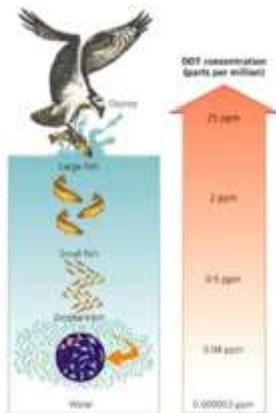
POPs sind in Ihrer Form sehr schwer abzubauen.

### **Schadstoffe in der Nahrungskette**

**Bioakkumulation:** Prozess, bei dem Zellen selektiv eine Vielzahl von Molekülen aufnehmen und speichern, indem sie Nährstoffe und essentielle Mineralien akkumulieren, schädliche

Schadstoffe aufnehmen und speichern und die Konzentration eines Schadstoffs aus der Umwelt an den nächsten Organismus der Nahrungskette weitergeben.

**Biomagnifikation:** Prozess, bei dem die Auswirkungen von Schadstoffen in der Umwelt durch die Nahrungskette verstärkt werden (siehe Abbildung 1.9). Einige Schadstoffe sind sehr stabil und resistent gegen metabolischen Abbau, sie verbleiben also lange im Organismus. Wenn ein Organismus von einem Mitglied einer höheren trophischen Ebene konsumiert wird, kann der Verbraucher nur ungefähr 10% der Biomasse der Beute (10% Regel) assimilieren, während ein großer Teil des Schadstoffs aufgrund der Löslichkeit von der Beute an den Verbraucher weitergegeben wird. Wenn sich der Schadstoff in der Nahrungskette nach oben bewegt, nimmt daher die Konzentration des Schadstoffs im Körpergewebe drastisch zu.



Je höher die Nahrungskette, desto konzentrierter werden die Pestizide. Dieser Vorgang wird Biomagnifikation (oder Bioamplifikation) genannt

Abbildung 1.9 Biomagnifikation

Quelle: <https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>

**Bewegung von Schadstoffen:** Advektion, Diffusion und Dispersion sind die Hauptprozesse, die die Schadstoffe von der Quelle wegtransportieren (siehe Abbildung 1.10).

**Advektion:** Bewegung per Luft in der Atmosphäre oder per Wasser durch ein Gewässer. Der Schadstoff bewegt sich also mit der Geschwindigkeit von strömender Luft oder Wasser.

**Diffusion:** Als Diffusion wird der Prozess bezeichnet, durch den sich Schadstoffmoleküle durch Luft oder Wasser bewegen. Was verursacht (molekulare) Diffusion? Bei einer gegebenen Temperatur (z. B. 20°C) haben die Moleküle eine bestimmte Energie, die sie in Bewegung hält. Wenn sich die Moleküle bewegen, treffen sie schließlich auf andere Moleküle. Das Auftreffen eines anderen Moleküls verändert den Pfad, in dem das Schadstoffmolekül anfänglich fließt.

Diffusion verschiebt Schadstoffe von hoher Konzentration zu niedriger Konzentration und verbreitet sie. Bestes Beispiel für die Diffusion ist: geben Sie eine kleine Menge Farbstoff in ein mit Wasser gefülltes Glas, erzeugen Sie keine Bewegung, der Farbstoff wird sich langsam gleichmäßig ausbreiten (einzige Bedingung: der Farbstoff muss die gleiche Dichte wie Wasser haben). (übernommen von <https://www.coursehero.com/file/219914/esm222-08-9-movement>)

**Dispersion:** Gebäude, Felsen im Fluss, selbst Sandkörner im Grundwasserleiter verursachen eine zusätzliche Ausbreitung von Schadstoffen. Ebenso Wind- und Wasserströmungen.

**Retardation:** Die Retardation (Verzögerung) beschreibt eine Verlangsamung eines Stoffes in Bezug auf das Medium in dem es transportiert wird. Es dauert also länger bis der Schadstoff eine bestimmte Strecke zurücklegt. Schadstoffe an bewegten Partikeln (Kolloide) können ebenfalls sorbieren und desorbieren.

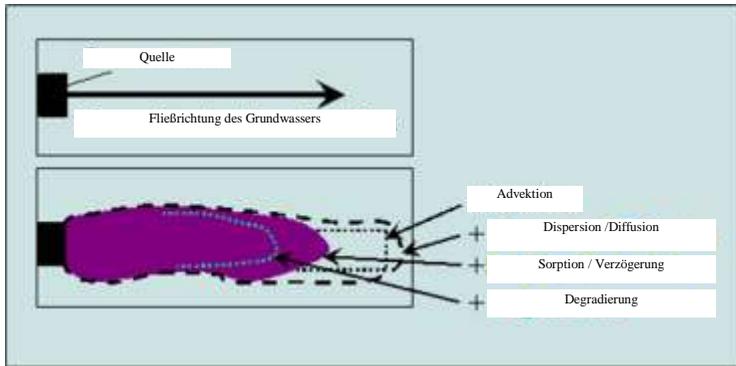


Abbildung 1.10 Transportprozess von Verunreinigungen durch das Grundwasser

(<https://www.coursehero.com/file/219914/esm222-08-9-movement>.)

## Referenzen

Ambelu A., Deboch B., & Lenjissa D., (2007). Lecture Notes on Ecology, Jimma University, in collaboration with the Ethiopia Public Health Training Initiative, The Carter Center, the Ethiopia Ministry of Health, and the Ethiopia Ministry of Education.

Kumar, H.D. (1997). Modern Concepts of Ecology. 8<sup>th</sup> Edition, USA, Vikas Publication House.

Web page (2017), retrieved from <https://www.coursehero.com/file/219914/esm222-08-9-movement>.

Web page (2017), retrieved from <https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>

## 2 Der ökologische Fußabdruck von Energiesystemen

**Autor:** Gamze YÜCEL İŞILDAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gazi Universität, Institut für Wissenschaft und Technologie, Abteilung für Umweltwissenschaften, Ankara-Türkei

e-mail: [akarakoc@gazi.edu.tr](mailto:akarakoc@gazi.edu.tr)

**Kurzfassung:** Mit der Zunahme der Bevölkerung und dem Anstieg des Konsums in vielen Teilen der Welt, hat die ökologische Belastung des Planeten zugenommen. Die natürlichen Ressourcen werden nicht mehr ausreichen, um all unseren Bedürfnissen gerecht zu werden.

Die Belastbarkeit der Natur geht an Ihre Grenzen und kann einen Großteil der erzeugten Umweltverschmutzung nicht mehr absorbieren. Es bedarf systemischer, übergreifender Bewertungen, die die konkurrierenden Anforderungen an die begrenzten Ressourcen des Planeten beachten und vergleichen können. Bezugnehmend darauf, wird in diesem Kapitel der "Ökologische Fußabdruck" diskutiert. Dieser identifiziert das ökologische Budget - die Biokapazität - und beziffert das Ausmaß, in dem der menschliche Bedarf an Biokapazität sich diesem Budget annähert oder es übertrifft.

Dieses Kapitel befasst sich des Weiteren mit dem "CO<sub>2</sub>-Fußabdruck", der die größte Komponente des ökologischen Fußabdrucks darstellt. Dieser "CO<sub>2</sub>Fußabdruck" stellt die größte Komponente des ökologischen Fußabdrucks dar, da er sich mit der Ressourcennutzung befasst. Hierbei konzentriert er sich aber ausschließlich auf die durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzten Treibhausgase. Im Weiteren werden alternative Energiesysteme in Bezug auf Ihren Ökologischen und Ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verglichen.

## **Lernziele:**

Am Ende dieses Kapitels wird der Student folgendes verstanden haben:

- die Bedeutung des ökologischen Fußabdrucks und die des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks
- die Definition des ökologischen Fußabdrucks, des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und aller verwandter Begriffe
- die Einschränkungen bei der Berechnung des ökologischen Fußabdrucks und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks
- die Komponenten des ökologischen Fußabdrucks
- den Vergleich der ökologischen Fußabdrücke von Energieerzeugungssystemen

## **2.1 Ökologischer Fußabdruck**

### **2.1.1 Notwendigkeit des ökologischen Fußabdrucks**

Boden, Wasser, Luft, Mineralien und Pflanzen, sind nur einige der natürlichen Ressourcen, die das Leben auf der Erde ermöglichen. Die Energie, die unsere Zellen antreibt, bedient die Grundbedürfnisse eines jeden Menschen. Kleidung, aber auch Nährstoffe, von denen unserer Körper lebt, die Ökosystemleistungen die unser Wasser und unsere Luft reinigen und das Klima regulieren; all diese werden durch natürliche Ressourcen bereitgestellt. Das menschliche Wohlergehen hängt von der Fähigkeit der natürlichen Systeme der Erde ab, Ökosystemgüter und -dienstleistungen bereitzustellen. Die Ökosystemdienstleistungen sind in Abbildung 2.1 zusammengefasst.



Abbildung 2.1 Ökosystemdienstleistungen

([http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/bloom\\_or\\_bust\\_report.pdf](http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/bloom_or_bust_report.pdf))

Mit der Zunahme der Bevölkerung und dem Anstieg des Verbrauchs in vielen Teilen der Welt, hat die ökologische Belastung des Planeten durch den Menschen zugenommen. Die natürlichen Ressourcen werden auf Dauer nicht mehr ausreichen, um all unseren Ansprüchen gerecht zu werden.

Überfischung, durch Kohlenstoff verursachte Klimaveränderungen, Entwaldung und der Verlust von Ackerland durch Erosion und Versalzung, sind nur einige der bekanntesten Beispiele die zeigen wie fragil das Ökosystem ist. Vor allem seit Mitte des 20. Jahrhunderts gefährden wir eine Reihe wichtiger Umweltsysteme und überschreiten die "Tragfähigkeit" der Erde.

Unter Tragfähigkeit verstehen wir die maximale Kapazität der Natur, die menschliche Bevölkerung (in Bezug auf Nahrung, Wasser, Lebensraum, Energie) und deren Aktivitäten zu "ertragen". Leider ist die Kapazität der Natur nicht in der Lage, einen Großteil der erzeugten Umweltverschmutzung zu absorbieren.

Laut dem "World Footprint-Bericht" des Global Footprint Networks (November 2015) verwendet die Menschheit heute das Äquivalent von 1,6 Planeten, um die von uns genutzten Ressourcen bereitzustellen und unsere Abfälle zu absorbieren.

Mit diesem Ansatz und Wissen ist es sicherlich notwendig, die konkreten Auswirkungen von Umweltproblemen, natürlicher Ressourcenverringering und Ressourcenverarmung zu beobachten, zu verstehen und/oder sich damit auseinanderzusetzen, um die Tragweite des Problems zu verstehen. "Messbarkeit" des menschlichen Drucks auf Ökosysteme hilft, den Menschen, die Umweltkrise erkennbar zu machen. Daher müssen empirische Messungen durchgeführt werden, um die treibenden Kräfte hinter diesen Auswirkungen zu verstehen und Wege zu finden, diese zu reduzieren und gleichzeitig das wirtschaftliche und gesellschaftliche Wohlergehen zu sichern (Galli A. et al., 2015).

Das "Ecological Footprint Accounting (EFA)" wurde als erste Annäherung an den gesamten menschlichen Druck auf die Ökosysteme der Erde verwendet (Galli 2015; Lin D. et al., 2015; Wackernagel M. et al., 2014). Der ökologische Fußabdruck ist ein notwendiges Managementinstrument, um abzuschätzen, ob die Verbrauchsrate der Menschheit die Tragfähigkeit der Erde übersteigt oder nicht; also das Ausmaß, in dem die menschliche Gesellschaft innerhalb der Regenerationsfähigkeit des Planeten bleibt oder diese übersteigt.

### **2.1.2 Ökologischer Fußabdruck und verwandte Begriffe**

Der ökologische Fußabdruck (ÖF) einer bestimmten Population, ist das Gebiet produktiver Land - und Wasserökosysteme, welches benötigt wird, um die von der Bevölkerung konsumierten Ressourcen zu produzieren und die von der Bevölkerung produzierten Abfälle zu assimilieren, unabhängig davon wo sich Land und Wasser befinden (Wackernagel M. und Rees W., 1996). Es misst die Anforderungen an produktive Bereiche

wie Ackerland, Weideland, Wälder, Meeresgebiete, bebautes Land für Wohnraum und Infrastruktur. Diese Ressourcenbilanzierung ähnelt der Lebenszyklusanalyse, bei der der Verbrauch von Energie, Biomasse (Nahrung, Fasern), Baumaterial, Wasser und anderen Ressourcen in ein normalisiertes Maß der Landfläche, als "globaler Hektar" (gha), umgerechnet wird.

Ein **globaler Hektar** ist ein biologisch produktiver Hektar, mit weltweit durchschnittlicher biologischer Produktivität gesehen auf ein bestimmtes Jahr. Globale Hektare werden benötigt, da verschiedene Landtypen unterschiedlich produktiv sind. Ein globaler Hektar, beispielsweise von Ackerland, würde eine kleinere physische Fläche besetzen als die, viel weniger produktive Fläche, von Weideland. Dies ist der Fall da mehr Weidefläche benötigt würde, um die gleiche Biokapazität wie ein Hektar Ackerland zu bieten. Da die weltweite Bioproduktivität von Jahr zu Jahr leicht variiert, kann sich der Wert eines Gha im Laufe der Jahre leicht verändern. (WWF, 2016).

In jüngster Zeit wurde dieser verschoben, um die Landnutzung zu messen, die für Populationsaktivitäten in der Biosphäre innerhalb eines bestimmten Jahres (unter Berücksichtigung des vorherrschenden Technologie- und Ressourcenmanagements) erforderlich ist (Borucke M. et al., 2013). Mit dieser Messgröße können Forscher sowohl die Biokapazität einer Region der Erde, als auch die Nachfrage an Biokapazität (ökologische Fußabdruck) erfassen.

Der "Äquivalenzfaktor" ist der Schlüsselfaktor, der es erlaubt, Land unterschiedlicher Arten in die gemeinsame Einheit von Global Hektar umzuwandeln. Diese Äquivalenzfaktoren basieren auf Bewertungen der relativen Produktivität von Land unter verschiedenen Landtypen in einem bestimmten Jahr. In den neuesten ÖF-Konten wird ein Index der Eignung für landwirtschaftliche Produktion als Proxy-Maß für die Produktionskapazität der verschiedenen Landtypen verwendet.

Innerhalb eines bestimmten Landtyps, wie z. B. Ackerland, kann die Fähigkeit eines Gebiets, verwertbare Güter und Dienstleistungen zu produzieren, aufgrund von Faktoren wie Klima, Topographie oder vorherrschendem Management stark variieren. Sogenannte Erntefaktoren ermöglichen den Vergleich verschiedener Gebiete desselben Landtypus, auf der Grundlage des gemeinsamen Nenners Ertrag. Die nationalen Ertragsfaktoren für Weideland, vergleichen beispielsweise die Produktivität von durchschnittlichen Weiden in einer bestimmten Nation, mit durchschnittlichen Weiden weltweit. Diese Ertragsfaktoren wandeln einen Hektar eines bestimmten Landtypus, wie beispielsweise Weideland einer bestimmten Nation in eine äquivalente Anzahl von Weltdurchschnittshektar desselben Landtypus (<http://www.footprintnetwork.org/faq/>) um.

Übersteigt der Ökologische Fußabdruck einer Population die Biokapazität seiner Region, so weist diese Region ein ökologisches Defizit auf. Die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen, die Land und Meer zur Verfügung stellen können (Obst und Gemüse, Fleisch, Fisch, Holz, Baumwolle für Kleidung und CO<sub>2</sub>-Absorption) übersteigt das Maß, welches die Ökosysteme dieser Region erneuern können. Eine Region mit einem ökologischen Defizit, trifft auf die Nachfrage, indem sie ihre eigenen ökologischen Vermögenswerte (z. B. Überfischung) importiert und / oder Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert. Die Folgen eines zu großen ökologischen Fußabdrucks sind offenbar: Lebensraum- und Artenverlust und Akkumulation von Kohlenstoff in der Atmosphäre (Tentensor D.P. et al., 2014). Wenn die Biokapazität einer Region ihren Ökologischen Fußabdruck übersteigt, bedeutet dies, dass sie keine ökologische Reserve hat.

In Abbildung 2.2 kann man den globalen Trend des Ökologischen Fußabdruckes und der Biokapazität (in gha) in den Jahren 1961 bis 2012 nachvollziehen. Unübersehbar ist, dass in den 1970er Jahren ein deutliches Übernutzen der natürlichen

Ressourcen einsetzte und seitdem die Nachfrage der Menschheit nach diesen stetig gestiegen ist.

Die menschliche Nachfrage nach den regenerativen Kapazitäten der Erde wird voraussichtlich weiter steigen und diese bis 2020 um etwa 75 Prozent übersteigen. Eine Abkehr dieser Entwicklung erfordert erhebliche Veränderungen in Technologie, Infrastruktur und von unser aller Verhalten. Erklärtes Ziel muss sein, weniger ressourcenintensiv zu leben (WWF, 2016).

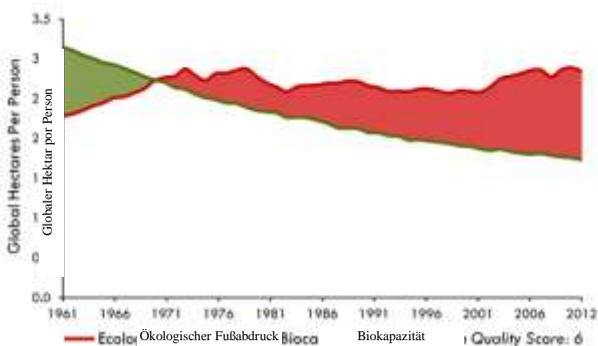


Abbildung 2.2 Globaler ökologischer Fußabdruck und Biokapazität: Entwicklung des in gha

(<http://www.footprintnetwork.org/content/images/trends/2016/world.png>)

Eine Aufgliederung des ökologischen Fußabdruckes ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

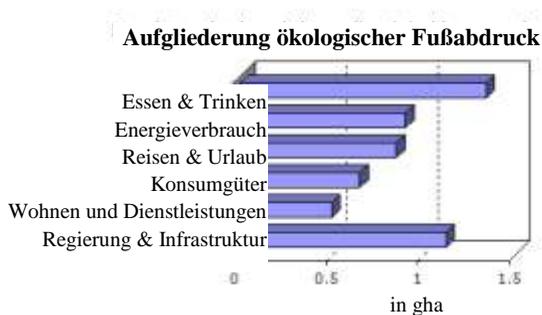


Abbildung 2.3 Aufgliederung ökologischer Fußabdruck in gha  
 (<http://info.cat.org.uk/questions/low-impact-living/what-ecological-footprint/>)

### 2.1.3 Gebrauch von ÖF-Daten

Ökologische Fußabdruck-Ergebnisse zeigen, wie weit die Menschheit von einem sicheren und gerechten Betrieb entfernt ist (Dearing J.A. et al., 2014). Daraus resultiert eine Übernutzung natürlicher Ressourcen und ökologischer Dienstleistungen, die als Frühwarnung für Umweltschutz und Nachhaltigkeit von unmittelbarer Relevanz sind.

#### Ergebnisse Ökologischer Fußabdruck:

- Informieren Sie sich darüber, in welchem Umfang ein Land / eine Stadt / Person / Einrichtung mehr oder weniger als sein verfügbares Land nutzt
- Versuchen sie Zukunftsszenarien bezüglich menschlicher Bedürfnisse und der weiteren Entwicklung des Ökosystems durchzuspielen
- Versuchen Sie die Menschheit von einer Überschreitung der natürlichen Grenzen abzuhalten und sie auf einen nachhaltigen Weg zu führen (nachhaltigeres Haushalten mit Nahrung/Energie ebenso wie Produktivität von Ökosystemen zu erhalten oder gar zu steigern)

- Wird der Ökologische Fußabdruck als nützliches Instrument genutzt, um Menschen über Tragfähigkeit und Überkonsum aufzuklären und um damit eine Verhaltensänderung in Richtung Natur zu bewirken?
- Beteiligen Sie öffentliche Akteure bei der Veränderung von Fußabdruckdiagnosen, in dem Sie Ihr Wissen in sektorspezifische politische Vorschriften und wirtschaftliche Entscheidungsfindung einfließen lassen.

Der ökologische Fußabdruck eignet sich als brauchbares Planungsinstrument bei Entscheidungen über langfristige Investitionen.

Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass ÖF-Berechnungen einige Einschränkungen aufweisen (Galli A. et al., 2016). Der ÖF verwendet nur einen Parameter, nämlich den der Biokapazität, um die Abhängigkeit des Menschen von komplexen und voneinander abhängigen Umweltsystemen zu veranschaulichen. Es berücksichtigt nicht alle Umweltbelastungen und -konsequenzen, die mit dem menschlichen Konsum zusammenhängen, wie zum Beispiel Umweltverschmutzung und Verlust von Lebensraum (Galli A. et al., 2012). Es ist ein Ansatz, der eine Momentaufnahme der Ressourcennutzung einer Gemeinschaft zu einem bestimmten Zeitpunkt macht. Dennoch werden historische ökologische Daten benötigt, um Vergleiche zwischen Raum und Zeit zu ermöglichen (Marazzi L., 2017). Der ÖF ermöglicht einen Einblick in eine Mindestvoraussetzung an Nachhaltigkeit und ob die menschlichen Konsumaktivitäten innerhalb der biologischen Schwelle liegen, die durch die Biokapazität der Erde definiert wird (Lin et al., 2015). Der Ökologische Fußabdruck ist nicht nur ein Maß für den menschlichen Einfluss, sondern auch ein Maß für die Nachhaltigkeit bestimmter Managementpraktiken. Es ist ein Buchhaltungssystem, welches die menschliche Nachfrage an die Ökosysteme der Erde mit dem vergleicht, was diese Ökosysteme aus sich heraus erneuern können. Angesichts dieses Wissens, sollten ÖF-Konten als

nützlicher, aber nicht ausreichender Mindestreferenzrahmen dienen, der die Anforderungen der Menschheit an die Natur zu veranschaulichen versucht (Galli, 2016).

#### **2.1.4 Komponenten des ökologischen Fußabdrucks**

Bei der ökologischen Fußabdruckbilanzierung, werden sechs Fußabdruckkomponenten in Übereinstimmung mit den wichtigsten Landnutzungstypen unterschieden. Sie alle basieren auf sechs Ökosystemleistungen für das menschliche Wohlergehen: pflanzliche Nahrungsmittelproduktion, tierische Nahrungsmittelproduktion, Fischproduktion, Holzproduktion, Wohnraumversorgung und energiebezogene CO<sub>2</sub>-Absorption (Galli A. et al., 2012; Kitzeset J. Et. al., 2009). Die Komponenten werden mit Äquivalenzfaktoren gewichtet, bevor sie zur Gesamtsumme addiert werden. Der ökologische Fußabdruck ist daher ein landgestützter, zusammengesetzter Indikator (Wackernagel und Rees, 1996; Steen-Olsen et al., 2012). Abbildung 2.4 zeigt und erläutert die Komponenten des ökologischen Fußabdrucks.

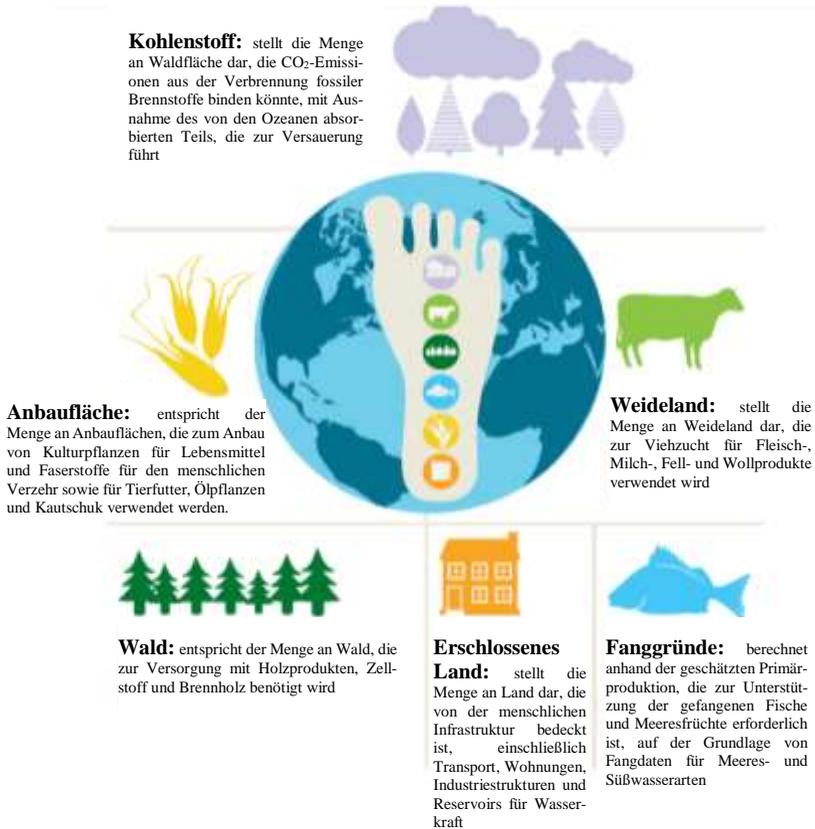


Abbildung 2.4 Komponenten des ökologischen Fußabdrucks

(WWF, 2016)

## 2.2 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Die Gliederung des ökologischen Fußabdrucks in seine einzelnen Komponenten zeigt, wie jeder einzelne zur globalen Nachfrage der Menschheit auf dem Planeten beiträgt. Die wohl bekannteste Komponente des ÖF ist der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Dies ist der größte und folgenschwerste Fußabdruck. Der Anstieg beim

CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (+260%), läßt sich auf die zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe, dem Mehrbedarf von Elektrizität und der Nutzung von energieintensiven Rohstoffen zurückführen. Sehr stark zugenommen hat auch die Größe des Ackerland-Fußabdrucks mit einem Plus von 125% (WWF, 2016). Das zunehmende Interesse am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, ist auf das wachsende Bewusstsein der Öffentlichkeit für die globale Erwärmung zurückzuführen.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck kann wie folgt definiert werden: der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zeigt das Land, welches benötigt wird, um das CO<sub>2</sub> zu absorbieren, welches bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und anderer Quellen freigesetzt wird (WWF, 2016). Dieser Terminus wird üblicherweise verwendet, um die Gesamtmenge an CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasemissionen zu beziffern, für die eine Person, Gruppe oder Organisation verantwortlich ist. Die Definitionen variieren in Bezug darauf, welche Aktivitäten und Treibhausgase in den Umfang einer Bewertung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks einbezogen werden sollten und wie detailliert diese sind. Einige CO<sub>2</sub>-Fußabdruck-Definitionen ziehen beispielsweise nur Kohlendioxid mit in die Berechnung ein (Global Footprint Network, 2007). Andere Definitionen und Methoden umfassen alle Kyoto-Treibhausgase und messen Emissionen in Form von Kohlendioxidäquivalenten, wie zum Beispiel der "Carbon Trust" (2007).

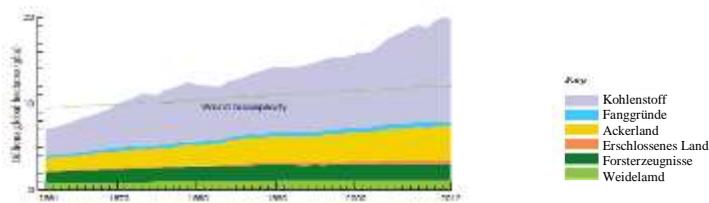


Abbildung 2.5 Globaler ökologischer Fußabdruck  
(WWF, 2016)

Die Abbildung 2.5 zeigt, dass CO<sub>2</sub> die dominierende Komponente des menschlichen Fußabdrucks ist (43 Prozent im Jahre 1961 bis auf 60 Prozent im Jahr 2012). Hauptursache für den Anstieg ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl und Erdgas). Die grüne Linie repräsentiert die Fähigkeit der Erde, Ressourcen und ökologische Dienstleistungen (Biokapazität) zu produzieren. Dass diese leicht ansteigt, liegt an der erhöhten Produktivität in der Landwirtschaft (Global Footprint Network, 2016). Die Daten sind in globalen Hektar (gha) angegeben. (WWF, 2016)

Trotz seines Namens wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck nicht in Fläche sondern in der Maßeinheit (kg) gemessen. Die Gesamtmenge der Treibhausgase wird in Gewichtseinheiten gemessen und es findet keine Umwandlung in eine Flächeneinheit (ha, m<sup>2</sup>, km<sup>2</sup> usw.) statt. Jede Umwandlung in eine Landfläche müsste auf einer Reihe von Annahmen basieren, die die Unsicherheiten und Fehler im Zusammenhang mit einer bestimmten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck-Schätzung erhöhen würden. Wenn nur CO<sub>2</sub> enthalten ist, ist die Einheit kg CO<sub>2</sub>. Wenn andere Treibhausgase enthalten sind, ist die Einheit kg CO<sub>2</sub>-e, ausgedrückt also in der Masse der CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Diese werden berechnet, indem die tatsächliche Masse eines Gases mit dem Faktor der globalen Erwärmung für dieses spezielle Gas addiert werden.

Im Rahmen einer vollständigen ökologischen Fußabdruckberechnung, werden Daten zu Kohlendioxidemissionen in das Gebiet übertragen, welches für die Aufnahme dieser CO<sub>2</sub>-Emissionen benötigt wird (Monfreda C. et al., 2004). Dieser globale Hektar-basierte CO<sub>2</sub>-Fußabdruck kann dann zu anderen Komponenten des ÖFs hinzugefügt werden, wie z. B. dem "Coopland Footprint" und den Fußabdruck der Fischgründe, um den ökologischen Gesamtfußabdruck einer Population oder Aktivität zu erhalten.

Es ist allgemein anerkannt, dass die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA), nützliches Werkzeug zur Berechnung des

CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ist (Wiedmann T. und Minx J., 2008). Dennoch bleibt die Kritik am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bestehen. Die bekannteste Kritik ist, dass die große Nachfrage nach detaillierten Daten die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigt, insbesondere in Situationen, in denen nur extrem wenig Daten zur Verfügung stehen und dies zu Unterschätzungen führen kann (Chakraborty D. und Roy J., 2013; De Benedetto L. und Klemes J., 2009).

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die fehlende Berücksichtigung von Kohlenstoffsequestrierungsflächen die Gefahr birgt, irdische Rückkopplungsprozesse (abrupte Degradation von Wäldern, Veränderungen der Vegetationsverteilung und des ozeanischen Flusses) die den globalen Kohlenstoffkreislauf beeinflussen, vernachlässigen (Fang K. et al., 2013).

### **2.3 Ökologischer Fußabdruck der Energieerzeugungssysteme**

Energieverbrauch und -nachfrage steigen aufgrund des Bevölkerungswachstums kontinuierlich an. Alle Formen der Energieerzeugung haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Luft, das Wasser und das Land. Wohn-, Arbeits-, Freizeit- und Dienstleistungssektor verbrauchen immer noch große Mengen an Energie und produzieren somit hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wenn man bedenkt, dass etwa 80% unserer derzeitigen Primärenergie aus fossilen Energieträgern stammt, werden die Umweltauswirkungen energieerzeugender Systeme immer bedeutsamer. Neben dem wachsenden Energiebedarf, ist die durch den ansteigenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß bedingte Gefährdung der Umwelt und der menschlichen Gesundheit (durch den Klimawandel), eine internationale, sowohl wissenschaftlich als auch politische Herausforderung.

Um die jeweilige Umweltbelastung der Energiesysteme zu bewerten, müssen die vollständigen Energieversorgungsketten unter Berücksichtigung aller Systemkomponenten und über alle Wirkungskategorien betrachtet werden. Als Hilfsmittel zur

Ressourcenbuchhaltung kann der ÖF dazu beitragen, die wichtigsten Umweltauswirkungen der gesamten Energieerzeugung zu ermitteln und die Auswirkungen alternativer Energiesysteme zu vergleichen. Hierbei werden fossile Brennstoffe, erneuerbare Energien und Kernkraft verglichen.

Dabei sollte folgendes berücksichtigt werden:

Wieviel Landfläche wird benötigt um die Energie zu generieren?

Wie verändern sich die Anforderungen an die Landfläche bei erneuerbaren und bei nicht-erneuerbaren Energiequellen?

Wie hoch sind die Kosten an Mehrbedarf von Fläche?

Was genau muss überwacht werden, um die Auswirkungen von Energieerzeugungsanlagen auf Ökosysteme, menschliche Gesundheit und soziale Systeme zu erkennen?

In diesem Abschnitt werden die Umweltauswirkungen von fossilen Brennstoffen, erneuerbaren Energien und Kernenergiesystemen diskutiert und in Bezug auf Lebenszyklen, ÖF und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verglichen.

### **2.3.1 Vergleich der Energieerzeugungssysteme**

Methodisch betrachtet ist es eine große Herausforderung, die verschiedenen Energieerzeugungssysteme miteinander zu vergleichen. Dies liegt daran, dass sie auf höchst unterschiedliche Quellen zur Energieerzeugung zurückgreifen.

Konventionelle Energietechnologien basieren meist auf fossilen Ressourcen wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Diese Technologien belasten die Umwelt während des Verbrennens am meisten. Sie emittieren CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre und belasten damit das globale Klima massiv.

Auch Erneuerbare Energien wie Windkraft, Solarthermie, Photovoltaik und Wasserkraft haben Auswirkungen auf die

Umwelt. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Bau und der Installation von Anlagen wie PV-Modulen, Windturbinen und Solarkollektoren. "Erneuerbare-ressourcenbasierte-Energie-technologien" repräsentieren eine sehr vielfältige Palette von Technologien mit großen Unterschieden, sowohl in ihrem Gesamtdruck als auch in der Verteilung dieses Drucks auf verschiedene Wirkungskategorien der Umwelt.

Es gibt mehrere Methoden, die zur Bewertung von Umweltauswirkungen von erneuerbaren Energien herangezogen werden können. Diese Methoden sind: MIPS (Materialeinsatz pro Serviceeinheit), CML-Methode, CED (kumulativer Energiebedarf) und der ökologische Fußabdruck. Ein "ökologisch-räumlicher Fußabdruck" erneuerbarer Energiearten kann in Verbindung mit CO<sub>2</sub>-Fußabdruckmodellen verwendet werden, um die tatsächlichen Kosten (und Vorteile) erneuerbarer Energie für die Menschheit zu verstehen (Burger J. und Gochfeld M., 2012).

Für eine vollständige Umweltverträglichkeitsprüfung wird ein Analysewerkzeug benötigt, welches Stoffströme, Energieströme und Emissionen miteinbezieht. Dies erfordert eine zusammengefasste Messung (um einen Vergleich zu ermöglichen), unter transparenter und wissenschaftlicher Betrachtung.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der vergleichenden Studien zu Umweltwirkungen der Energiesysteme unter Verwendung von Ökobilanzen und dem ÖF zusammengefasst. Die Tabelle 2.1 zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Lebenszyklus pro kWh erzeugten Stroms für die betrachteten Stromquellen (alle Technologien außer die der Biokraftstoffe).

Tabelle 2.1 Äquivalenter Kohlendioxid-Lebenszyklus, Opportunitätskosten-Emissionen

Technologie	Lebenszyklus	Opportunitätskosten von Emissionen	Krieg / Terrorismus (nuklear) oder CCS	Gesamt
PV	19–59	0	0	19–59
CSP	8.5–11.3	0	0	8.5–11.3
Wind	2.8–7.4	0	0	2.8–7.4
Geothermie	15.1–55	1–6	0	16.1–61
Wasserkraft	17–22	31–49	0	48–71
Wellenkraft	21.7	20–41	0	41.7–62.7
Gezeiten	14	20–41	0	34–55
Nuklear	9–70	59–106	0–4.1	68–180.1
Kohle - CCS	255–442	51–87	1.8–42	307.8–571

Quelle: Jacobson M.Z., 2008

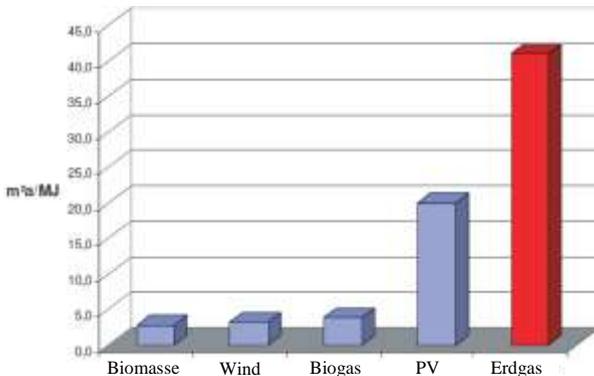
Die Tabelle 2.1 zeigt, dass Kohle die größte Auswirkung hat (fast 10 Mal so hoch wie bei PV-Modulen). An zweiter Stelle steht der Einfluss von Photovoltaik, dicht gefolgt vom Einfluss der Geothermie. Der Wirkungsbereich der Kernkraft ist sehr hoch und wird in Abschnitt 2.4 genauer erläutert und ist schwer zu vergleichen. Die klimarelevanten Lebenszyklusemissionen treten nur bei der Errichtung, Installation, Wartung und Stilllegung der Technologie auf. Bei Geothermie entstehen Emissionen auch durch Verdampfung von gelöstem CO<sub>2</sub> aus heißem Wasser in Flash- oder Drysteam-Pflanzen, nicht jedoch in binären Pflanzen. Bei Mais-Ethanol, Zellulose-Ethanol, Kohle-CCS (Carbon Capture and Storage) und Kernkraft entstehen zusätzliche Emissionen während des Abbaus und der Produktion des Brennstoffs. Bei Biokraftstoffen und Kohle-CCS treten Emissionen auch als Abgaskomponente bei der Verbrennung auf (Jacobson, 2008).

In der Studie von Kettl et. al. (2011) wurde der “Sustainable Process Index (SPI)” dazu verwendet, um Fragen zur ökologischen Machbarkeit verschiedener Technologien und ihrer

Ressourcen zu beantworten. Er untersuchte, ob Systeme, auf der Grundlage erneuerbarer Energien, im Vergleich zu fossilen Energietechnologien, tatsächlich geringere Auswirkungen auf die Umwelt haben, wenn der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt wird. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 2.6) deuten darauf hin, dass selbst eine "saubere" fossile Technologie wie die der Erdgasturbine, einen höheren Druck ausübt als alle anderen erneuerbaren Ressourcen. Der Unterschied liegt nicht nur in den Auswirkungen, sondern auch in den Faktoren; die mit Erdgas-Technologie erzeugten Strom (41,0m<sup>2</sup>a / MJ) um das 10,8-fache der Biogas-Technologie (3,8m<sup>2</sup>a / MJ). Somit ist die Auswirkung immernoch zweimal höher als die der Photovoltaik mit der "schlechtesten" erneuerbaren Technologie (PV mit 19,9m<sup>2</sup>a / MJ).

Abbildung 2.6 Größenvergleich des ökologischen Fußabdrucks von Energiesystemen

(Kettl, et al., 2011)



\*Die Einheit m<sup>2</sup>a/MJ bezeichnet die Fläche des Fußabdrucks pro Produktionsjahr und produziertem Megajoule.

Folgendes sollte jedoch im Hinterkopf behalten werden: Nugent und Sovacool haben im Jahr 2014 153 Lebenszyklusstudien zu erneuerbaren Energien, insbesondere von Wind und Sonne, kritisch überprüft. Sie haben herausgefunden, dass:

"Eine Spanne von Emissionsintensitäten gibt es bei jeder Technologie, von einem niedrigen Wert von 0,4 g CO<sub>2</sub>-Äq / kWh bis zu einem Höchstwert von 364,8 g CO<sub>2</sub>-Äq / kWh für Windenergie mit einem Mittelwert von 34,11 g CO<sub>2</sub>-Äq / kWh. Für die Solarenergie ergibt sich eine Bandbreite von 1 g CO<sub>2</sub>-Äq / kWh bis 218 g CO<sub>2</sub>-Äq / kWh". Dies bedeutet, dass viele Ökobilanzen dazu neigen, in ihren Entscheidungskriterien subjektiv zu sein und scheinbar von verschiedenen internen und externen Faktoren beeinflusst werden. Selbst objektiv hergestellte vorurteilsfreie Langzeitbetrachtungen, können aufgrund von Unterschieden in ihrer Methodik, diametral entgegengesetzte Ergebnisse liefern.

## **2.4 Kernenergie**

Die Kernenergieerzeugung hat einen relativ geringen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Da keine Verbrennung stattfindet (die Wärme wird durch die Spaltung von Uran oder Plutonium erzeugt), machen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Betrieb weniger als 1% der Gesamtemissionen aus. Die meisten Emissionen treten während des Uranbergbaus, der Anreicherung und der Brennstoffherstellung auf. Die Stilllegung macht 35% der CO<sub>2</sub>-Emissionen der gesamten Lebensdauer aus und umfasst Emissionen, die durch den Rückbau des Kernkraftwerks und den Bau und die Wartung von Abfallendlagern entstehen. Die energieintensivste Phase des Atomzyklus ist die Urangewinnung, die 40% der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen ausmacht (Parlamentsbüro für Wissenschaft und Technologie, 2006). Die Ergebnisse von Poinssot et al., (2014) heben erneut hervor, dass die Kernenergie die geringsten Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen hat (etwa 5,3 g / kWh). Diese sind im Vergleich 100 Mal geringer als die Auswirkungen der fossilen Energie und 8 Mal geringer als die der Photovoltaik. Bei der Betrachtung der Luftverschmutzung (SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub>) hat die Kernenergie höhere Werte als Wasser- und Windstrom, aber immer noch weniger als PV und die der fossilen Energien.

Betrachtet man potenzielle Wirkungsindikatoren (Versauerung, Eutrophierung und POPC) liegen die Zahlen für die Kernenergie systematisch an zweiter Stelle, wobei die Auswirkungen höher sind als die der Wasserkraft, aber geringer als bei allen anderen Energiequellen. Auch wenn der Abbau starke Auswirkungen hat, wird davon ausgegangen, dass die Landnutzung der Kernenergie am niedrigsten ist. Umgekehrt sind die Zahlen für den Wasserverbrauch und den Ausstieg aus der Kernenergie im Bereich der fossilen Energien, deutlich höher als bei anderen Energiequellen. Die durch die Kernenergie erzeugten technologischen Abfälle sind um etwa 1000 Mal niedriger als bei den fossilen Energien, aber immer noch zehnmal höher als die der erneuerbaren Energien. Dies steht in direktem Zusammenhang mit der Größe der Infrastruktur (Anlagen), die für den Betrieb des gesamten Brennstoffkreislaufs (insbesondere der Reaktoren) benötigt werden.

Katastrophale Ereignisse in Atomkraftwerken wie in Tschernobyl (UdSSR 1986) und Fukushima (Japan, 2011) haben und hatten, sowohl auf regionaler als auch auf globaler Ebene, enorme Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Die Gesellschaft hat große Angst und Sorge vor solchen Ereignissen. Diese sind zwar sehr unwahrscheinlich, jedoch haben sie bei Eintritt erhebliche Konsequenzen. Die vollen Lebenszykluskosten des Betriebs einer Nuklearanlage können außerdem sehr hoch sein. Die Lebenszykluskosten umfassen Abbau, Vermahlung, Anreicherung und Verarbeitung (mit entsprechenden Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit), sichere Transportkorridore (die eine neue Infrastruktur erfordern) und das ungelöste Problem der Endlagerung, welche erhebliche unterirdische Landnutzung mit sich bringen kann (Burger J. und Gochfeld M., 2012).

Tatsächlich gibt es in der wissenschaftlichen Literatur keinen Konsens über den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bestehender Kernreaktoren. Die Studien zur Ermittlung des ÖF der Kernenergie sind

umstritten. Methodologische und kontextuelle Inkonsistenzen zwischen den vielen veröffentlichten Kernenergie-Langzeitstudien haben zwar zu weitreichenden Ergebnissen geführt, sie erschweren aber einen direkten Vergleich und damit ein kollektives Verständnis (Warner E. und Garvin H., 2012).

Die Ergebnisse sind oft ungenau und spekulativ. Im Jahr 2012, vier Jahre nach Sovacools Paper (2008), fanden Ethan Warner und Garvin Heath 274 Papiere mit nuklearen Langzeitstudien. Sie haben diese zur genaueren Betrachtung auf 27 heruntergebrochen. Diese ergaben 99 Abschätzungen vom Ökologischen Fußabdruck, die die Autoren als "unabhängig" bezeichnen. Ihre Daten für Kohlenstoffemissionen lagen zwischen 4 und 220 g CO<sub>2</sub>/kWh. Sie haben keinen Mittelwert, sondern einen Medianwert angegeben: die Hälfte der Schätzungen lag unter 13 g CO<sub>2</sub>/kWh. Diese beiden Rezensionen der veröffentlichten Literatur ergaben widersprüchliche Ergebnisse. Einer legt nahe, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck über dem CCC-Grenzwert liegt, der andere deutlich darunter ([http://www.theecologist.org/News/news\\_analysis/2736691/false\\_solution\\_nuclear\\_power\\_is\\_not\\_low\\_carbon.html](http://www.theecologist.org/News/news_analysis/2736691/false_solution_nuclear_power_is_not_low_carbon.html)).

Der Status der Kernenergie als kohlenstoffarme Stromquelle ist zweifelhaft; während sie im Vergleich zu herkömmlichen fossilen Brennstoffen wie Kohle günstig ist, schafft die logistische Kette für die Gewinnung und Verarbeitung von Uran, den Anlagenbau und die Stilllegung von Anlagen einen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der deutlich größer ist als der aus erneuerbaren Quellen ([https://www.cse.org.uk/downloads/reports-and-publications/planung/renewables/common-concerns\\_about\\_wind\\_power.pdf](https://www.cse.org.uk/downloads/reports-and-publications/planung/renewables/common-concerns_about_wind_power.pdf)).

Die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu begrenzen oder gänzlich unabhängig davon zu werden und damit eine sukzessive Umstellung auf erneuerbare Energiequellen einzuleiten, bietet eine große Chance, den Fußabdruck der Menschheit auf eine Größe zu reduzieren, die die Erde "ertragen" kann.

## Referenzen

Borucke, M., Moore, D., Cranston, G., Gracey, K., Iha, K., Larson, J., Lazarus, E., Morales, J.C., Wackernagel, M., Galli, A. (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: the national footprint accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, (24), 518–533.

Galli, A., Lin, D., Wackernagel, M., Gressot, M. and Winkler, S. (2015). Brief for GSDR – Humanity's growing Ecological Footprint: sustainable development implications. Global Footprint Network.

Burger, J. and Gochfeld, M. (2012). A conceptual framework evaluating ecological footprints and monitoring renewable energy: wind, solar, hydro, and geothermal. *Energy and Power Engineering*, (4), 303-314.

Chakraborty, D. And Roy, J. (2013). Energy and carbon footprint: numbers matter in low energy and low carbon choices. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, (5), 1–7.

De Benedetto, and L., Klemes, J. (2009). The environmental performance strategy map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process. *Journal of Cleaner Production*, (17), 900-906.

Dearing, J.A., Wang, R., Zhang, K., Dyke, J.G. and Haberl, H. (2014). Safe and just operating spaces for regional social-ecological systems. *Global Environmental Change*, (28), 227-238.

Fang, K., Heijungs, R. and De Snoo, G. (2013). The footprint family: comparison and interaction of the ecological, energy, carbon and water footprints. *Revue de Métallurgie*, (110), 77–86.

Galli, A., Wiedmann, T.O., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B.R. and Giljum, S. (2012). Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators:

definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, (16), 100–112.

Galli, A. (2015). On the rationale and policy usefulness of ecological footprint accounting: the case of Morocco. *Environmental Science & Policy* (48), 210–224.

Jacobson, M. Z. (2008). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy and Environmental Science*, (2), 148–173.

Kettl, K., Niemetz, N., Sandor, N., Eder, M. and Narodoslowsky, M. (2011), Ecological Impact of Renewable Resource-Based Energy Technologies. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, (1), 1-5.

Kitzes, J., Galli, A., Bagliani, M., Barrett, J., Dige, G., Ede, S., Erb, K., Giljum, S., Haberl, H. And Hails, C. (2009). A research agenda for improving national ecological footprint accounts. *Ecological Economics*, (68), 1991–2007.

Lin, D., Galli, A., Borucke, M., Lazarus, E., Grunewald, N., Martindill, J., Zimmerman, D., Mancini, S., Iha, K. and Wackernagel, M. 2015. Tracking supply and demand of biocapacity through ecological footprint accounting. *Sustainability Assessment of Renewables- Based Products: Methods and Case Studies*, 179–200.

Marazzi, L. (2017). *Our Ecological Footprint*, Macat International Ltd.

Monfreda, C., Wackernagel, M. and Deumling, D. (2004). Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity accounts. *Land Use Policy*, 231-246.

Nugent, D. and Sovacool, B.K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, (65), 229-244.

- Parliamentary Office of Science and Technology, Postnote. (2006). Carbon footprint of electricity generation. Number 268
- Sovacool, B.K. (2008). Valuing the greenhousegas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36(8), 2950-2963.
- Steen-Olsen, K., Weinzettel, J., Cranston, G., Ercin, A.E. and Hertwich, E.G. (2012). Carbon, land, and water footprint accounts for the european union: consumption, production, and displacements through international trade. *Environmental Science & Technology*, (46), 10883-10891.
- Tittensor, D.P., Walpole, M., Hill, S.L.L., Boyce, D.G., Britten, G.L., Burgess, N.D., Butchart, S.H.M., Leadley, P.W., Regan, E.C. and Alkemade, R. (2014). A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science* 346 (6206): 241–244.
- Wackernagel, M., Cranston, G., Morales, J. C. and Galli, A. (2014). Ecological footprint accounts, In: Atkinson, G., Dietz, S., Neumayer, E., Agarwala, M. (Eds.), *Handbook of Sustainable Development*. second revised edition Edward Elgar Publishing, Cheltenham, Glos, UK.
- Wackernagel, M. and Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers.
- Warner, E. and Garvin, H. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of nuclear electricity generation. systematic review and harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), S73-S92.
- Wiedmann, T. And Minx, J. (2008). A definition of ‘carbon footprint’. In: Pertsova, C.C. (Ed.), *Ecological Economics Research Trends* ( pp. 1–11), Hauppauge, NY,USA: Nova Science Publishers.

WWF. 2016. Living Planet Report 2016. Risk and resilience in a new era. WWF International, Gland, Switzerland.

Web page (2017), retrieved from <http://www.footprint network.org/content/images/trends/2016/world.png>

Web page (2017), retrieved from <http://www.footprint network.org/faq/>

Web page (2017), retrieved from <http://info.cat.org.uk/questions/low-impact-living/what-ecological-footprint/>

Web page (2017), retrieved from [http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/bloom\\_or\\_bust\\_report.pdf](http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/bloom_or_bust_report.pdf)

Web page (2017), retrieved from <http://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>

Web page (2017), retrieved from [http://www.theecologist.org/News/news\\_analysis/2736691/false\\_solution\\_nuclear\\_power\\_is\\_not\\_low\\_carbon.html](http://www.theecologist.org/News/news_analysis/2736691/false_solution_nuclear_power_is_not_low_carbon.html)

Web page (2017), retrieved from [https://www.cse.org.uk/downloads/reports-andpublications/planning/renewables/common\\_concerns\\_about\\_wind\\_power.pdf](https://www.cse.org.uk/downloads/reports-andpublications/planning/renewables/common_concerns_about_wind_power.pdf)

### 3 Konventionelle Energiegewinnungssysteme: Wärme­kraftwerke

**Autoren:** Başak TAŞELİ<sup>1</sup> und Duygu ALTIOK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Giresun, Ingenieurwissenschaftliche Fakultät,  
Bereich Umwelttechnik, Giresun-Türkei

E-mail: [basak.taseli@giresun.edu.tr](mailto:basak.taseli@giresun.edu.tr)

<sup>2</sup> Universität Giresun, Ingenieurwissenschaftliche Fakultät,  
Bereich Lebensmitteltechnik, Giresun-Türkei

E-mail: [evren.altiok@giresun.edu.tr](mailto:evren.altiok@giresun.edu.tr)

**Abstrakt:** Energie wird benötigt, um den Bedürfnissen der Menschen und der Sektoren wie Industrie, Wohnen und Verkehr gerecht zu werden. Energiegewinnung führt zu starker Umweltverschmutzung bei Produktion, Umwandlung, Transport und Verbrauch aber auch zu unverzichtbaren Vorteilen in unser aller Leben. Groß angelegte Energieerzeugungs- und -umwandlungssysteme, die parallel zum Bevölkerungswachstum und zur industriellen Entwicklung entwickelt wurden, beeinflussen das ökologische Gleichgewicht stark. Die Emissionen von Kraftwerken oder anderen Teilen der Brennstoffkette, sind die Hauptfaktoren die zu Umweltproblemen führen. Diese Emissionen umfassen feste, flüssige und gasförmige Emissionen. Es besteht kein Zweifel, dass die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Emission von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) führt, welche eindeutig für die globale Erwärmung, die Bildung von saurem Regen und den Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre verantwortlich sind. In diesem Kapitel werden auch die ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen des Klimawandels, der Entstehung von saurem Regen und des Ozonabbaus vorgestellt.

## **Lernziele:**

Am Ende dieses Kapitels sollte der Student folgendes beherrschen:

- Die Umweltauswirkungen diskutieren können
- Die Auswirkungen auf die Umwelt eines Wärmekraftwerks erläutern können
- Erklären können wie Wärmekraftwerke arbeiten
- Folgende Begriffe definieren können: globale Erwärmung, Ozonabbau und saurer Regen
- Ein Bewusstsein für die Ernsthaftigkeit der Folgen vom Klimawandel zu erlangen
- Die Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels kennen, speziell die von saurem Regen und Ozonabbau
- Ein Bewusstsein für die Beeinflussung des Klimawandels des Menschen erlangen

### 3.1 Wie funktioniert ein Wärmekraftwerk?

Wärmekraftwerke verwenden Wasser als Arbeitsflüssigkeit. Die Umwandlung von Wärme (thermische Energie) in elektrische Energie bildet den Betrieb des Wärmekraftwerks. In Wärmekraftwerken wird Dampf durch Verbrennen von Brennstoff erzeugt und betreibt eine Dampfturbine. Nach dem Passieren der Dampfturbine wird der Dampf in einem Kondensator kondensiert und in den Kessel zurückgeführt, um wieder zu Dampf zu werden (siehe Abbildung 3.1). Wärmekraftwerke nutzen Kohle, Öl und Erdgas als Primärbrennstoff.

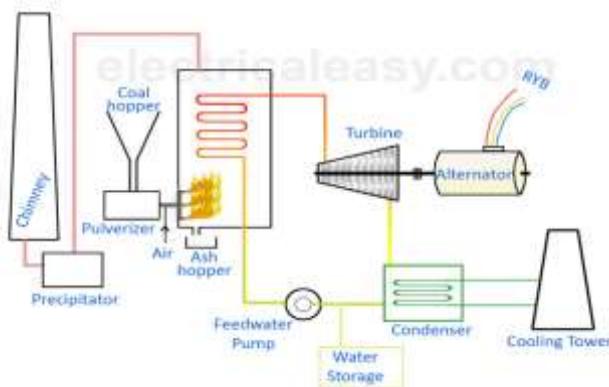


Abbildung 3.1 Darstellung eines Wärmekraftwerks

<http://www.electricaleasy.com/2015/08/thermal-power-plant.html>

### 3.2 Einfluss von Wärmekraftwerken auf das Ökosystem

Die Umweltauswirkungen des Wärmekraftwerks müssen sowohl vor als auch nach der Energieerzeugung untersucht werden. So sollten zum Beispiel bei einem mit Kohle betriebenen Wärmekraftwerk der Kohleabbau, der Ausstoß von Emissionen aber auch der Rückbau des Kraftwerkes eine Rolle spielen. Im Weiteren sollte auch die Entfernung des Kraftwerks zum

Endverbraucher bei der Beurteilung eine Rolle spielen. Die größten Umweltauswirkungen von Kraftwerken und ihrer Energiegewinnung sind auf feste, flüssige und gasförmige Emissionen des Kraftwerks oder anderer Teile der Brennstoffkette zurückzuführen (siehe Abbildung 3.2). Gasemissionen umfassen Rauchgase (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. In thermischen Anlagen ist die grundlegende Flüssigkeitsemission Abwasser. Es werden hohe Wassermengen zum Kühlen, Reinigen und für weitere Prozesse verwendet. Die Feststoffemissionen von Wärmekraftwerken in Form von Flugasche, suspendieren in der Luft und waschen Schwermetalle wie Fe, Zn, Cu und Pb in das Grundwasser und durch dieses in unsere Trinkwasserquellen ([www.britanica.com](http://www.britanica.com)).

Zusätzlich zu den direkten Emissionen, gibt es Sekundärkomponenten, einschließlich Ozon, welche aus den Oxiden von Stickstoff und flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) gebildet werden, Schwefelverbindungen, die aus Schwefeldioxid gebildet werden, und saurem Regen, der aus Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden gebildet wird. Die Tabelle 3.1 fasst die Arten von Auswirkungen zusammen, die sich aus verschiedenen Emissionen ergeben können.

### **Kohle-, Öl- und Gasbetriebene Kraftwerke**

Folgende Berufsrisiken gibt es:

- Unfälle und Krankheiten während der Produktion von Materialien, Bohrungen, Öl- und Gasfeldentwicklung, Minen- und Anlagenbau
- Unfälle beim Bau von Transportleitungen und beim Transport von Kohle und Öl zum Kraftwerk
- Unfälle während des Betriebs des Kraftwerks
- gesundheitliche Spätfolgen nach Kontakt mit krebserregenden Kohlenwasserstoffen

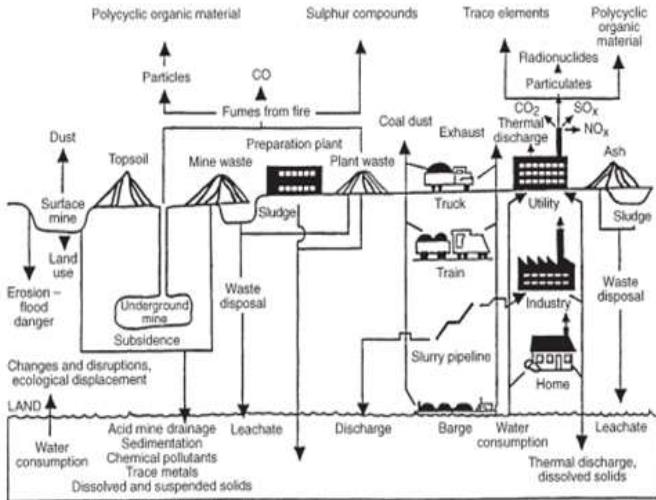


Abbildung 3.2 Brennstoffkettenkonzept

([www.britannica.com](http://www.britannica.com))

Tabelle 3.1 Umweltauswirkungen verschiedener Emissionen

([www.britannica.com](http://www.britannica.com))

A: Sterblichkeit; B: Morbidität; C: Vegetation; D: Wälder E: Fischerei; F: aquatisch; G: terrestrisch;  
H: Grundwasser; I: Klimawandel; J: Ästhetik

Gründe Umweltauswirkungen	menschliche Gesundheit		Biologische Ressourcen							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Außenluft										
Partikel	X	X								
SO <sub>2</sub>	X	X	X	X						
NO <sub>x</sub> , Nitrate, NO <sub>2</sub>		X	X	X		X				
Giftstoffe, Blei, Quecksilber	X	X	X	X	X	X	X	X		
CO	X	X								
CO <sub>2</sub>	X	X	X	X	X	X	X		X	
CFCs	X	X	X	X	X	X	X		X	
Dampf										
Sekundäre Außenluft										
Saure Aerosole	X	X								
Säureabscheidung			X	X	X	X	X			
Ozon (HCs, VOCs)	X		X	X			X			
Innenluft										
Oberflächenwasserentsorgung										
Chemisch	X	X	X		X	X	X			
Thermisch					X	X				X
Entsorgung fester Abfälle										
Transport							X			X
Bodennutzung							X			X
Gefährliche/PCBs	X	X			X	X		X		
Toxide in der Asche	X	X			X	X		X		
Konstruktion/Betrieb										
Anlage: Bodennutzung			X	X			X			X

Übertragung-Boden-nutzung			X	X			X			X
Explosion/Unfall	X	X								X
Überschwemmung	X	X	X		X	X	X	X		X
Stilllegung							X	X		X
Kraftstofferrfassung										
Extraktion	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Prozess	X	X	X		X	X	X	X		X
Transport/ Lagerung	X	X	X		X	X	X	X		X

#### Gefahren für die Öffentlichkeit:

- Verletzungen und Tod bei Transport von Kohle, Öl und Gas
- Auswirkungen des Einatmens von Schadstoffen bei der Herstellung von Materialien, die im Bergbau- und Anlagenbau sowie in der Entwicklung von Öl- und Gasfeldern verwendet werden
- Auswirkungen des Einatmens von Schadstoffen aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, die während des Betriebs der Kraftwerke freigesetzt werden
- Giftige Stoffe, die aus festen und flüssigen Abfällen freigesetzt werden
- Brände und Explosionen von gespeichertem Öl und Gas

#### Umwelteinflüsse:

- Verlust von Land für Tagebau oder Bergbauschäden in Untertagebaugebieten
- saurer Regen
- Verschmutzung von Wasser durch Abwasser von Minen
- Verschmutzung von Wasser durch feste und flüssige Abfälle aus dem Kraftwerk
- Verlust von Wäldern, Feldfrüchten und dem Ertrag von Nutztieren, Rückgang von Wildtieren an Land und im Wasser aufgrund der Aufnahme von Schadstoffen aus der

Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, die während des Betriebs der Kraftwerke freigesetzt werden

- Anstieg von Radioaktivität im Bereich der Aschelagerung
- Erderwärmung durch CO<sub>2</sub>, welches während des Anlagenbetriebs, der Materialproduktion und des Anlagenbaus freigesetzt wird
- Verschmutzung von Wasser bei Öltransport und Unfällen

### 3.3 Globaler Klimawandel

**Klima:** Klima ist der Durchschnitt der Wetterbedingungen an einem Ort, über einen weiten zeitlichen Rahmen. Die Elemente, die das Klima in einer Region bestimmen, sind Temperatur, Wind, Feuchtigkeit, Luftdruck und seine Veränderung im Laufe des Tages/Jahres.

**Klimawandel:** Der Klimawandel ist eine Veränderung des Klimas durch menschliche Aktivitäten, die direkt oder indirekt die Zusammensetzung der Atmosphäre und den natürlichen Klimawandel in vergleichbaren Zeiträumen verändern.

**Globale Erwärmung:** Die globale Erwärmung ist der Anstieg der durchschnittlichen Lufttemperaturen in der Nähe der Erdoberfläche, der in den letzten ein bis zwei Jahrhunderten gemessen wurde.

Die intensive Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Zunahme von Treibhausgasen in der Atmosphäre, insbesondere von Kohlendioxid, und damit die einhergehende Erwärmung der Erde werden als Treibhauseffekt (globale Erwärmung) definiert.

Zu den gasförmigen Zuflussgasen gehören Kohlendioxid, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoff und Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Es ist dargelegt, dass ein Effekt der globalen Erwärmung darin besteht, dass die Gletscher an den Polen schmelzen und dass das Meerlevel ansteigen wird und viele Länder überflutet werden. Wenn der Verbrauch fossiler

Brennstoffe gleich hoch bleibt, wird sich zeigen, dass die globale Durchschnittstemperatur in den nächsten 50 Jahren um 5 Grad ansteigen wird. Dies wird unweigerlich zu folgenschweren Katsatphen führen. Aufgrund des Treibhauseffekts steigt die Temperatur der Erde, die Verdunstung von Meeren, Seen und Flüssen nimmt zu. Dieses führt zu erhöhtem Niederschlag und damit einhergehenden Überschwemmungen und anderen Naturkatastrophen.

### 3.3.1 Gründe für den Klimawandel

**Vulkanische Aktivität:** vulkanische Aktivität setzt große Mengen Schwefeldioxid und andere Aerosole in die Stratosphäre frei. Diese Verbindungen reduzieren die atmosphärische Transparenz und damit die Menge der Sonnenstrahlung, die die Erdoberfläche und die Troposphäre erreicht. Die vulkanische Aktivität kann so aktiv sein, dass Gase wie Wasserdampf, Asche, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> das globale Klima verändern können. Darüber hinaus trifft das Magma auf den vulkanischen Kanälen auf Kohlenstoff auf der Erdoberfläche und Kohlendioxid wird freigesetzt. Dieses CO<sub>2</sub>, welches in die Atmosphäre trifft, spielt eine große Rolle beim Klimawandel.

**Tektonische Aktivität:** Bei tektonischen Bewegungen (Bewegungen, die in der Erdkruste stattfinden) bewirkt die Veränderung der Bodenformationen, dass sich die Meer- und Luftströmungen verändern und große Klimaveränderungen stattfinden können. Die tektonische Aktivität beeinflusst so auch die Kohlendioxidkonzentrationen der Erde.

**Treibhausgase:** Treibhausgase sind Verbindungen, die den Treibhauseffekt unterstützen, sie befinden sich in der Atmosphäre und speichern am meisten Wärme. Diese Gase können die von der Erdoberfläche emittierte Infrarotstrahlung absorbieren und an die Erdoberfläche zurückleiten, was zu dem, als Treibhauseffekt bekannten Phänomen, beiträgt. Auf diese Weise erhöhen Treibhausgase die Temperatur in der

Atmosphäre und verursachen die globale Erwärmung und damit den Klimawandel durch den Treibhauseffekt. Heute sind die wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone, Methan (CH<sub>4</sub>), Diazotmonoxid (N<sub>2</sub>O) und Ozon (O<sub>3</sub>).

**Wasserdampf:** Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre lösen eine höhere Verdampfungsrate von Oberflächenwasser aus. In der unteren Atmosphäre absorbiert eine größere Konzentration von Wasserdampf eine große Menge langwelliger Strahlung und emittiert diese nach unten.

**Kohlendioxid:** CO<sub>2</sub> ist das Gas in der Luft, welches am meisten Wärme speichert. Die Menge an atmosphärischem CO<sub>2</sub> hängt von der Aktivität der Vulkane, der Verbrennung und dem natürlichen Zerfall der organischen Substanz, sowie der Atmung durch aerobe Organismen ab. Die Zunahme der Menge an CO<sub>2</sub> und anderen Gasen, die Wärme speichern, bewirkt, dass die Wärme in der Atmosphäre ansteigt. Es ist bekannt, dass der CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre großen Einfluss auf das Klima hat (z.B. Abschmelzen der Gletscher).

**Methan:** Methan (CH<sub>4</sub>) ist das zweitwichtigste Treibhausgas. Es wird bei verschiedenen menschlichen und tierischen Aktivitäten ausgestoßen. Methan hat eine wärmespeichernde Eigenschaft. Es hat eine wesentlich kürzere Verweilzeit in der Atmosphäre als CO<sub>2</sub>.

**Oberflächenozon und andere Verbindungen:** Die Menge an Ozon variiert in Abhängigkeit vom Breitengrad und der Höhe in der Atmosphäre. Oberflächenozon (O<sub>3</sub>) ist ein Ergebnis der Luftverschmutzung und muss von natürlich vorkommendem stratosphärischem O<sub>3</sub> unterschieden werden. Es nimmt in der Stratosphärenschicht durch den Treibhauseffekt ab und nimmt in erdnahen Gebieten zu. Die Verwendung von Chlorfluorkohlenstoffgasen beeinflusst die Ozonkonzentration. Normalerweise erreicht die UVB-Strahlung die unteren Schichten der

Atmosphäre und ein Teil davon wird von der Erdoberfläche eingefangen. Biologisch schädliche Effekte werden beobachtet, wenn sich die Oberflächentemperatur erhöht. Der Anstieg der Ozonkonzentration in der Atmosphäre wirkt sich auf den Klimawandel aus.

**Aerosole:** Aerosole reflektieren und absorbieren einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung. Aerosole sammeln sich innerhalb weniger Tage in der Atmosphäre an und werden durch Regen, Schnee oder durch die Luft verbreitet (siehe Abbildung 3.3).

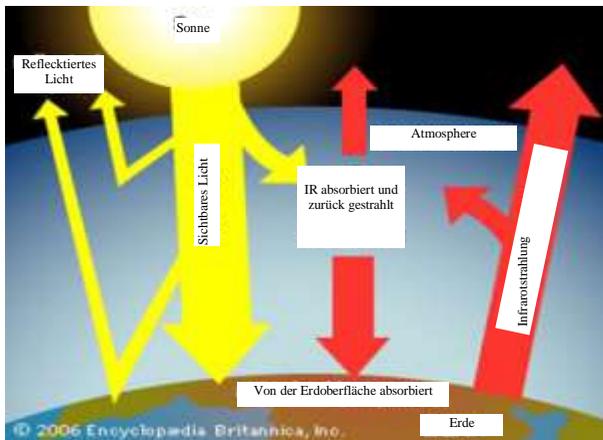


Abbildung 3.3 Treibhauseffekt

[www.qa-international.com](http://www.qa-international.com)

Tabelle 3.2 Zeitleiste des Klimawandels

[www.britannica.com](http://www.britannica.com)

<b>Jahr</b>	<b>Vorgang/Maßnahme</b>
1896	Svante Arrhenius konstruiert das erste Klimamodell welches den Einflusse von atmosphärischem CO <sub>2</sub> zeigt
1920-1925	Die Ära der Erdölproduktion im großen Stil beginnt mit der Erschließung der Ölfelder in Texas und im Persischen Golf
1957	Roger Revelle und Hans E. Suess schreiben in Ihrem Paper, dass "Menschen jetzt ein großräumiges geophysikalisches Experiment durchführen", und untersuchen in diesem die CO <sub>2</sub> -Aufnahme durch die Ozeane.
1960	Die vom amerikanischen Klimaforscher Charles David Keeling entwickelte Kurve zeigt die CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre.
1973	Erster Ölschock.
1974	Erste Belege, die auf eine Zerstörung der Ozonschicht durch Chlorchemikalien hinweisen, werden veröffentlicht.
1979	Zweiter Ölschock.
1980	Keeling-Kurve: CO <sub>2</sub> -Konzentration 1980 = 337 ppm.
1990	Der erste IPCC-Bericht (Weltklimarat) nimmt das Muster der Erwärmung in der Vergangenheit zur Kenntnis und signalisiert, dass eine zukünftige Erwärmung wahrscheinlich ist.
1992	Die Konferenz der Vereinten Nationen in Rio erstellt eine UN-Klimarahmenkonvention.
1997	Das Kyoto-Protokoll wird mit der Absicht geschaffen, die Treibhausgasemissionen von Industrieländern zu begrenzen.

<b>Jahr</b>	<b>Vorgang/Maßnahme</b>
2000	Keeling Kurve: CO <sub>2</sub> Konzentration in 2000=367 ppm.
2001	Der 3. IPCC-Bericht hebt hervor, dass die globale Erderwärmung durch Treibhausgase verursacht wird.
2005	Das Kyoto Protokoll wird ratifiziert. Alle wichtigen Industrieländer, mit Ausnahme der USA, unterzeichnen es.
2006	China wird zum größten Treibhausgas-Emittenten der Welt.
2007	Der 4. IPCC-Bericht zeigt auf, dass die Auswirkungen der globalen Erderwärmung zunehmen.
2011	Canada widerruft das Kyoto Protokoll.
2014	Keeling Kurve: CO <sub>2</sub> Konzentration in 2015=400 ppm
2015	Das Pariser Klimaabkommen ersetzt das Kyoto Protokoll und wird von ca. 200 Ländern unterzeichnet.
2016	Das Pariser Klimaabkommen tritt in Kraft.

### **3.3.2 Umweltfolgen der globalen Erwärmung**

Die globale Erwärmung und der Klimawandel haben das Potenzial, die Temperatur auf der Erde zu verändern. Diese Veränderung beeinflusst das Ökosystem und damit die Artenvielfalt von Pflanzen, Tieren und anderen Lebensformen auf der Erde. Prognosen zufolge wird die Durchschnittstemperatur in Europa im späten 21. Jahrhundert um 2,3-6,0°C ansteigen, was zu einem Aussterben von Pflanzen- und Tierarten und schweren menschliche Gesundheitsprobleme führen kann (IPCC, 2007). Die Oberflächenerwärmung in vielen Regionen kann zu unkontrollierten Veränderungen führen, wie z. B. früheres Blattwerk bei Bäumen, frühere Begrünung der Vegetation, geänderter Zeitpunkt der Eiablage und -ausbrütung und Verschiebungen der

saisonalen Migrationsmuster von Vögeln, Fischen und anderen wandernden Tieren. In Ökosystemen mit hohem Breitengrad bedrohen Veränderungen der saisonalen Muster von Meereis, Räuber wie Eisbären und Walrosse. Beide Arten sind für ihre Jagdaktivitäten auf zerbrochenes Meereis angewiesen.

In Zuge des Klimawandels, werden sich die Luftsysteme verändern. Dies führt zu Verschlechterung von Wasser-, Luft- und Lebensmittelqualität und -quantität, und außerdem zu Ökosystem-, Landwirtschafts- und Infrastrukturproblemen. Die Auswirkungen der globalen Erwärmung sind kontraproduktiv: der Meeresspiegel steigt, die Jahreszeiten verändern sich und der Zustand der Ökosysteme verschlechtert sich. Es kommt in einigen Regionen zu langanhaltenden Dürreperioden und zu Wüstenbildung. Außerdem nimmt die Intensität und Häufigkeit von Hurrikanen in einigen Teilen der Welt stark zu. Es wird erwartet, dass die Temperaturen im ganzjährlichen Mittel ansteigen werden. Pflanzen- und Tierarten, die diesen Veränderungen nicht standhalten, reduzieren sich oder sterben aus.

### **3.3.3 Sozioökonomische Folgen der globalen Erwärmung**

Es wird erwartet, dass die Menge an in Berggletschern und Schnee gespeichertem Frischwasser sinken wird und somit mehr als 15 Prozent der Weltbevölkerung nicht mehr von diesem Süßwasser profitieren können. Darüber hinaus wird die ansteigende Temperatur auch Auswirkungen auf Seen und Flüsse und deren biologische Aktivitäten haben. Dies mindert die Wasserqualität weiter und führt zu einem noch geringeren Zugang zu sicheren Wasserressourcen für den Trink- und Landwirtschaftssektor. Eine Erwärmung der Gewässer führt u.A. zum Entstehen von schädlichen Algen die Gesundheitsrisiken für Mensch und Tier mit sich bringen.

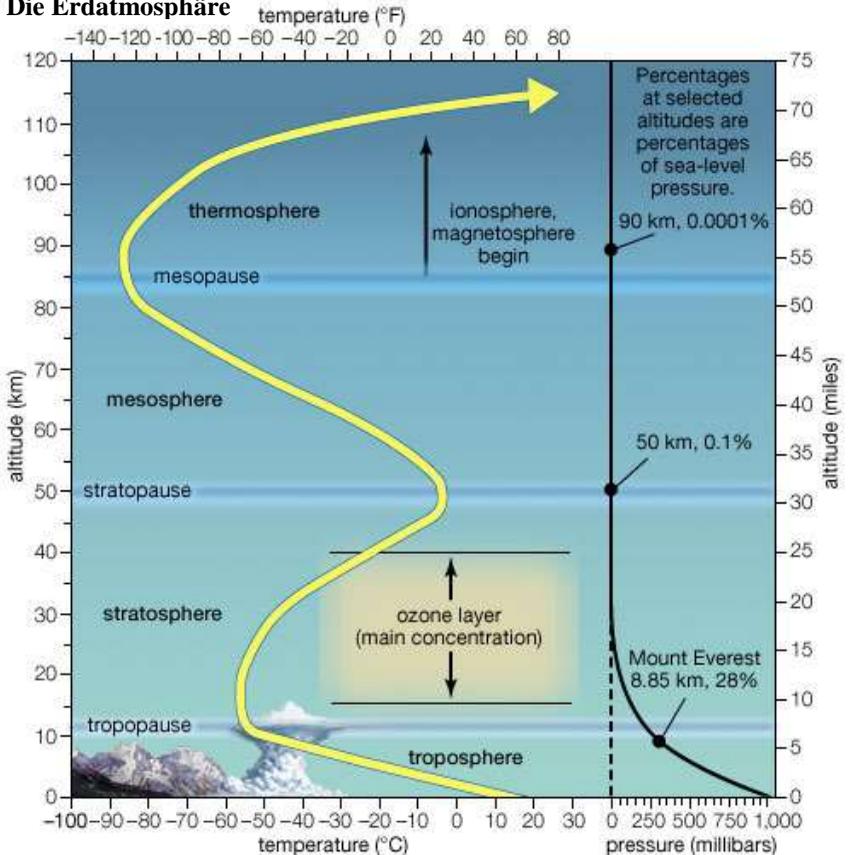
### 3.4 Ozonabbau

Ozon ist in der Atmosphäre in zwei unterschiedlichen Schichten zu finden, in der Troposphäre und in der Stratosphäre, wo es am reichlichsten vorhanden ist. Dies ist das stratosphärische Ozon, welches natürlicherweise über 10-45 km von der Erdoberfläche entfernt vorkommt und 90% des gesamten Ozons in der Atmosphäre ausmacht (siehe Abbildung 3.4). Es ist überlebenswichtig da es schädliche ultraviolette Strahlung von der Sonne abhält. Das zweite Vorkommen ist das troposphärische Ozon (Industrieabfälle, Abgas usw.), welches vom Menschen stammt und etwa 10-15 km vom Boden vorkommt und 10% des gesamten Ozons in der Atmosphäre ausmacht. Troposphärisches Ozon ist das viertgrößte Treibhausgas, welches beim globalen Klimawandel eine Rolle spielt. Langwellige Strahlung verbleibt in der Atmosphäre, wodurch der Treibhauseffekt in der Atmosphäre zunimmt. Der Beitrag vom Treibhauseffekt am globalen Klimawandel durch Ozon beträgt 7%. Ozon beeinträchtigt nachweislich die menschliche Gesundheit. Das Ozon, welches mit anderen Molekülen in der Atmosphäre reagiert, hat nachweislich verschiedene Schäden an lebenden Geweben von Pflanzen und Tieren verursacht. Stickoxide (NOX), eine der Quellen von bösartigem Ozon, werden überwiegend von Kraftfahrzeugen (49%), Kraftwerken (28%), industriellen Aktivitäten (13%) und kommerziellen Aktivitäten (5%) ausgestoßen. Das Ozon in der Stratosphäre wird in erster Linie durch das Aufbrechen der chemischen Bindungen in Sauerstoffmolekülen (O<sub>2</sub>) (durch hochenergetische Solarfotone) erzeugt, dies wird als Photodissoziation bezeichnet. Einzelne Sauerstoffatome, die aufgrund von Phidissoziation freigesetzt werden, verbinden sich später mit Sauerstoffmolekülen zu Ozon.

Das Ozon in der Stratosphäre absorbiert ultraviolette (UV) Strahlen, die schlecht für alle Lebewesen, natürliche Ressourcen und landwirtschaftliche Produkte sind. Die Menge an Ozon in der Stratosphäre variiert auf natürliche Weise im Laufe des

Jahres aufgrund von chemischen Prozessen, Winden und anderen Transportprozessen, die die Ozonmoleküle um den Planeten bewegen. Die Tatsache, dass die Dichte des Ozons zu niedrig ist, um die ultravioletten Strahlen zu halten, wird als "Ozonschichtperforation" oder "Ozonzerstörung" bezeichnet. Als Folge der Verdünnung der Ozonschicht nimmt die UV-b-Strahlung auf der Erde zu, was zu Sehstörungen und vermehrtem Hautkrebsauftreten führt.

## Die Erdatmosphäre



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

Abbildung 3.4 Ozonschicht

(<https://www.google.com.tr/search?q=ozone+destruction+mechanism>)

Menschliche Aktivitäten haben die Ozonschicht über mehrere Jahrzehnte wesentlich verändert. Die Zunahme der Chlor- und Brommenge in der Stratosphäre stimuliert den Ozonabbau. Diese Chemikalien zerstören Ozon, indem sie einzelne Sauerstoffatome von Ozonmolekülen entfernen, nachdem sie durch UV-Strahlung von den Chlorfluorkohlenstoffen (FCKWs) und

anderen Halogenkohlenstoffen (Kohlenstoff-Halogen-Verbindungen) entfernt wurden. Die Verarmung ist so groß, dass sich zu Beginn ihrer jeweiligen Frühjahrssaison über den Polen sogenannte Ozonlöcher bilden. Die Chloratome reagieren dann mit Ozon und lösen einen Prozess aus, bei dem ein einzelnes Chloratom tausende Ozonmoleküle in Sauerstoff umwandelt (siehe Abbildung 3.5).

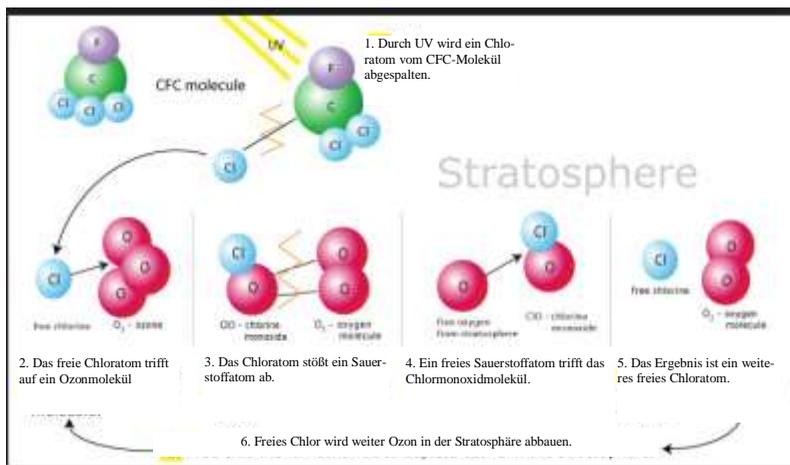


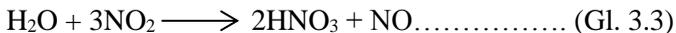
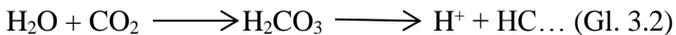
Abbildung 3.5 Ozonabbaumechanismus

(<https://www.google.com.tr/search?q=ozone+destruction+mechanism>)

### 3.5 Saurer Regen

Die Kohle, die in Wärmekraftwerken, Heizungs- und Industriebetrieben verbrannt wird, emittiert atmosphärische Asche (Cadmium, Stahl, Blei),  $CO_2$  und  $SO_2$ . Der Verbrauch von Kohle und Öl nimmt weltweit zu. Durch die ansteigende weltweite Anzahl von Fahrzeugen und dem damit einhergehenden erhöhtem Verbrauch von Erdöl, steigt der Anteil von Kohlenmonoxidgas in der Atmosphäre. Auch Vulkane erhöhen die Menge an Gasen wie  $SO_2$  und  $CO_2$  in der Atmosphäre. Diese Gase, die

eine Luftverschmutzung verursachen, reagieren mit dem Wasser in der Atmosphäre ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Das Ergebnis sind saure Verbindungen wie  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Schwefelsäure),  $\text{HNO}_3$  und  $\text{HCO}_3$  (Kohlensäure), für die die Reaktionen in den Gleichungen 1 bzw. 2 angegeben sind. Stickoxid ( $\text{NO}$ ), das auch die natürliche Säure des Regenwassers erhöht, entsteht bei Gewittern durch die Reaktion von Stickstoff und Sauerstoff. Darüber hinaus kommt es in Automotoren zu Hochtemperatur-Luftverbrennung und Kraftwerke erzeugen große Mengen an  $\text{NO}$ -Gas. In der Luft wird  $\text{NO}$  zu Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) oxidiert und reagiert mit Wasser zu Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) (Gleichung 3). Diese Art von Gas fällt in Form von Regen, Schnee oder Nebel (mit sauren Eigenschaften) auf die Erde und wird als saurer Regen bezeichnet.



Die saure Ablagerung umfasst auch die trockene Ablagerung von sauren Partikeln und Gasen, die Landschaften in deren Trockenperioden beeinflussen können. Die Schäden, die durch sauren Regen auftreten, sind nicht nur auf Wälder beschränkt, sondern betreffen Lebewesen genauso wie die Eisenbahn, Gebäude, Brücken und historische Bauwerke. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen, die durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen zu einem Treibhauseffekt in der Atmosphäre führen, erreichten 1990 eine Menge von 0,6 Milliarden Tonnen pro Jahr. Ein deutlicher Anstieg ist vor allem in den letzten 40 Jahren, auf immerhin 5,5 Milliarden Tonnen im Jahr 1998, sichtbar.

Die Luftverschmutzung wirkt sich nachteilig auf das Klima aus. Dies tut sie indem sie verhindert, dass die Strahlen an die Orte gelangen an denen sie ankommen sollten und sich in die Atmosphäre ausbreiten. Der saure Regen verursacht einen Chlorophyllabbau in den Blättern und lässt die Pflanze gelb werden und austrocknen. Bekanntermaßen verbrauchen Pflanzen

während der Photosynthese  $\text{CO}_2$ . Saurer Regen trocknet die Vegetation aus und verursacht somit auch einen deutlichen Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Menge in der Atmosphäre.

### **3.5.1 Umweltfolgen von saurem Regen**

Schadstoffe in der Luft werden durch Windströmungen leicht bewegt. Daher kann saurer Regen großflächige Gebiete beeinflussen, sogar weit entfernt von denen, wo die Schadstoffe ausgestoßen werden (siehe Abbildung 3.6). Saurer Regen ist weltweit ein wachsendes Umweltproblem, da er eine Reihe anorganischer und biochemischer Reaktionen mit Auswirkungen auf die Umwelt hervorruft. Saurer Regen ist schädlich für die gesamte Umwelt, jedoch sind die Wälder und landwirtschaftlichen Gebiete am stärksten betroffen. Dieser saure Regen wäscht wichtige Elemente wie Magnesium und Kalzium aus dem Boden aus und bewirkt, dass sie sich in tiefere Schichten bewegen. Infolgedessen können Bäume und andere Pflanzen nicht ausreichend Nährstoffe aus der Erde aufnehmen. Der Verlust dieser Mineralien im Boden kann Bäume und Pflanzen absterben lassen und auch die Ernten negativ beeinflussen. Ebenso kommt es zur Auflösung des Aluminiums im Boden und die Baumwurzeln können nicht mehr ausreichend von den Nährstoffen profitieren.

Saurer Regen führt zur Versauerung des Zytoplasmas, dies führt zu einem gestörten Wasserhaushalt in den Blättern da Wasser durch die Spaltöffnungen (Stomata) eintritt. Bei blättrigem Gemüsesorten wie Spinat aber auch bei Bäumen, verschließt das  $\text{SO}_2$  die Blattoberfläche in einer Art Plastikhülle und verhindert somit die Photosynthese. Als Folge davon wird die Wasseraufnahme verhindert und die Blätter/das Blattwerk sterben ab. Dadurch werden die oberen Teile des Baumes derart geschwächt, dass auch die jungen Triebe absterben und der Wuchs von weiteren Blättern geschweige denn Früchten verhindert wird. Der auf den Untergrund fallende saure Regen stört den

Säurehaushalt des Bodens und damit auch die dort lebenden Mikroorganismen und deren Arbeit (Kızıloğlu T., 1995).

Saurer Regen fällt in Teiche und Flüsse, stört das Säuregleichgewicht im Wasser und beeinflusst die dort lebenden Fische. Im sauren Milieu können Fische nicht überleben. Somit hat der saure Regen auch direkten Einfluss auf uns, indem er auch die Nahrungskette beeinflusst.

Saurer Regen dringt in das Untergrund-, Oberflächen- und Trinkwasser ein, interagiert mit Schwermetallen des Bodens und hat direkten Einfluss auf Fische und Pflanzen. Als Folge der Fütterung mit diesen Nahrungsmitteln treten im menschlichen Körper, aufgrund der Lagerung von sauren Substanzen, Krankheiten wie Schilddrüsenerkrankung, Geschwüre, chronische Bronchitis, Asthma und Emphyseme auf (Kızıloğlu T., 1995).



Abbildung 3.6 Auswirkungen von saurem Regen in den Great Smoky Mountains Wäldern

<https://www.google.com.tr/search?q=Effect+of+acid+rain+on+Great+Smoky+Mountains>

Der saure Regen verschmutzt unsere Trinkwasserquellen. Wenn ein kleiner See als Trinkwasserreservoir dient und viel saurer Regen fällt, steigt das Säureverhältnis so stark an, dass das Wasser nicht mehr trinkbar ist. Daher sollten die Umweltschäden durch sauren Regen nicht unterschätzt werden, da diese Regenfälle in Zukunft den Verbrauch sauberer, trinkbarer Wasserressourcen verringern können.

Schädliche Gase, die zu saurem Regen führen, verursachen verschiedene Atemwegserkrankungen. Wenn der saure Regen in Kontakt mit der Haut kommt, kann dies zu Beschwerden, wie zum Beispiel Hautkrebs, führen. Sulfat in der Luft wird durch Atmung aufgenommen und verursacht verschiedene Krankheiten wie Bronchitis, Asthma und sogar Krebs.

### **3.5.2 Auswirkungen von saurem Regen auf Bauwerke und Denkmäler**

Saurer Regen hat abrasive Eigenschaften. Gebäude, Skulpturen und sogar historische Artefakte in der Umgebung werden durch Erosion zerstört, sobald sie in Kontakt mit saurem Regen kommen. Wenn der Säuregehalt im sauren Regen hoch ist, können selbst die härtesten Gesteine erodiert werden. Steinarbeiten wie Marmor, Kalk und Granit, die Formen von Calciumcarbonat sind, wurden oft bei der Konstruktion von historischen Bauwerken verwendet. Marmor und Kalkstein bestehen beide aus Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), die sich nur in ihrer kristallinen Struktur unterscheiden. Historische Arbeiten wurden aus Steinen wie Marmor, Kalkstein und Kalksandstein gemacht. Obwohl diese als langlebige Materialien bekannt sind, werden Gebäude und Außenmonumente aus Marmor und Kalkstein nun allmählich durch sauren Regen zerstört. Da die Sandpartikel im Sandstein mit einem kalkhaltigen Material koexistieren, wird beobachtet, dass die Sandpartikel im Laufe der Zeit aufgrund von saurem Regen und der Wirkung von Luftschadstoffen ausgewaschen werden.

Eine chemische Reaktion (vgl. Gleichung 4) zwischen Calciumcarbonat und Schwefelsäure (Hauptanteil des sauren Regens) führt zur Auflösung in  $\text{CaCO}_3$ , was wässrige Ionen sind. Diese Ionen werden im Wasserstrom weggespült ([www.chemistry.wustl.edu](http://www.chemistry.wustl.edu)).



Bei der Betrachtung der einsetzenden Zerstörung von historischen Gebäuden spielt auch der PH-Wert des Regens eine große Rolle.

## Referenzen

IPCC (2007), Climate Change 2007: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 4th Assessment Report, ISBN 978-92-9169-143-2.

Kızıloğlu, T. (1995). Toprak Mikrobiyolojisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Yay. no: 180, Erzurum (in Turkish).

Web page (2017) retrieved from <http://www.electrical-easy.com/2015/08/thermal-power-plant.html>

Web page (2017) retrieved from [www.britannica.com](http://www.britannica.com)

Web page (2017) retrieved from [www.qa-international.com](http://www.qa-international.com), created and produced by QA International

Web page (2017) retrieved from [www.chemistry.wustl.edu](http://www.chemistry.wustl.edu)

Web page (2017) retrieved from <https://www.google.com.tr/search?q=ozone+destruction+mechanism>

Web page (2017) retrieved from <https://www.google.com.tr/search?q=Effect+of+acid+rain+on+Great+Smoky+Mountains>

## 4 Ökologische und ökonomische Dimensionen von Kernkraftwerken

**Autoren:** Feriha YILDIRIM<sup>1</sup> und Gamze YÜCEL İŞILDAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazi Universität, Institut für Wissenschaft und Technik, Bereich Umweltwissenschaften, Ankara-Türkei

E-mail: [ferihayildirim@gmail.com](mailto:ferihayildirim@gmail.com)

<sup>2</sup> Gazi Universität, Institut für Wissenschaft und Technik, Bereich Umweltwissenschaften, Ankara-Türkei

E-mail: [akarakoc@gazi.edu.tr](mailto:akarakoc@gazi.edu.tr)

**Kurzfassung:** Der steigende Energiebedarf macht die Verwendung fossiler Brennstoffe erforderlich, da diese günstig und leicht verfügbar sind. Die durch fossile Brennstoffe verursachten Treibhausgase (insbesondere CO<sub>2</sub>-Emissionen) haben jedoch den Klimawandel stark beschleunigt. Als alternative Energiequelle hat sich die Anzahl der Kernreaktoren (NPR) in den letzten Jahren erhöht. Die Kernenergie erlebt eine Renaissance als potentielle Alternative für Kohlekraftwerke, da die Sorge um die globale Erwärmung zugenommen hat.

Dennoch darf nicht vergessen werden, dass es in den letzten 60 Jahren zu etwa 100 nuklearen Unfällen kam. Von diesen hatten einige schwerwiegende Auswirkungen auf die Umwelt. Auch unter diesem Gesichtspunkt müssen Kernkraftwerke, hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkung, bewertet werden. In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile von Kernkraftwerken kurz dargestellt. Ökologische Risiken aller Schritte (von Anfang bis Ende) werden diskutiert und der Fokus auf: Uranabbau, Anreicherung, Kernbrennstoffkreislauf; Prozesse im Reaktor, Entsorgung radioaktiver Abfälle, Demontage des Reaktors. Energieeffizienz, Klimawandel, öffentliche Gesundheit, Ökosysteme, biologische Vielfalt, künftige Generationen und Öffentlichkeitsbeteiligung gelegt. Diese werden als grundlegende

Kriterien für die Bewertung der Kernenergie herangezogen, wobei auch die wirtschaftlichen, politischen und sozialen Aspekte berücksichtigt werden.

### **Lernziele:**

- Am Ende dieses Kapitels sollten die Studenten folgendes beherrschen:
- Vorteile der Kernkraft
- Nachteile der Kernkraft
- Risiken der Kernkraft
- Außerdem Kernkraft unter ökologischen Aspekten evaluieren können (fortschreitender Klimawandel, die zur Verfügung gestellte Energie, ökonomische Effizienz, Ökosystem, Biodiversität, Sicherheit, Volksgesundheit, die Rechte späterer Generationen und die Teilhabe der Gesellschaft)

## **4.1 Einführung**

Heutzutage basiert der Großteil der gelieferten Energie auf fossilen Brennstoffen. Es wird erwartet, dass die fossilen Ressourcen in naher Zukunft (in ca. 150 Jahren) versiegen werden. Es ist also sowohl aus diesem Grund, als auch auf Grund der starken Umweltbelastung durch Treibhausgase notwendig, nach alternativen Energiequellen zu suchen. Obwohl der Fokus der Menschen mehr auf erneuerbaren Energiequellen liegt, ist die Energie aus diesen Quellen nicht ausnahmslos nachhaltig. Da viele dieser erneuerbaren Energien nur schwer gespeichert werden können oder nicht ausreichen, bleibt Kernenergie als starke Alternative zu fossilen Brennstoffen auf der Agenda.

Kern bedeutet, mit dem Kern verwandt zu sein. Kernenergie ist die Energie, die als Kettenreaktion von atomaren Teilchen auftritt. Energie tritt als Folge von zwei grundlegenden Reaktionen wie Fusion und Spaltung auf. Die Energie, die infolge der Spaltung radioaktiver Substanzen (Uran) aufgrund des

Neutronenbeschusses oder während der Fusion von leicht radioaktiven Substanzen entsteht, ist sehr hoch. Das grundlegende Prinzip, das in den Anlagen zur Gewinnung von Kernenergie genutzt wird, ist die Spaltreaktion von Uran (s. Abbildung 4.1).

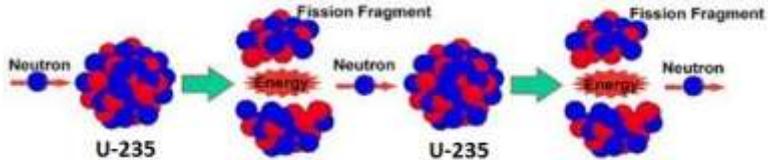


Abbildung 4.1 Kernspaltung und Kettenreaktion

([http://www.electricalport.com/technical-pole-section/is nuclear alternative-what is nuclear energy -/4173#ad-image-0](http://www.electricalport.com/technical-pole-section/is-nuclear-alternative-what-is-nuclear-energy-/4173#ad-image-0))

Dieser Begriff wurde erstmals während des 2. Weltkriegs erwähnt. Den Beginn des Studiums der Kernenergie begann mit den Bomben, die am 6. August 1945 auf die Stadt Hiroshima in Japan und am 9. August 1945 auf die Stadt Nagasaki abgeworfen wurden. Die Wissenschaftler Rutherford, Hans, Strassman, Oppenheimer und Einstein waren die ersten die zu diesem Thema forschten (Karabulut Y., 1999). Heutzutage werden 10,9% der weltweiten Elektrizität von Kernkraftwerken produziert. Laut den Power Reactor Information (PRIS) Daten der Internationalen Atomenergie Agentur, werden derzeit 441 Kernreaktoren in 31 Ländern betrieben (Stand 15. November 2015).

In den 25 Jahren nach dem Atomunfall von Tschernobyl, ging der Bau von Atomkraftwerken zurück, obwohl sich die weltweite Nachfrage nach Elektrizität mehr als verdoppelte. Infolgedessen erreichte der Anteil der Kernenergie an den gesamten Elektrizitätslieferungen 1996 ihren Höhepunkt mit einem Anteil von 18%, bevor sie im Jahr 2014 auf 11% zurückging (siehe Abbildung 4.2) (<https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds->). Atomkraftwerke

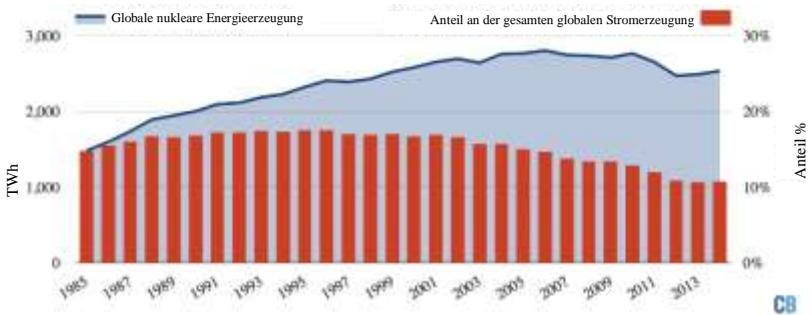


Abbildung 4.2 Globale nukleare Stromerzeugung

(blauer Bereich, linke Achse) und nuklearer Anteil an der gesamten weltweiten Stromerzeugung (rote Balken, rechte Achse)

Quelle: (BP Statistical Review von World Energy 2015 und Carbon Brief Analyse. Grafik von Carbon Brief)

## Vorteile von Kernenergie

- Keine Verwendung fossiler Brennstoffe und somit keine Bildung von Treibhausgasemissionen
- Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, deren Ressourcen schnell aufgebraucht werden
- höhere Effizienz im Vergleich zu regenerativen Energiequellen
- bietet gleichzeitig eine strategische und politische Macht (Es kann ebenfalls für militärische Zwecke verwendet werden)
- Es ist stabiler in Bezug auf die Preisschwankungen bei fossilen Brennstoffen

## **Nachteile Kernenergie:**

- hohes und vor allem langjähriges Risiko für die Menschheit, die Tierwelt und die Umwelt durch Verstrahlung im Falle von Unfällen
- Bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle gibt es viele Probleme und keine Endlösung
- Es ist eine teure Energiequelle
- Es birgt externe Abhängigkeit in Bezug auf Uranquellen und Technologie
- Negative Auswirkungen auf die Umwelt in Fällen, in denen der Standort falsch gewählt wurde
- hoher Zeitaufwand bis zur Inbetriebnahme des Reaktors, kurze Laufzeit

Am Ende ist die Entscheidung für Kernenergie natürlich eine politische und die eigentliche Debatte findet auf dem politischen Parkett statt. Durch Atomkatastrophen (u.A. Fukushima) und damit einhergehender Folgen, bekommt die Debatte aber auch ethische Aspekte (Caldicott H., 2014). Daher ist es wichtig und notwendig die Vor- und Nachteile der Kernenergie aus einem ganzheitlichen Ansatz zu betrachten.

Zu diesem Zweck wurden zunächst die verschiedenen Phasen der Energiequelle untersucht, der Uranabbau, die Urananreicherung, der Betrieb des Reaktors, die Entsorgung von Abfällen und die Demontage der Anlage.

**Riskante Aspekte von Kernkraftwerken** wurden untersucht und darüber hinaus wurden die Themen "Kosten" und "Sicherheit" immer wieder in Frage gestellt, während ökologische Bewertungen in Bezug auf die folgenden Punkte durchgeführt wurden:

- a) Energieeffizienz
- b) Klimawandel
- c) Menschliche Gesundheit

d) Ökosysteme und Biodiversität

e) Zukünftige Generationen

f) Beteiligung der Öffentlichkeit

Diese Kriterien entsprechen den folgenden Punkten, die für die Untersuchung der "rationalen Produktion von Energiepolitiken" erforderlich sind, wie sie im Externen-E-Bericht (1995) des Europäischen Komitees ausgeführt wurden:

- Risikoanalyse in Bezug auf die Entsorgung und das Recycling von gebrauchten nuklearen Abfällen
- Vergleich der Kohlendioxidemissionen
- Risikoanalyse insbesondere bezüglich Lagerung und Recycling von Atommüll.

## **4.2 Risiken von Kernkraftwerken**

Die Sicherheit von Kernkraftwerken ist nach wie vor eines der meist umstrittensten Themen der Wissenschaft. Um das Thema aus einer ganzheitlichen Perspektive zu betrachten und gleichzeitig eine ökologische Bewertung dieser Anlagen vorzunehmen, sollten alle Phasen berücksichtigt und alle Risiken bewertet werden. Aus diesem Grund werden Diskussionen über: die Verarbeitung und Einbettung der durch die Uranexploration entstehenden Abfälle, die Lagerung von gebrauchtem Brennstoff, die Verarbeitung der Abfälle oder die Wiederverwendung des gebrauchten Brennstoffs durch dessen erneute Verarbeitung, Risikofaktoren in Bezug auf diese Phasen, ökologische Auswirkung und den Lebenszyklus der Reaktoren geführt werden müssen.

### **4.2.1 Abbau von Uran**

Um Uran aus Rohmaterial zu gewinnen, werden uranhaltige Gesteine, abgebaut und verschiedenen physikalischen und chemischen Prozessen ausgesetzt um eine Lösung zu erhalten, die

Uran enthält. Danach wird diese Lösung in Form von Uranaten ausgefällt. Während dieser Prozesse tritt eine geringe Menge Gas über die Abgase aus den Maschinen aus und aufgrund dieser Situation entsteht ein "Treibhauseffekt". Zusätzlich gibt es eine geringe Menge an Radioaktivitätsdispersion.

#### **4.2.2 Anreicherung von Uran**

Nachdem Uranerze extrahiert wurden, werden sie einem "Anreicherungsprozess" unterworfen, so dass sie in der Anlage verwendet werden können. Hier besteht jedoch das Risiko, dass während des Anreicherungsprozesses "Atomwaffen" produziert werden könnten. Dies kann dazu führen, dass sich einige Länder eher für die nukleare Bewaffnung als für die Energiegewinnung interessieren. Wenn Nuklearwaffen verwendet werden, bilden und verbreiten sich radioaktive Partikel nicht nur in dieser Region, sondern in einem viel breiteren geografischen Gebiet. Außerdem verseuchen sie diese Gebiete über Jahrzehnte.

#### **4.2.3 Betrieb eines Reaktors**

Alle Kernkraftwerke der Welt arbeiten auf Grundlage der Kernspaltung. Die Wärme, die aus dieser Reaktion entsteht, wird in Energie umgewandelt. Das Wasser wird erhitzt und Dampf bildet sich. Der Dampf wird unter hohem Druck in eine Turbine geleitet. Dann bewirkt die Turbine, dass sich der elektrische Generator dreht und während des Drehvorgangs wird Energie gewonnen. Alle diese Prozesse finden in einem System statt, das aus vielen mechanischen Teilen (ungefähr 50.000) besteht, von denen alle die Wahrscheinlichkeit haben, eventuell auszufallen. Dies ist ein Risikofaktor, der eventuellen Strahlungsaustritt erhöhen kann (Kurokawa G. et al., 2011). Zum Beispiel ist der Ausfall von Kühlsystemen und die daraus resultierende Überhitzung (Kernverschmelzung) eine der gravierendsten Bedrohungen, die zu einer Nuklearkatastrophe führen kann.

In verschiedenen Diskussionen über Kernkraftwerke wird das "Unfallrisiko" aufgrund der Spitzentechnologie und der getroffenen Sicherheitsmaßnahmen als relativ gering eingeschätzt. Dennoch wird bestätigt, dass im Falle eines Unfalls die Auswirkungen enorm sind (Erdösemeci F., 2014). Wenn Unfälle mit Kernkraftwerken auftreten, werden sie entsprechend ihres Ausmaßes anhand einer Skala bewertet.

Sie werden von 1 (am wenigsten folgenschwer) bis 7 (am folgenschwersten) eingestuft (IAEA und OECD / NEA, 2008). Selbst wenn jedoch festgestellt wird, dass das "Risiko gering ist", gab es in der 60-jährigen Geschichte der Kernkraftwerke 99 Kernkraftwerksunfälle, von denen 2 "sehr schwere Unfälle" auf Stufe 7 waren, 2 von ihnen waren "schwere Unfälle" auf Stufe 6, bei einem von ihnen handelte es sich um ein "Abseitsrisiko" (Unfälle mit Risiken außerhalb der Anlage) der Stufe 5 (Kurokawa et al., 2011: 13). Die drei berüchtigtsten "Kernfusions"-Unfälle waren ein Großunfall in Fukushima in Japan im Jahr 2011, in Tschernobyl in der Ukraine im Jahr 1986 und in den USA auf Three Mile Island in Pennsylvania im Jahr 1979. Auch zwischen den Jahren 1952-2011 fanden Kernfusionsunfälle in großem Maßstab in 4 Kernkraftwerken statt und kleinere Fusionen fanden in 10 Reaktoren statt. Auf 8 U-Booten, die der sowjetischen Armee gehörten (1961-1985), kam es zu Kernfusionen und Strahlungslecks. Die japanische Regierung hat nach dem Unfall in Fukushima 50 von 54 Reaktoren geschlossen. Dennoch werden sie in der IAEA Liste als „in Betrieb“ gelistet, so als würden sie in naher Zukunft wieder an das Netz angeschlossen werden. Nach dem Reaktorunfall von Fukushima beschloss Deutschland 8 seiner 18 Kernkraftwerke zu schließen. Außerdem wurde beschlossen die verbleibenden bis 2022 runterzufahren. Nach dem Unfall von Tschernobyl im Jahre 1986 beschloss Italien vier seiner Kraftwerke zu schließen und Österreich schloß ein eben erst fertiggestelltes Kernkraftwerk.

#### **4.2.4 Endlagerung der Brennstäbe**

Radioaktiver Abfall wird je nach Radioaktivität als schwach-, mittel- und hochradioaktiv eingestuft (IAEA, 1995). Die in Kernreaktoren anfallenden Abfälle gelten als "hochradioaktiver Abfall" und machen in Volumen und in Bezug auf Radioaktivität 3% aller radioaktiven Abfälle aus. Außerdem sind ihre Halbwertszeiten sehr lang (z.B. beträgt die Halbwertszeit von Plutonium 239 24 065 Jahre). Die Entsorgung nuklearer Abfälle könnte in zwei Phasen erfolgen:

**Verringerung des Volumens und der Radioaktivität durch Wiederaufbereitung und anschließende Lagerung:** Die Wiederaufbereitung ist eine sehr teure Technologie und auch eine Sicherheitsbedrohung. Zum Beispiel kann ein IGW Reaktor 240 kg Plutonium produzieren, diese Menge ist ausreichend für 20 Atomwaffen.

In einigen Kernreaktoren wird abgebrannter Brennstoff in einem System, welches dem in Abbildung 4.3 ähnlich ist, oberirdisch vor Ort gelagert. Sobald der verbrauchte Brennstoff abgekühlt ist, wird er in spezielle Behälter geladen. Jeder Behälter ist so ausgelegt, dass er abhängig von der Art der Montage etwa 2-6 Dutzend abgebrannte Brennelemente aufnehmen kann. Wasser und Luft werden entfernt. Der Behälter ist mit Inertgas gefüllt und verschlossen (geschweißt oder verschraubt).

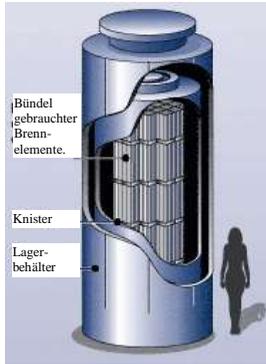


Abbildung 4.3 Vertikal aufgestellte Behälter aus Beton- und Stahlkonstruktionen

<https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>

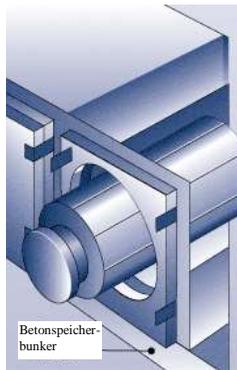


Abbildung 4.4 Horizontal aufgestellte Behälter

(<https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>)

Einige Behälter sind so konzipiert, dass sie horizontal in oberirdischen Betonbunkern gelagert werden können. Von diesen hat jeder etwa die Größe einer Autogarage (siehe Abbildung 4.4).

**b) Endlagerung:** In Ländern mit Kernkraftwerken beschäftigen sich bestimmte nationale und internationale Politiker mit der Endlagerung von radioaktiven Abfällen.

Das zentrale Thema bei der Entsorgung von nuklearen Abfällen ist, dass es auf der Welt kein Endlager gibt, welches "hochaktive Abfälle" sicher lagern kann. Verpflichtend für eine sichere Lagerung ist, dass der gelagerte Stoff für 250.000 Jahre keinerlei Gefahr darstellt (Altın S. und Kaptan H. Y., 2006). Überall auf der Welt werden die endgültigen Abfallentsorgungseinrichtungen, die „hochaktive Abfälle“ lagern können, geschlossen. Einer der letzten, die geschlossen werden mussten, befindet sich auf dem Yucca Mountain in Nevada in den USA. Im Jahr 2009 wurde dort der Lagerungsprozess gestoppt, es wird nachwievornach einer sinnvollen Lösung gesucht. Eine Zwischenlösung für das Problem der Endlagerung ist, die 20 jahrelange Lagerung der Abfälle auf der Anlage der Kernkraftwerke. Heutzutage werden hochradioaktive Abfälle in Carlsbad-New Mexico gelagert, während schwach radioaktive Abfälle in Barnwell-South Carolina, Richland-Washington, Clive-Utah und OakRidge-Tennessee gelagert werden (World Nuclear Association, 2014).

All dies zeigt, dass es immer noch ein weltweit wichtiges und ungelöstes Problem ist, einen sicheren Ort zu finden, an dem nukleare Abfälle gelagert werden können. Aus diesem Grund wird das Risiko auf zukünftige Generationen übertragen.

In einer Welt, in der es sehr schwierig ist, einen Platz für nukleare Abfälle zu finden, ist ein anderes Problem aufgetreten, das mit der "Ausfuhr gefährlicher Abfälle" zusammenhängt. Industrieländer liefern ihre radioaktiven Abfälle in Länder der 3. Welt. Was im Weiteren mit diesen Abfällen geschieht, ist ungewiss. Klar ist, dass diese Abfälle nicht nur für das lagernde Land gefährlich sind, sondern auch für alle anderen (das Ökosystem Erde beschränkt sich nicht auf Staatsgrenzen).

#### **4.2.5 Herunterfahren des Reaktors**

Kernkraftwerke sind in der Regel für eine Betriebsdauer von 30-40 Jahren ausgelegt. Diese Lebensdauer könnte durch geeignete Managementprogramme und neue technologische Entwicklungen auf maximal 60 Jahre verlängert werden. Die Kosten für den Rückbau eines Kernkraftwerks, welches seine Lebensdauer erreicht hat, können sehr hoch sein und das Risiko von Strahlungslecks kann ebenfalls erhöht werden. Wenn die wirtschaftliche Lebensdauer der Anlage erreicht ist, können die Kosten für die Demontage und die Entsorgung der Teile 10-15% der Gesamtkosten ausmachen (die Kosten für den Rückbau einer Standardanlage mit einer Leistung von 1200 MW in Deutschland und die Umwandlung in eine „Grünfläche“ belaufen sich beispielsweise auf rund 400 Millionen Euro, was 20% der ersten Investitionskosten ausmacht). In Frankreich beliefen sich die Kosten für die Demontage eines Kernkraftwerks von 900 MWe auf 15% der ersten Investitionskosten (World Nuclear Association, 2014). Das Besondere hierbei ist, dass sich diese Kosten zunächst auf das Unternehmen auswirken und dann indirekt vom Unternehmen auf die Gesellschaft weitergegeben wird.

#### **4.2.6 Kosten**

Die Kosten für ein Kernkraftwerk waren bisher immer höher als in den Zahlen der Politiker und Forscher angegeben, und "die Kosten, die es auf die Auswirkungen auf die Gemeinschaft und die Umwelt hat", wurden nicht in die Berechnungen einbezogen. Die Verbrauchskosten eines Kernkraftwerks mit einer sehr langen Bauzeit sind so, dass 60% der Kosten mit der Produktion zusammenhängen, 20% davon mit Brennstoff, 20% davon mit Wartungs- und Reparaturarbeiten. Innerhalb der Kosten des Stromes, die eine Anlage während ihrer Lebensdauer erzeugt, treten Details wie die erste Investition, Brennstoffe, Wartung

und Reparatur, Abfallentsorgung und ihre Deaktivierung während der gesamten Lebensdauer in den Vordergrund.

Die im weiteren angegebenen Kosten treten jedoch in den Hintergrund und werden nicht in die Kostenberechnung miteinbezogen.

- Kosten der FuE von Atomkraft, auch hinsichtlich Ihres Nutzen im direkten Vergleich mit anderen Energiesystemen
- Kosten von Problemen, die langfristig als Teil nuklearer Abfälle auftreten können, Kosten der Endlagerung
- Verlust des Wertes des Landes, auf dem das Kraftwerk errichtet wurde, Verlustes von Einnahmen aus dem Fremdenverkehr
- Folgekosten einer eventuell eintretenden Nuklearkatastrophe (z.B. Kosten für die Behandlung von Krankheiten im Zusammenhang mit Strahlung, Verlust von Arbeitskräften, Produktionsrückgang, Schäden an landwirtschaftlichen Flächen und Ökosystemen und Verschmutzung von Trinkwasserquellen)

Ebenso sollten die sehr hohen Investitionskosten, die langen Bauzeiten (10-12 Jahre) und die sehr kurze Lebensdauer (50-60 Jahre) nicht außer Acht gelassen werden. Berücksichtigt man diese und bezieht die Gefahr für folgende Generationen und die hohen Endlagerungskosten mit ein, sollte die Menschheit die Kosten und Nutzen einer Energieform die eine so kurze Lebensdauer hat, in Frage stellen (Extern-E, 1995).

#### **4.2.7 Kernkraftwerke als mögliches Angriffsziel in Kriegen und von Terroristen**

Im Falle eines Kriegsausbruchs zwischen Staaten, stellen Kernkraftwerke (sofern vorhanden) ein gutes Angriffsziel dar. Mit wenig Aufwand könnte enormer Schaden verursacht werden. Bei einem Sicherheitsdefizit können Kernkraftwerke zudem zu

offenen Zielen für nationalen und internationalen Terrorismus und Sabotage werden.

Wie im Abschnitt über die Vorteile der Kernenergie erläutert wurde, erzeugen Kernreaktoren keine Luftverschmutzung oder CO<sub>2</sub>, da sie anders als fossile Kraftwerken betrieben werden. Trotzdem erfordert das Verfahren, bei dem Uranerz abgebaut und gereinigt wird und es zu Reaktorbrennstoff wird, eine hohe Menge an Energie. Außerdem benötigen Kernkraftwerke große Mengen an Metall und Beton. Wenn fossile Brennstoffe für den Abbau und die Reinigung von Uranerz verwendet werden oder wenn fossile Brennstoffe bei der Errichtung von Kernkraftwerken verwendet werden, ist es schwer zu behaupten, dass Kernkraftwerke nur saubere Energie liefern.

### 4.3 Beurteilung von Kernkraftwerken unter ökologischen Aspekten

Auf der einen Seite steht das Problem der globalen Erwärmung und die daraus resultierenden Auswirkungen, spürbar für Menschen und Umwelt, und auf der anderen Seite steht die steigende Nachfrage nach Energie. Daher sind die großen Risiken, die die Kernkraftwerke bergen (obwohl behauptet wird, dass diese weniger schwer wiegen) Teil dieses Dilemmas und es muss diskutiert und entschieden werden, welche Auswirkungen für Mensch und Umwelt gravierender sind. Vor diesem Hintergrund wurde Tabelle 4.1 erstellt und Faktoren wie **der Klimawandel, die Menge an gewonnener Energie, wirtschaftliche Effizienz, Ökosystem, biologische Vielfalt, Sicherheit, Gesundheit der Gesellschaft, Rechte zukünftiger Generationen und die Beteiligung der Gesellschaft** wurden bewertet. Ebenso wurden ethische Aspekte hinsichtlich Ihrer Beeinflussung des Ökosystems bewertet (Hinweis auch auf politische, wirtschaftliche und soziologische Dimensionen).

Tabelle 4.1 Bewertung von Kernkraftwerken aus ökologischer Sicht

Ökologisches Universum	Bewertung aus ökologischer Sicht
Klimawandel	<p>Da es keinen direkten CO<sub>2</sub>-Ausstoß gibt, sind Kernkraftwerke nicht direkt an Treibhausgasemissionen beteiligt, die existierenden Anlagen haben sogar zu einer Reduzierung von 17% beigetragen.</p> <p>Dennoch steigt der weltweite Energiebedarf, um diesem gerecht zu werden, müssen weitere Atomkraftwerke gebaut werden, wobei jedes weitere die Gefahr für das Ökosystem erhöht.</p> <p>Auch wenn weitere Kernkraftwerke gebaut werden würden, bleiben die bekannten Begleitprobleme (Endlagerung, Kosten etc.).</p>
Menge an Energie	<p>Zwar ist die Energieeffizienz hoch, die Risikofaktoren leider ebenso.</p>
Wirtschaftliche Effizienz	<p>Leider werden oft ökologische Werte beiseitegeschoben und nur als zweitrangig und schädlich angesehen (Konflikt zwischen ökologischen und ökonomischen Aspekten).</p>
Ökosystem und Biodiversität	<p>Das Ökosystem kann gestört werden (Wälder, Wasserressourcen, Lebensmittelressourcen, Tierzucht etc.).</p> <p>Im Falle eines Reaktorunglücks:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch Dispersion werden radioaktive Elemente via Luft, Wind und Wasser in verschiedene Regionen und Kontinente transportiert</li> <li>• Akkumulation von Radioaktivität in der Nahrungskette</li> <li>• bleibende genetische Deformationen bei lebenden Spezies einschließlich Menschen</li> </ul>
Abfälle	<p>Das Strahlungslevel des Abfalls bleibt signifikant hoch und die Radioaktivität besteht eine lange Zeit (für hunderte bis tausende von Jahren).</p>

Ökologisches Universum	Bewertung aus ökologischer Sicht
	<p>Da die Abfälle eine hohe Radioaktivität aufweisen, kann es sehr teuer sein diese zu isolieren und ein Sicherheitsmangel könnte das Ökosystem schädigen.</p> <p>Es besteht ein Sicherheitsdefizit da es schwierig ist, einen sicheren Ort für die Lagerung des Abfalls zu finden, an dem Ökosysteme und / oder Lebewesen nicht gefährdet werden (Ziel ist es also einen geeigneten, sicheren Ort für hunderte von Jahren zu finden).</p> <p>Darüber hinaus können Orte, die heute als sicher gelten, aufgrund von Erdbeben und tektonischen Bewegungen in Zukunft riskant werden.</p>
Sicherheit	<p>“Menschliches Versagen” kann auch heute noch als sicher geltende Anlagen zu einem Sicherheitsrisiko machen.</p> <p>Große Naturkatastrphen schädigen auch die sicherste Reaktoranlage.</p>
Öffentliche Gesundheit	<p>Für die Menschheit ist es von hoher Bedeutung im Einkang mit der Natur zu leben, sich also als Teil der Erde und des Öksystems zu sehen.</p> <p>Es ist also dringend notwendig die Gesellschaft und somit auch deren Gesundheit und Gene vor Radioaktivität zu schützen.</p>
Zukünftige Generationen	<p>Das Risiko von genetischen Mutationen und einer Störung des Ökosystems, sollte nicht nur aus ökologischer Sicht vermieden werden, diese haben direkte Auswirkungen auf zukünftigen Generationen.</p>
Öffentliche Beteiligung	<p>Besonders die Pflanzen die in den gefährdeten Regionen angesiedelt sind, in denen lokale Gemeinschaften leben, können die Gefahr einer Zerstörung</p>

Ökologisches Universum	Bewertung aus ökologischer Sicht
	<p>der Gebiete und Zerstörung des traditionellen (ökologischen) Lebensstils mit sich bringen.</p> <p>Im Falle eines Unfalls kann der traditionelle Lebensstil von Gemeinschaften und deren Lebensbereiche wie Boden und Wasser durch Strahlungsauswirkungen stark beeinträchtigt werden.</p>

Während Entscheidungen über die Errichtung und den Betrieb von Kernkraftwerken, insbesondere in Entwicklungsländern, getroffen werden, ist es sehr wichtig, die Nutzen-Kosten-Analyse mit wissenschaftlichen Nachweisen zu betrachten und mögliche Auswirkungen (aus ökologischer Sicht) dieser Technologie zu untersuchen. Denn, besonders für Länder mit fragilen Volkswirtschaften, ist ein „wieder auf die Beine kommen“ nach einem Reaktorunfall, kaum möglich.

Der größte Vorteil, den die Verteidiger von Kernkraftwerken sehen, ist, dass die Anlagen einen positiven Beitrag zum globalen Klimawandel leisten und sehr energieeffizient sind. Außerdem werden diese Anlagen mit den technologischen Fortschritten effizienter und das Unfallrisiko wird deutlich gesenkt (Garnson W. A. und Modigliani A., 1989) (Yildirim M. und Örnek ©, 2007). Wenn der starke Druck des Klimawandels auf lebende Arten und Ökosysteme betrachtet wird, scheinen diese Merkmale positiv zu sein. Laut der von Pacala und Socolow (2004) durchgeführten Studie könnte die Kernenergie eine Option zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sein, um die globalen Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2050 zu fixieren (nicht zu reduzieren). Es besteht ein Bedarf an Kernkraftwerken, die eine Energie von 700 GW erzeugen. Laut Caldicott H. (2014), obwohl geplant ist, 10% der fossilen Energie über die Kernenergie weltweit ab 2050 zu ersetzen, ergab sich auch, dass bis dahin fast 100 Kernkraftwerke errichtet werden

müssten. Dies bedeutet, dass in den kommenden 36 Jahren, 28 neue Kernkraftwerke in Betrieb genommen werden müssten. Wenn das Ziel darin besteht, die Kohlendioxidemissionen durch Kernenergie auf die Hälfte zu reduzieren, anstatt die Kohlendioxidemissionen auf dem derzeitigen Niveau zu halten, müsste die Welt die Anzahl der Reaktoren auf insgesamt 1400 erhöhen. Diese Menge an Kernkraftwerken würde dazu führen, dass neue Abfälle entstehen und tausend Tonnen Plutonium produziert würden (auch als potentiell Rohmaterial für Atomwaffen).

Fast 83% der elektrischen Energie, die während der Anreicherungsphase des in einem Kernkraftwerk zu verwendenden Brennstoffs verbraucht wird, werden durch nicht-nukleare Energiequellen gedeckt. Wenn auch die Energie berücksichtigt wird, die erforderlich ist, um das Uran aus der Mine zu fördern und zu transportieren, wird dieses Verhältnis noch stärker. Dies bedeutet, dass während des Baus des Kernkraftwerks der Einsatz von Kohlenstoff und anderen Energiequellen erforderlich ist. Solange andere Faktoren, die den globalen Klimawandel verursachen, nicht beseitigt werden (insbesondere Abgase, Brände in Wäldern und Grasgebieten etc.), wird eine zunehmende Anzahl von Kernkraftwerken keine Lösung für dieses Problem schaffen. Im Gegenteil, es wird schwerwiegendere Probleme schaffen.

Ein weiterer Punkt in den Diskussionen über Kernkraftwerke (obwohl verschiedene physikalische Faktoren berücksichtigt werden, während Entscheidungen in Bezug auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle getroffen werden und während Risikoanalyse und Modellierung realisiert werden) ist, dass die "soziale" Dimension nicht ausreichend genug berücksichtigt wird.

## Referenzen

Altın, S., & Kaptan, H.Y. (2006). Radyoaktif atıkların oluşumu, etkileri ve yönetimi. In Proceedings of 12. Mühendislik Dekanlar Konseyi 2.Ulusal Mühendislik Kongresi, Zonguldak.

Caldicott, H. (2014). Nuclear power is not the answer. New York, U.S.A.: The New Press.

Dreicer, M., Tort, V., & Manen, P. (1995). ExternE: Externalities of energy Vol 5 Nuclear (EUR--16524-EN). International Atomic Energy Agency (IAEA).

Erdösemeci, F. (2014). Nükleer güç santrallerinin çevre etiği açısından irdelenmesi (Unpublished M.Sc. Thesis). Gazi University, Ankara.

Gamson, W. & Modigliani, A. (1989). Media discourse and public opinion on nuclear power: A constructionist approach. *American Journal of Sociology*. 95(1), 1-37.

IAEA (1995). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes” Annex I.

IAEA and OECD/NEA (2008). INES (The International Nuclear and Radiological Event Scale) User’s Manuel.

Karabulut, Y. (1999). Enerji kaynakları, Ankara, Turkey: Ankara Üniversitesi Basımevi.

Kurokawa, G., S. Iyengar, D. Macer, K. Uejima, N. Chaipraditkul, A. Dorjderem, S. Gardini, C. Liuying, C. Kuppawamy, J. Rajan and S. Rao (2011). Ethics of Nuclear Energy Technology (ECCAP WG12 Report). Ethics and Climate Change in Asia and Pacific (ECCAP) Project, Draft 6.

Pacala, S. & Socolow, R. (2004). Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*. 305(5686), 968-972.

Yıldırım, M., & Örnek, İ. (2007). Ultimate choice for energy: The nuclear energy. Gaziantep University Journal of Social Sciences. 6(1), 32-44.

Web page (2017), retrieved from [http://www.electrical-port.com/technical-pole-section/is nuclear alternative-what is nuclear energy -/4173#ad-image-0](http://www.electrical-port.com/technical-pole-section/is-nuclear-alternative-what-is-nuclear-energy-/4173#ad-image-0).

Web page (2017), retrieved from <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

Web page (2017), retrieved from <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>)

Web page (2017), retrieved from <http://www.world-nuclear.org/>

## 5 Solarenergiesysteme

**Autor:** Renewables Academy AG, Berlin, Deutschland

E-mail: [info@renac.de](mailto:info@renac.de)

**Kurzfassung:** Solarenergie ist die thermische Energie, die von der Sonne durch Kernspaltung und Verschmelzung von Wasserstoffatomen im Sonnenkern und auf seiner Oberfläche, emittiert wird. Die Verwendung von Solarenergie kann in direkte (z.B. Solarthermie oder Photovoltaik) oder indirekte Energie (z.B. Wind-, Hydro- oder Bioenergie) unterteilt werden. In diesem Kapitel wird die direkte energetische Nutzung behandelt, d.h. solarthermische und Photovoltaiktechnologien. Der erste Teil des Kapitels befasst sich mit technologischen Aspekten der verschiedenen Solarenergieanwendungen. Im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken stößt Energie aus erneuerbaren Energietechnologien weniger Treibhausgasemissionen aus, auch andere Umweltauswirkungen sind weniger stark. Es gibt jedoch einige Umweltbelastungen entlang der Wertschöpfungskette von Solarenergieprojekten. Einige davon werden im zweiten Teil dieses Kapitels näher beschrieben.

### **Lernziele:**

- Die Leser werden über verschiedene Solarenergietechnologien informiert.
- Die Leser werden in der Lage sein, die Umweltauswirkungen von Solarenergietechnologien entlang ihres Lebenszyklus zu bewerten.

## **5.1 Technologische Aspekte der Energieerzeugung in Solaranlagen**

Sonnenenergie ist die thermische Energie, die von der Sonne durch Kernspaltung und Verschmelzung von Wasserstoffatomen im Sonnenkern und auf seiner Oberfläche, emittiert wird. Die Sonne versorgt die Erde mit einer enormen Menge an Energie, die das Leben, wie wir es kennen, erst ermöglicht. Diese einfallende Energie wird von Partikeln und Molekülclustern in der Atmosphäre und an der Oberfläche der Erde und der Ozeane reflektiert, gestreut, absorbiert und wieder abgestrahlt. Dies wiederum verursacht Winde, ozeanische Strömungen, Verdunstung, Kondensation (Regen) und Regulierung der Erdoberflächentemperatur. Pflanzen und Bäume wandeln Lichtenergie photosynthetisch in chemische Energie um und erzeugen so Biomasse. Dies fällt in die Kategorie der indirekten Nutzung von Solarenergie.

Die Verwendung von Solarenergie kann in direkt (z.B. Solarthermie oder Photovoltaik) oder indirekt (z.B. Wind-, Hydro- oder Bioenergie) unterteilt werden. Dieses Kapitel behandelt nur den direkten Gebrauch.

Folgende Technologien zur direkten Nutzung der Sonnenenergie werden betrachtet:

Solarthermie-Anlagen nutzen die Solarenergie zur Erzeugung von Warmwasser für eine Vielzahl von Verbrauchern in bspw. Privathaushalten, Hotels, Krankenhäusern oder für industrielle Prozesse. Sie können auch in Raumheizungs- oder Kühlungsanwendungen gebraucht werden.

Konzentrierende Solarenergie-, Concentrated Solar Power (CSP) – Anlagen konzentrieren Sonnenenergie über Spiegel, um hohe Temperaturen zu erzeugen, die zur Dampferzeugung genutzt werden, um wiederum Dampfturbinen zur Stromerzeugung anzutreiben. Dies ist eine Solarthermie-Technologie zur Stromerzeugung.

Photovoltaische (PV) Systeme wandeln Solarenergie mittels Photoeffekt direkt in Elektrizität um.

### **5.1.1 Solarthermie**

Die Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärme oder thermische Energie wird als "Solarthermie" bezeichnet. Solarthermie hat die höchste Effizienz aller Arten von Solarenergie. Diese Wärmeenergie kann zur Trinkwassererwärmung, zur Raumheizung, für Prozesswärme oder auch zur Kühlung genutzt werden.

#### **Komponenten solarthermischer Anlagen**

##### **Absorber**

Das „Herz“ jeder Solaranlage ist der Absorber. Es besteht aus einem gut leitenden Material, vorzugsweise Kupfer. Aus wirtschaftlichen Gründen wird zunehmend Aluminium verwendet, es ist preiswerter als Kupfer und leitet ebenfalls gut. Die Oberfläche ist mit einer selektiven, strahlungsabsorbierenden Schicht beschichtet, die das Licht in Wärme umwandelt. Diese Wärme leitet dann durch das Metall zu Kanälen, in denen ein Wärmeübertragungsfluid zirkuliert. Die Wärme wird über Konvektion auf die Flüssigkeit übertragen und die heiße Flüssigkeit entweder dorthin transportiert, wo sie gebraucht wird oder wo sie gespeichert werden kann. Die Wärmeträgerflüssigkeit ist in der Regel Wasser oder eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel, jedoch kann auch Luft verwendet werden (siehe Abbildung 5.1).

##### **Kollektor**

Wenn höhere Temperaturen benötigt werden, wie zum Beispiel für Warmwasseraufbereitung, Beheizung von Räumen oder Prozesswärme, muss der Absorber abgedeckt und isoliert werden, um Wärmeverluste zu vermindern.

Es gibt zwei Arten von Kollektoren, den Flachkollektor und die Vakuumröhre. Im Flachkollektor ist wenige Zentimeter über

dem Absorber eine Glasabdeckung angebracht, die die Sonneneinstrahlung durchlässt, aber Konvektionswärmeverluste reduziert (Treibhauseffekt). Somit dringt Licht durch die Glasabdeckung und wird im Absorber in Wärme umgewandelt. Mineralfaser- oder Schaumisolierung ist an der Rückseite und an den Seiten des Kollektors angebracht, um Wärmeleitungs- und Konvektionsverluste zu minimieren und die Wärme im Inneren zu speichern.

Vakuurröhrenkollektoren haben einen hohen Wirkungsgrad aufgrund der guten Isoliereigenschaften des Vakuums in den Röhren. Ein einfacher Vakuurröhrentyp besteht aus einem entleerten Glasrohr, in welches ein Absorberstreifen mit einer selektiven Beschichtung eingebracht ist. Ein koaxiales Rohr (ein Rohr in einem Rohr) verläuft entlang der Länge der Unterseite des Absorberstreifens. Im Inneren des koaxialen Absorberrohrs strömt das Wärmeträgerfluid durch das Innenrohr und das Außenrohr zurück, wo es die Wärme vom Absorberband aufnimmt. Das Glasrohr ist mit einem Metalldeckel verschlossen. Das koaxiale Absorberrohr durchdringt diesen Deckel und mündet in ein Kopfrohr. Dies ist ein direkter Stromkollektor.

### **Wärmespeicher**

Es gibt Phasen, in denen die Sonneneinstrahlung nicht hoch genug ist, um die Nachfrage zu decken, zum Beispiel nachts und im Winter. In anderen Phasen ist die Sonneneinstrahlung zu hoch. Beide Situationen machen es wünschenswert, einen Wärmespeicher in der Solaranlage zu haben. Wasser wird normalerweise aus verschiedenen Gründen als Speichermedium verwendet: es hat eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität, es stellt kein Gesundheitsrisiko dar und ist fast überall verfügbar.

Warmwasserspeicher werden zur Warmwasserbereitung genutzt.

Speicher für Raumheizung oder Prozesswärmeanwendungen werden Pufferspeicher genannt. Diese enthalten Prozesswasser,

welches in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert und nicht verbraucht wird.

Kombispeicher sind Pufferspeicher mit integriertem Trinkwasserspeicher (Tank im Tank) oder integriertem Trinkwassererwärmer.

Der Speicher besteht, je nach Anwendung, aus Stahl, emailliertem Stahl, Edelstahl oder Kupfer. Drucklos (oder offen belüftete) Zylinder werden zunehmend aus Kunststoff, Kunststoffolie oder glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt.

Die Wärmeisolierung im Speicher ist sehr wichtig, um die Wärmeverluste so weit wie möglich zu reduzieren und somit die Gesamtsystemeffizienz zu erhöhen.

## **Pumpe**

In Zwangsumlaufsystemen werden Pumpen verwendet, um das Wärmeübertragungsfluid um das System herum zu bewegen. Der gleiche Pumpentyp kann wie in einem herkömmlichen Heizsystem verwendet werden. Die Pumpenspezifikation für solarthermische Anlagen ist jedoch etwas anders. In herkömmlichen Heizsystemen wird eine Pumpe mit hohem Durchsatz und niedrigem Druckverlust benötigt. Für Solarthermie-Systeme wird eine Pumpe mit hohem Druckverlust und niedriger Strömungsrate benötigt, d.h. eine Pumpe mit einer anderen Leistungskurve.

## **Ausdehnungsgefäß**

In geschlossenen Systemen nimmt ein Ausdehnungsgefäß die Fluidausdehnung auf, die aufgrund der sich ändernden Fluidtemperatur stattfindet. Ausdehnungsgefäße für konventionelle Heizsysteme können grundsätzlich in solarthermischen Anlagen eingesetzt werden. Wenn jedoch Frostschutzmittel verwendet werden, muss die Membran des Ausdehnungsgefäßes widerstandsfähig sein. Darüber hinaus müssen Maßnahmen

getroffen werden, um zu vermeiden, dass die Membran während Stagnationsperioden hohen Temperaturen ausgesetzt ist.

## Andere Komponenten

Flüssigkeit dehnt sich aus, wenn sie erhitzt wird und kann hohen Druck erzeugen. Daher muss ein Sicherheitsventil in ein abgedichtetes System eingebaut werden, um den Druck im Falle eines Anstiegs des Systemdrucks auf sichere Weise abzulassen. Ein solcher Druckanstieg kann auftreten, wenn beispielsweise eine andere Systemkomponente, wie das Ausdehnungsgefäß, ausfällt. Das Sicherheitsventil hat die gleiche Dimension wie bei einem herkömmlichen System.

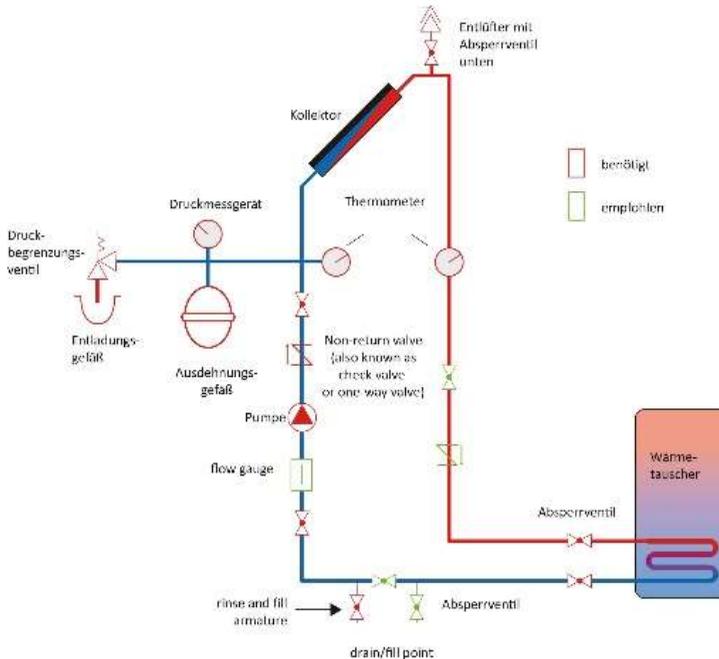


Abbildung 5.1 Solarthermische Systemkomponenten, Zwangsumlaufsystem

(Quelle: RENAC)

### **5.1.2 Konzentrierende Solarenergie (CSP)**

Konzentrierende Solarenergie (CSP) konzentriert die Sonnenstrahlung auf hohe Temperaturen im Bereich von 290 - 1000°C. Diese Wärmeenergie wird entweder direkt in Prozesswärmeanwendungen genutzt oder über Dampfturbinen in Strom umgewandelt.

CSP erfordert sehr hohe direkte Sonneneinstrahlung, daher sind die geografischen Standorte für die weltweite Umsetzung begrenzt. Parabolrinnen, Solarturm (oder Power Tower), der Lineare Fresnel-Reflektor und Parabolspiegel sind vier der wichtigsten Arten von CSP.

#### **Parabolrinnenkollektoren**

Die Sonnenstrahlung wird von der Parabolrinne auf einen über die Troglänge verlaufenden Vakuumröhrchen-Empfänger reflektiert (siehe Abbildung 5.2). Die Parabolrinnen sind ca. 8m über dem Boden installiert. Sie sind von Norden nach Süden ausgerichtet. Der Vakuumröhrchen-Empfänger enthält eine Wärmeübertragungsflüssigkeit, die durch die konzentrierende Sonnenstrahlung aufgeheizt wird. Das Wärmeübertragungsfluid liefert Wärme an einen Wärmetauscher in einem herkömmlichen Dampfkraftwerk. Wasser auf der anderen Seite des Wärmetauschers wird durch Erhitzen in Dampf umgewandelt, welcher eine Dampfturbine antreibt, um Elektrizität zu erzeugen. Je nach Anwendung kommen unterschiedliche Wärmeträger zum Einsatz.

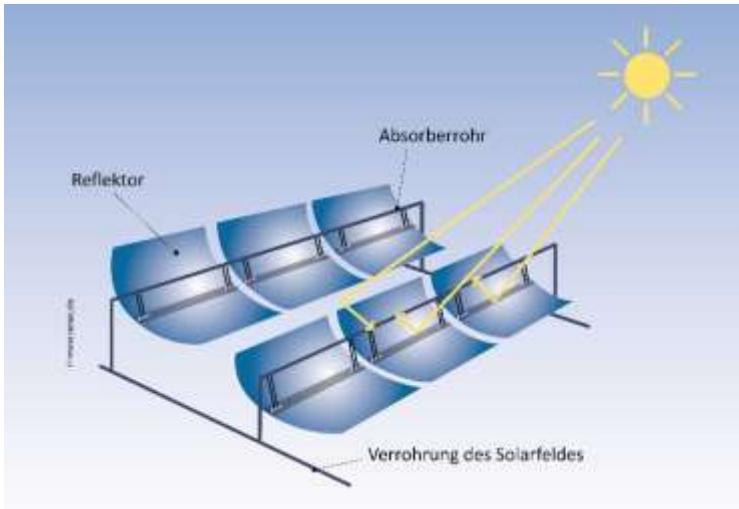


Abbildung 5.2 Schema eines Parabolrinnenkollektors

(Quelle: RENAC)

### **Solarturm** (Power Tower oder Zentralempfänger)

Sonnenstrahlung wird von Hunderten oder sogar Tausenden von Heliostaten (großen Stahlreflektoren) auf einen zentralen Empfänger auf der Oberseite des Solarturms reflektiert. Diese Technologie wird als "punktfokussierend" bezeichnet. Die Heliostaten sind jeweils mit einem Zwei-Achsen-Tracking-System mit je zwei Motoren ausgestattet. Die Heliostaten sind um den zentralen Empfänger entweder in der sie umgebenden Feldkonfiguration (typischerweise für größere Anlagen mit Kapazitäten von beispielsweise 100 MW) oder in der Nordfeldkonfiguration (typischerweise für kleinere Anlagen mit Kapazitäten von beispielsweise 20 MW) angeordnet (siehe Abb. 5.3).

Die auf den zentralen Empfänger des Turms reflektierte Sonnenstrahlung wandelt Wasser durch Erhitzung in Dampf um, dieser treibt eine Dampfturbine an, womit Elektrizität erzeugt wird.

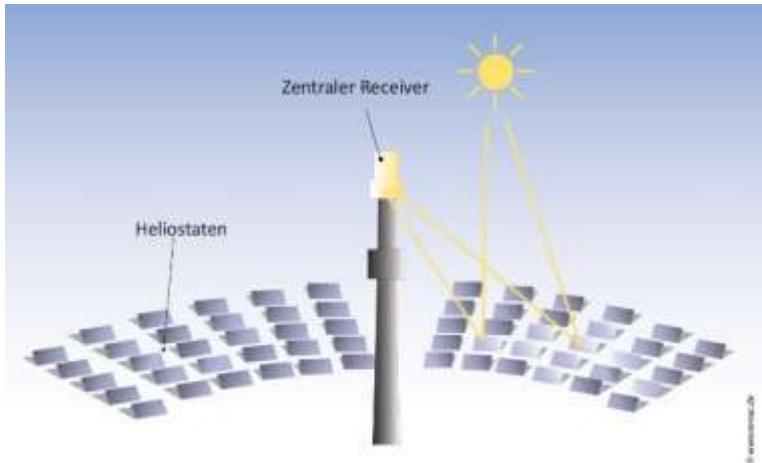


Abbildung 5.3 Betrieb eines Solarturms

(Quelle: RENAC)

## Lineare Fresnel Systeme

*Linear Fresnel* werden als "linienfokussierende" Technologie bezeichnet. Lineare Fresnel-Reflektoren (LFRs) nähern sich der Form von Parabolrinnen mit langen, gespiegelten Streifen, die die Sonnenstrahlung auf ein abwärts gerichtetes, feststehendes Empfängerrohr reflektieren, welches über die Länge des Reflektors verläuft (siehe Abbildung 5.4). Die Reflektorstreifen verfolgen die Sonne von Osten nach Westen, während das Empfängerrohr in einer festen Position bleibt. Ein Sekundärreflektor, der das Empfängerrohr umgibt, reflektiert jede unfokussierte Strahlung zurück auf das Rohr.

LFR-Systeme erwärmen Wasser, das direkt durch die Receiver fließt, um Dampf bei etwa 270°C zu erzeugen (Direct Steam Generation-DSG), wodurch synthetische Wärmeträger und Wärmetauscher überflüssig werden. Dies, zusammen mit den niedrigeren Herstellungs- und Installationskosten der Spiegel, machen LFR-Systeme günstiger als Parabolrinnensysteme.

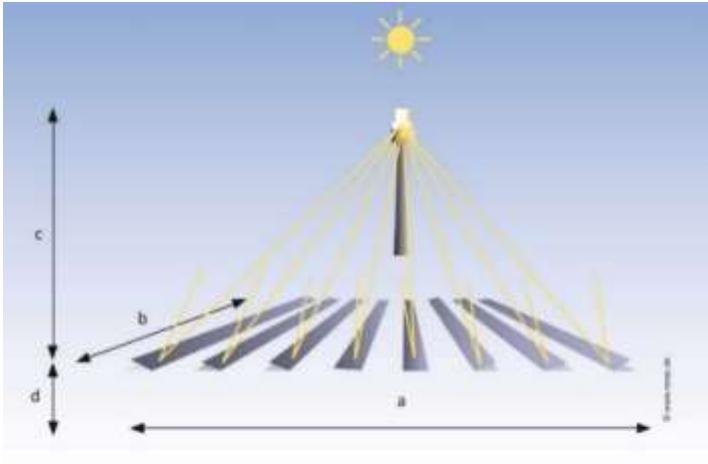


Abbildung 5.4 Betrieb eines linearen Fresnel Kollektors

(Quelle: RENAC)

### **Dish-Sterling Anlage**

Der Schalenreflektor (Parabolspiegel) konzentriert die Sonnenstrahlung auf einen Empfänger im Brennpunkt des Parabolspiegels ("Point-Focusing"-Technologie). Der „Empfänger“ wird auf etwa  $750^{\circ}\text{C}$  erhitzt und treibt einen kleinen Kolben, einen Stirlingmotor oder eine Mikroturbine an, die am Empfänger befestigt ist, um direkt im Parabolspiegel Strom zu erzeugen (siehe Abbildung 5.5). Der Spiegel verfolgt die Sonne den ganzen Tag. Der Output reicht typischerweise von 5-25 kW. Aufgrund der hohen Solarkonzentration und der Betriebstemperaturen können die Verteilersysteme einen Solar-Strom-Umwandlungswirkungsgrad von bis zu 30% erreichen.

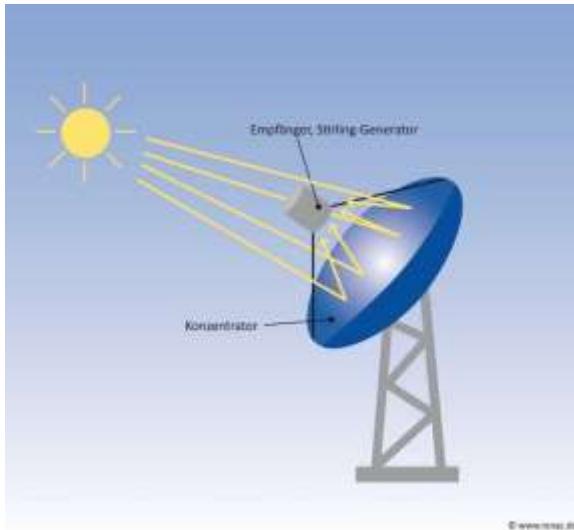


Abbildung 5.5 Betrieb eines Parabolspiegels

(Quelle: RENAC)

### 5.1.3 Photovoltaik

Es gibt zwei grundlegende Systemtypen für PV-Systeme: netzgebundene Systeme und netzunabhängige Systeme. Netzgebundene PV-Anlagen speisen ihre Stromerzeugung in ein zentrales Stromnetz ein. Netzgebundene Systeme können in großtechnischen Energieerzeugungsanlagen mit PV-Kraftwerken und Haushalts- oder Industrie-Energieversorgung eingesetzt werden.

Netzunabhängige Inselnetz-PV-Anlagen können in vielen Bereichen eingesetzt werden, in denen keine Stromnetzanbindung besteht, z.B. für Wasserpumpen für die Bewässerung, Solar Home Systems (SHS) für Haushalte in ländlichen Gebieten, Kommunikationsantennen, Telemetriestationen etc.

Die Abbildung 5.7 zeigt ein grundlegendes Schema einiger der wesentlichen Komponenten in netzunabhängigen und netzgekoppelten PV-Systemen.

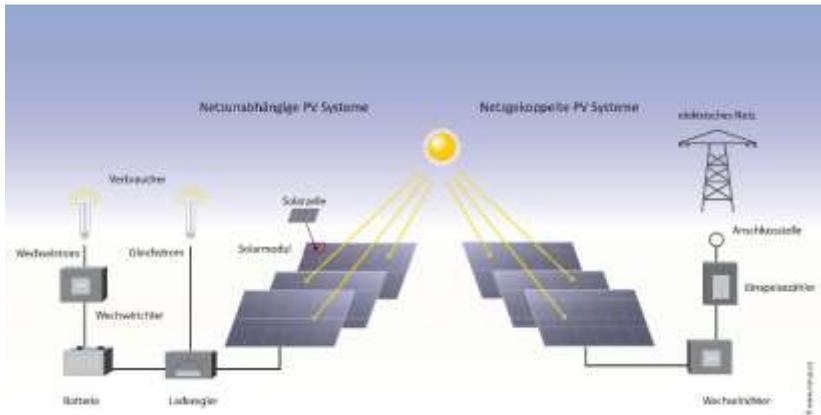


Abbildung 5.6 Übersicht eines netzungebundenen und eines netzgebundenen PV-Systems

(Quelle: RENAC)

## Komponenten eines PV-Systems

### Solarzellen

Monokristalline und multikristalline c-Si-Zellen sind Wafer-basiert mit Dicken im Bereich von 100 bis 250  $\mu\text{m}$  und Größen von 4 bis 6 Zoll. Die Wafer werden mit unterschiedlichen Methoden aus der Siliziumschmelze gewonnen, zu Blöcken verdichtet und anschließend mit einer Drahtsäge zurechtgeschnitten. Aufgrund der Notwendigkeit einer sehr hohen Reinheit wird während des Herstellungsprozesses viel Energie verbraucht, da Hochtemperaturprozesse notwendig sind, um Defekte zu vermeiden. Die elektrischen Kontakte auf Vorder- und Rückseite werden im Siebdruckverfahren aufgebracht.

Dünnschichtsolarzellen (amorphes Si, Cadmiumtellurid, Kupfer-Indium-Gallium-Selenid-Solarzelle[CIGS]) werden

üblicherweise auf einem Stück Glas befestigt. Die Oberfläche wird dann mit einem Laser vorbereitet und die elektrischen Kontakte werden angebracht. Die für die Dünnschichtherstellung benötigte Energie ist viel niedriger als für c-Si-Solarzellen, da die Herstellung ein Niedrigtemperaturprozess ist. Darüber hinaus ist der Herstellungsprozess daher viel schneller und billiger als der von c-Si, jedoch sind auch die Wirkungsgrade der Technologien niedriger als bei c-Si.

### **Solarmodule**

Solarmodule bestehen aus einer Anzahl von Solarzellen, die in Reihe und parallel-geschaltet sind, um eine gewünschte Endleistung des Moduls zu erhalten. Die Anzahl der Solarzellen in kristallinen Modulen variiert typischerweise zwischen 36 und 72 Zellen. Die Solarzellen sind elektrisch verbunden und sandwichartig zwischen zwei sehr dünnen transparenten Schichten aus dampfdichtem Einkapselungsmaterial (üblicherweise aus Ethylen-Vinyl-Acetat oder EVA hergestellt) auf einer reflektierenden Rückschicht (üblicherweise aus Polyvinylfluorid hergestellt) angebracht. Anschließend werden sie entsprechend angeordnet, versiegelt und mit einer Glasabdeckung in einem Aluminiumrahmen befestigt.

### **Wechselrichter (Inverter)**

Wechselrichter wandeln Gleichstrom (DC) in Wechselstrom (AC) um und regeln Spannung und Frequenz. Es gibt zwei Arten von Wechselrichtern: ein- und dreiphasige Wechselrichter. Einphasige Wechselrichter liefern Wechselstrom an eine Phase einer Stromübertragungsleitung, während dreiphasige Wechselrichter Wechselstrom an alle drei Phasen einer Stromübertragungsleitung liefern. Kleine Systeme, typischerweise unter 5 kWp, verwenden normalerweise einphasige Wechselrichter, da eine Leitung ausreicht, um die von einer PV-Anlage abgegebene Leistung zu absorbieren.

#### **5.1.4 Solarthermie: Umweltauswirkungen**

Kleinere Solarthermie-Technologie wird hauptsächlich zur Gebrauchswassererwärmung eingesetzt und meist auf dem Dach eines Wohnhauses installiert.

Laut der Studie „Environmental impacts from energy sector“, sind während der Betriebsphase zwei bestimmte Umweltauswirkungen zu bemerken, darunter die visuelle Auswirkung: Solarthermie auf Dächern von Wohngebäuden kann optische Auswirkungen auf die Ästhetik des Gebäudes haben (Tsoutsos, Frantzeskaki, & Gekas, 2005). Die Reflektion vom Verglasungsspiegel könnte auch eine mögliche Auswirkung auf die Nachbarn haben. Weiterhin die Abfallproduktion: Abhängig von den solarthermischen Systemen werden verschiedene Arten von Kühlflüssigkeiten verwendet. Diese können Frostschutzmittel oder Rostschutzmittel enthalten. Solche Flüssigkeiten können Glykol, Nitrate, Nitrite, Chromate, Sulfite und Sulfate enthalten. Komplexere Substanzen wie aromatische Alkohole, Öle, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) usw. werden auch in Anwendungen mit höheren Temperaturen verwendet. Diese Mittel können Wasser verschmutzen und müssen angemessen entsorgt und während des Betriebs vorsichtig behandelt werden, um jegliches Auslaufen zu verhindern und Wasserverschmutzung zu vermeiden. (Tsoutsos, Frantzeskaki, & Gekas, 2005). Nachfolgend findet sich ein Überblick über weitere mögliche Umweltauswirkungen durch den Einsatz von kleinen thermischen Solaranlagen.

Tabelle 5.1 Umweltauswirkungen von kleintechnischer Solarthermie zum Heizen.

<b>Rohstoffgewinnung</b>	<b>Herstellung</b>	<b>Konstruktion</b>	<b>Betrieb</b>	<b>Außerbetriebnahme</b>
Biodiversitätsverlust	Wasserbelastung	Abfallproduktion	Erkennbare Wirkung	Abfallproduktion
Lebensraumverlust	Abfallproduktion	Luftverschmutzung	Abfallproduktion	Luftverschmutzung
Toxische Abwässer				
Abfallproduktion				
Erschöpfung der natürlichen Ressourcen				
CO2 und andere Treibhausgasemissionen				
Lärmbelästigung (außer in der Betriebsphase)				

### 5.2.2 CSP: Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen einer CSP-Anlage sind in Wu et al. (2014) aufgeführt.

Tabelle 5.2 Umwelteinflüsse durch konzentrierende Solarenergie.

Rohstoffgewinnung	Herstellung	Konstruktion	Betrieb	Außerbetriebnahme
Biodiversitätsverlust Verlust des Lebensraums Giftige Abwässer Abfallproduktion Erschöpfung der natürlichen Ressourcen	Wasserbelastung und Verschmutzung Abfallproduktion	Biodiversitätsverlust Erosion Wasser- und Bodenverschmutzung Luftverschmutzung	Übermäßiger Wasserverbrauch Erkennbare Wirkung Sinkende Bodentemperatur Abfallproduktion	Staubproduktion Abfallproduktion
CO2 und andere Treibhausgasemissionen				
Lärmbelästigung				

### Wasserverbrauch

CSP hat im Vergleich zu Photovoltaik- und Windkraftanlagen den höchsten Wasserverbrauch pro Elektrizitätseinheit. In einer CSP-Anlage, die die Nass-Technologie zur Kühlung von Dampf aus dem Stromgenerator verwendet, wird im Vergleich zur Trockenluft-Kühltechnologie mehr Wasser verbraucht. Das Wasser wird nicht nur zum Kühlen verwendet, sondern auch zum Reinigen der Spiegel, da die meisten CSP-Anlagen auf halbtrockenen Gebieten errichtet werden, in denen eine hohe Sonneneinstrahlung vorhanden ist, die zur Staubsuspension neigt. Um den Wasserverlust zu reduzieren, sollte ein effizientes System zur Wassergewinnung und -wiederverwendung genutzt werden.

## **Absinken der Bodentemperatur**

Aufgrund der Schattierungen und der veränderten Luftströmung von den Spiegelplatten in CSP-Anlagen wurden Bodentemperaturänderungen im Bereich von 0,5 bis 4°C in einer Studie von Wu, Z. et al. festgestellt. Solche Temperaturveränderungen könnten CSP-Anlagenbereiche, die mit wachsenden Kulturen kombiniert sind, beeinflussen. Die Veränderung der Bodentemperatur könnte vor allem jene Pflanzen beeinflussen, die empfindlich auf die Bodentemperatur reagieren (Wu, et al., 2014).

## **Abfallproduktion**

In einer CSP-Anlage werden während des Betriebs verschiedene gefährliche und nicht gefährliche Abfälle erzeugt. In einer Studie von ACWA POWER zu spezifischen ökologischen und sozialen Auswirkungen von CSP-Anlagen sind mögliche gefährliche Abfälle, die während des Betriebs der Anlagen anfallen, folgende: Schlamm aus Abwasser- und Altölbehandlungsverfahren, Altöl, Ölschlamm, ölhaltige Lappen, Chemikalien, Lösungsmittel aus der allgemeinen Wartung von Maschinen vor Ort, gebrauchte Chemikalien- und Brennstofffässer, Bodenkontamination durch mögliche Verschüttungen und Leckagen etc. Solche Abfälle müssen fachgerecht entsorgt werden, da sie sonst die menschliche Gesundheit und die Umwelt schädigen könnten (ACWA Power, 2015).

### **5.1.5 Photovoltaik: Umweltauswirkungen**

Während des Lebenszyklus von Photovoltaikanlagen können mehrere Umwelteinflüsse beobachtet werden.

Die Auswirkungen können in verschiedenen Phasen zusammengefasst werden.

Tabelle 5.3 Umweltauswirkungen von PV in seinem Lebenszyklus  
(Hernandez, et al., 2014); eigene Darstellung

Rohstoffgewinnung	Herstellung	Konstruktion	Betrieb	Außerbetriebnahme
Biodiversitätsverlust Verlust des Lebensraums Abfallproduktion Erschöpfung der natürlichen Ressourcen	Wasserbelastung und Verschmutzung Abfallproduktion	Biodiversitätsverlust Erosion Wasser- und Bodenverschmutzung Landnutzung und Flächendeckung ändern sich Erdbewegung durch Transport	Veränderung des Mikroklimas und der lokalen Hydrologie Visuelle Auswirkungen Veränderung der Landoberflächentemperatur und der atmosphärischen Randbedingungen	Staubproduktion Abfallproduktion
CO <sub>2</sub> - und andere THG-Emissionen anderer Versorgungsunternehmen wie Transportfahrzeuge kommen hinzu				
Lärmbelästigung				

### **Biodiversitätsverlust, Bodenerosion und Änderung der Flächennutzung und Flächendeckung**

Photovoltaikanlagen erfordern in der Regel eine große Fläche, daher muss die Vegetation entfernt und der Boden für die Installation bereit gemacht werden. PV-Anlagen im Versorgungsbereich erfordern in der Regel eine große Fläche, daher wird die Vegetation entfernt. Solche Aktivitäten führen folglich zu Lebensraumverlust, Bodenerosion, Fragmentierung und Verlust der Biodiversität.

## **Ökologische Auswirkungen von Übertragungsleitungen und -gängen**

Für eine zentrale Stromversorgungsanlage werden Übertragungsleitungen und Gänge für den Netzanschluss gebaut. Solche Konstruktionen verbrauchen viel Energie und Material. Fragmentierung in den Wäldern ist auch einer der Auswirkungen.

### **Abfallproduktion**

In jeder Phase des Photovoltaik-Lebenszyklus werden Abfälle produziert. Zum Beispiel ist es in der Phase der Stilllegung wichtig, dass die PV-Anlagen sorgfältig recycelt werden. PV-Module enthalten giftige Stoffe wie Cadmium-, Arsen- und Silikatstaub. Kieselsäurestaub kann bei längerer Einatmung eine chronisch-obstruktive Lungenerkrankung (COPD) verursachen (Hnizdo & Vallathan, 2003).

### **Treibhausgasemissionen**

Im Lebenszyklus einer PV-Anlage treten THG-Emissionen häufig auf. Entweder während der Rohstoffbeschaffung oder während der Betriebs- und Wartungsphase. Die Emissionen stammen aus der Energie, die von verschiedenen Verkehrsträgern wie Fahrzeugen verbraucht wird.

### **Wasserverbrauch**

Um die Effizienz von PV-Anlagen zu erhalten, wird während der Betriebs- und Wartungsphase Wasser verwendet, um den in den Platten abgelagerten Staub zu entfernen und die Staubsuspension dort zu unterdrücken, wo sie problematisch ist. In halbtrockenen Gebieten, in denen Wasser knapp ist, könnte ein hoher Wasserverbrauch die Umwelt und die Bewohner negativ beeinträchtigen.

Tabelle 4 zeigt die Menge an Wasser, die pro Einheit in zwei Phasen verbraucht wird. Wir können sehen, dass PV im

Vergleich zu CSP und Wind weniger Wasser pro produzierte TjH Strom verbraucht.

Tabelle 5.4 Wasserfußabdruck pro Einheit Elektrizität aus verschiedenen Energiequellen.

Energiequelle	Konstruktion	Betrieb	Summe
	WF (m3 TjH-1)	WF (m3 TjH-1)	WF (m3 TjH-1)
Konzentrierende solarenergie	84 – 179 (169)	34 – 2000 (559)	118 - 2180
Photovoltaik	5.3 – 221 (86)	1.1 – 82 (19)	6.4 – 303
Wind	0.10 – 9.5(1)	0.1 – 2.1 (0.2)	0.2 – 12

Werte in Klammern stellen den Median dar (Mekonnen, Gerbens-Leenes, & Hoekstra, 2015)

### Zusammenfassung

Von allen drei Solartechnologien wurden verschiedene Arten der Auswirkungen von der Phase der Errichtung bis zur Stilllegung oder auch nur einer bestimmten Phase diskutiert. Dies gibt einen Überblick über die Faktoren, die sich auf die Umwelt auswirken, und die Minderungsmaßnahmen, die bei der Durchführung von Projekten im Bereich der erneuerbaren Energien zu berücksichtigen sind, um die Auswirkungen zu vermeiden oder so gering wie möglich zu halten. Es gibt viele Gemeinsamkeiten und auch Unterschiede in der Kunst der Auswirkungen auf die Umwelt (siehe Abbildung 5.8). Letztendlich liegt es in der Verantwortung des Projektentwicklers auf eine möglichst geringe Auswirkung der Solartechnologien zu achten.

In Abbildung 5.9 ist ein Vergleich der Umweltauswirkungen zwischen den drei Stromerzeugungstechnologien CSP, Photovoltaik und Wind während ihres Lebenszyklus in drei Wirkungskategorien vom Rohstoffeinkauf bis zur Stilllegung dargestellt. Diese Abbildung gibt einen Überblick darüber, welche Art von Technologien und innerhalb welcher Technologie welche Art von Materialien und Systemen unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Zum Beispiel hat PV aus Kupfer Indium Gallium Selenide (CIGS) auf dem Dach montiert und CIGS PV auf dem Boden montiert unterschiedliche Auswirkungen in allen drei Auswirkungs-Kategorien. Vergleicht man die Technologien nur in diesen drei Kategorien, könnte man sehen, dass die Windenergie-technologie die geringsten Auswirkungen hat. In Kapitel 6 werden die Windenergie-technologie und ihre Umweltauswirkungen weiter diskutiert.

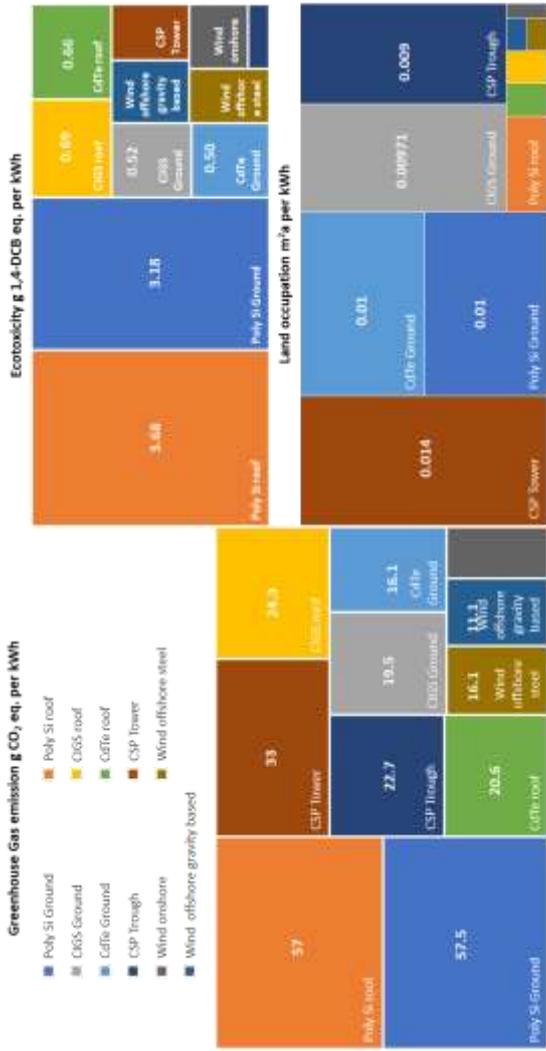


Abbildung 5.7 Umweltauswirkungen von Photovoltaik, konzentrierter Solarenergie und Windkraft pro kWh erzeugter Elektrizität (Polykristallines Silizium (Poly-Si), Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS), Cadmium-Tellurid (CdTe))

(Hertwich, et al., 2014) GI=Äquivalent, CFC = Fluorchlorkohlenwasserstoff, DCB = Dichlorbenzol, m<sub>2a</sub> = Quadratmeterjahr und eigene Darstellung

## Referenzen

Achieng Ogola, P. F. (2007, November 2-17). Environmental Impact Assessment General Procedures. *United Nations University - Geothermal Training Programme*. Naivasha, Kenya.

ACWA Power. (2015). *Specific Environment and Social Impact Assessment*. Ouarzazate Morocco. Retrieved July 14, 2017, from <http://documents.worldbank.org/curated/en/618461468274482428/pdf/E44890V90P131200Box391417B00PUBLIC0.pdf>

Allan L. Drewitt, R. H. (2006, March 27). Assessing the impacts of wind farms on birds. *International journal of avian science*, 148, pp. 29 - 42.

B. Corona, E. C. (2016, June 29). Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs. *Elsevier*, 135, pp. 758 - 768.

Corona, B., Cerrajero, E., López, D., & San Miguel, G. (2016, June 29). Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs. *Elsevier*, 135, pp. 758 - 768. doi:10.1016/j.solener.2016.06.059

Department of the Environment, Heritage and Local Government of Ireland. (2006).

Drewitt, A., & Langston, R. (2006, March 27). Assessing the impacts of wind farms on birds. *International journal of avian science*, 148, pp. 29 - 42.

Edgar G. Hertwich, T. G. (2014, September 3). Integrated life cycle assessment of electricity supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 112(20), pp. 6277 – 6282.

Fthenakis, V., & Kim, H. (2011, February 23). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85, pp. 1609 - 1628. doi:10.1016/j.solener.2009.10.002

Gauld, R. (2007). Wind developments: Ecological, technical and social impact considerations. Orkney Sustainable Energy Ltd.

H Kunz, T., Arnett, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., Tuttle, M. D. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(6), pp. 315 - 324.

Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., . Allen, M. F. (2014, August 11). Environmental Impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 766 - 779. doi:10.1016/j.rser.2013.08.041

Hertwich, E., Gibon, T., Bouman, E., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G., Shi, L. (2014, September 3). Integrated life cycle assessment of electricity supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 112(20), pp. 6277 – 6282. doi: 10.1073/pnas.1312753111

Hnizdo E, V. V. (2003, April 1). Chronic obstructive pulmonary disease due to occupational exposure to silica dust: a review of epidemiological and pathological evidence. *Occupational and Environmental Medicine*, 60, pp. 237 - 243.

Hnizdo, E., & Vallathan, V. (2003, April 1). Chronic obstructive pulmonary disease due to occupational exposure to silica dust: a review of epidemiological and pathological evidence. *Occupational and Environmental Medicine*, 60, pp. 237 - 243. doi:10.1136/oem.60.4.237

Ladenburg, J. (2009, June 27). Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience. *Applied Energy*, 86, pp. 380-387.

Ladenburg, J. (2009, June 27). Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience. *Applied Energy*, 86, pp. 380-387. doi:10.1016/j.apenergy.2008.05.005

Mário S, B. R. (2010). Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain ecosystems of northwest Portugal. *Ecological Indicators*, 10, pp. 192 - 205.

Magoha, P. W. (2002). Footprints in the wind?: environmental impacts of wind power development. *Fuel and Energy Kurzfassungs*, 3(5), pp. 30 - 33. doi:10.1016/S1471-0846(02)80083-X

Mekonnen, M., Gerbens-Leenes, P., & Hoekstra, A. (2015, March 9). The consumptive water footprint (WF) of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 1, pp. 285 - 297. doi:10.1039/c5ew00026b

Mesfin M. Mekonnen, P. W.-L. (2015, March 9). The consumptive water footprint (WF) of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 1, pp. 285 - 297.

Ogola, P. F. (2007, November 2-17). Environmental Impact Assessment General Procedures. *United Nations University - Geothermal Training Programme*. Naivasha, Kenya.

P., M. (2002). Footprints in the wind?: environmental impacts of wind power development. *Fuel and Energy Kurzfassungs*, 3(5), pp. 30 - 33.

R. R. Hernandez, S. B.-M.-H. (2014, August 11). Environmental Impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 766 - 779.

- R. Saidur, N. R. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp. 2423 - 2430.
- Renewables Academy (RENAC) AG. (2017, January 19). Environmental and social standards in renewable energy (PV, wind and biomass) project finance. Berlin, Germany.
- Saidur, R., Rahim, N., Islam, M., & Solangi, K. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp. 2423 - 2430. doi:10.1016/j.rser.2011.02.024
- Santos, M., Bastos, R., Travassos, P., Bessa, R., Repas, M., & Cabral, J. (2010). Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain ecosystems of northwest Portugal. *Ecological Indicators*, 10, pp. 192 - 205. doi:10.1016/j.ecolind.2009.04.014
- Theocharis Tsoutsos, N. F. (2005). Environmental impacts from the solar energy technology. *Energy Policy*(33), pp. 289 - 296. doi:10.1016/S0301-4215(03)00241-6
- Thomas H Kunz, E. B. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(6), pp. 315 - 324.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*(33), pp. 289 - 296. doi:10.1016/S0301-4215(03)00241-6
- V. M. Fthenakis, H. C. (2011, February 23). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85, pp. 1609 - 1628.
- World Wind Energy Association. (2011).
- Wu, Z., Hou, A., Chang, C., Huang, X., Shi, D., & Wang, Z. (2014). Environmental impacts of large-scale CSP plants in

northwestern China. *Environmental Science Processes & Impacts*, 16, pp. 2432 - 2441. doi:10.1039/C4EM00235K

Zhiyong Wu, A. H. (2014). Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. *Environmental Science Processes & Impacts*, 16(10), pp. 2432 - 2441.

## 6 Windenergie

**Autor:** Renewables Academy AG, Schönhauser Allee 10-11, 10119 Berlin-Deutschland

**Kurzfassung:** Die Nutzung von Solarenergie kann als direkt (z. B. Solarthermie oder Photovoltaik) oder indirekt (z. B. Wind-, Hydro- oder Bioenergie) klassifiziert werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der indirekten Nutzung von Solarenergie: Im ersten Teil werden physikalische und technologische Grundlagen aus der Nutzung der Windenergie skizziert.

Obwohl der Wasser-Fußabdruck einer Windkraftanlage vergleichsweise geringer ist als der einer PV- und CSP-Anlage, ergeben sich verschiedene Umweltauswirkungen während der Bau-, Betriebs- und Stilllegungsphase von Windenergieprojekten, die im zweiten Teil des Kapitels zusammengefasst sind.

### **Lernziele:**

Am Ende dieses Kapitels ist der Leser

- über die Windenergie-Technologie informiert
- in der Lage, die Umweltauswirkungen der Windenergie während ihres Lebenszyklus zu bewerten

### **6.1 Windenergie**

Wind wird in Windkraftanlagen zur Energieerzeugung genutzt. Die Windenergie stammt von der Sonne. Sonnenstrahlung fällt auf die Erde und die Temperaturdifferenz zwischen dem Äquator und den Polen treibt thermische Ströme - oder Winde - an, die um den Globus zirkulieren. Die Atmosphäre ist eine große thermische Maschine, die ständig Wind produziert.

Luftmassenströme fließen zwischen Bereichen mit niedrigem und hohem Druck. Bisher können Winde bis ca. 200 m über dem Boden von der Windindustrie "geerntet" werden. Windkraftanlagen können Strom bei Windgeschwindigkeiten von 3

m/s bis 35 m/s erzeugen. Einige speziell entworfene Windturbinen können sogar bei niedrigeren oder höheren Windgeschwindigkeiten arbeiten. Hurrikane, Taifune, Tornados oder Gewitter sind nicht geeignet, weil die Luftbewegungen sehr stark sind und schwere Schäden an der Windkraftanlage verursachen können.

Der Wind ändert oft seine Geschwindigkeit und seine Richtung. Schnelle Schwankungen werden als Böen und Flauten bezeichnet. Eine Böe ist ein plötzlicher Anstieg der Windgeschwindigkeit und eine Flaute ein plötzlicher Abfall der Windgeschwindigkeit. Diese Böen und Flauten werden durch Turbulenzen verursacht.

## **6.2 Windturbinenelemente**

### **Allgemeines Design**

Windturbinen können so gebaut werden, dass sie starken Stürmen standhalten, unter arktischen oder tropischen Wetterbedingungen funktionieren, wie im Meer, vor Küsten oder in Wüsten. Für spezielle Zwecke gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Designs.

Windturbinen sind mit einer vertikalen oder horizontalen Achse angelegt, einem oder bis zu etwa 20 Rotorblättern, kleine Leistungen mit geringem Watt bis zu einigen Megawatt, mit oder ohne Getriebe und mit Gleichstrom- oder Wechselstrom-Generator. Ein allgemeines Design existiert nicht, obwohl die dreiflügeligen horizontalen Aufwind-Turbinen die erfolgreichsten sind. Bei diesen Turbinen stehen die Rotorblätter dem Wind gegenüber, bei den sogenannten Downwind-Turbinen (Aufwind-Turbinen) steht die Gondel dem Wind gegenüber.

Die Hauptkomponenten einer Windenergieanlage sind:

- Rotorblätter
- Gondel und Kontrollen
- Generator und Elektronik

- Turmkomponenten

Die Abbildung 6.1 zeigt die Komponenten einer Windenergieanlage und Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die in der Komponente verwendeten Materialien. Im folgenden Abschnitt werden die Detailinformationen zu den Komponenten erläutert.

### **6.2.1 Rotorblätter**

Rotorblätter "fangen" den Wind ein und wandeln seine Antriebsenergie in die Rotation der Nabe um (siehe Abbildung 6.1). Die Nabe leitet die Energie von den Rotorblättern auf den Generator. Wenn die Windkraftanlagen über ein Getriebe verfügen, ist die Nabe mit der langsam rotierenden Getriebewelle verbunden und wandelt die Energie aus dem Wind in Rotationsenergie um.

Hat die Turbine einen Direktantrieb, gibt die Nabe die Energie direkt an den Ringgenerator weiter. Jeder Hersteller hat seine eigenen Rotorblattkonzepte und forscht an innovativen Designs; es gibt viele unterschiedliche Variationen. Im Allgemeinen sind jedoch alle modernen Rotorblätter ähnlich wie Flugzeugflügel konstruiert (World Wind Energy Association, 2011).

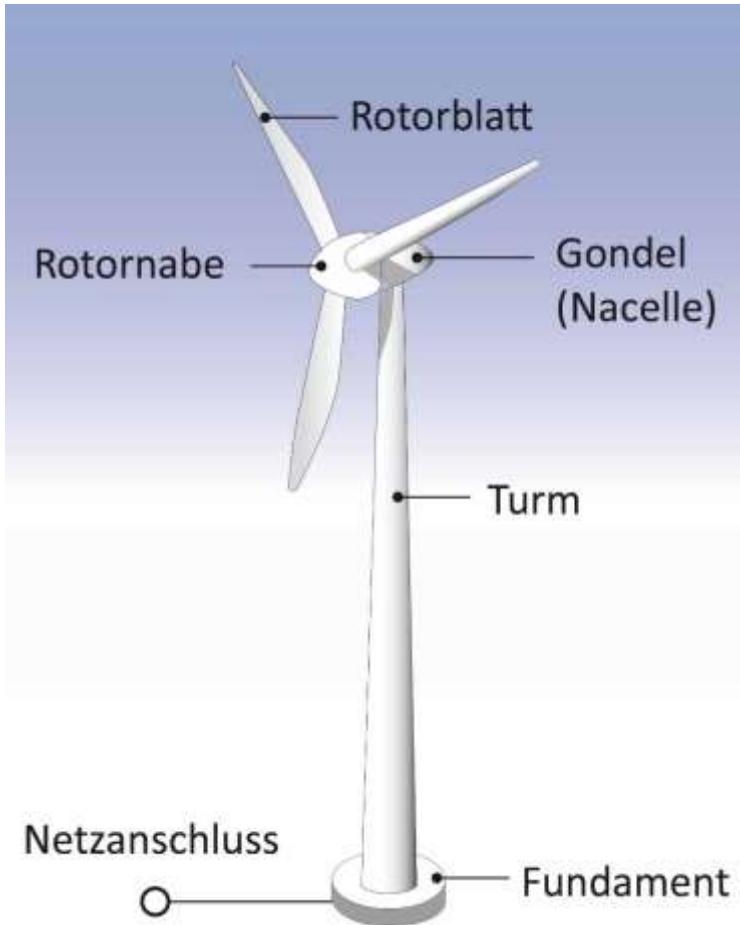


Abbildung 6.1 Windenergieanlage mit ihren Komponenten  
(RENAC, 2017)

Tabelle 6.1. Materialeinsatz bei Windkraftanlagen

Komponente	Material
Fundament	Beton, Stahl
Turm	Stahl, Beton
Antriebsstrang	Gusseisen, Stahlschmierstoffe
Generator	Gusseisen, Kupfer Elektronik
Elektronik	Kabel, Schalttafel
Gondel	Metalle, Faserkomponente
Rotorblätter	Faserkomponente, Sandwichkern

Windturbinen-Rotorblätter verwenden das gleiche "Auftrieb" - Prinzip wie Flugzeuge oder Vögel: Aufgrund der Form des Flügels ist der Luftstrom unter dem Flügel langsamer als auf der Oberseite. Aus diesem Grund ist der Druck über dem Flügel niedriger als unter dem Flügel. Dies führt zu einer Druckdifferenz (Lift-Effekt). Diese Kräfte lassen den Rotor rotieren.

Es wurde herausgefunden, dass der Dreiblatt-Rotor die effizienteste Stromerzeugung für große Windkraftanlagen ist. Die drei Rotorblätter ermöglichen eine bessere Massenverteilung, was die Rotation glatter macht und für ein "ruhigeres" Erscheinungsbild sorgt. Die Rotorblätter bestehen hauptsächlich aus Kunststoffen verstärkt mit Glasfaser, Kohlefasern, Holz und Metall (Blitzschutz etc.). Die Schichten werden üblicherweise mit Epoxidharz verklebt. Aluminium und Stahllegierungen sind schwerer und leiden unter Materialermüdung.

Daher werden diese Materialien in der Regel nur für sehr kleine Windkraftanlagen verwendet. (World Wind Energy Association, 2011)

### 6.2.2 Gondel

Die Gondel enthält alle Turbinenmaschinen. Weil sie sich drehen kann, um der Windrichtung zu folgen, ist sie über ein Lager mit dem Turm verbunden. Die Gondel umfasst den Antriebsstrang, der aus folgenden Komponenten besteht: Rotorwelle mit Lagerung, Getriebe (Direktantriebsturbinen haben keine),

Bremse (n), Kupplung, Generator, Leistungselektronik, Kühlung / Heizung und ein kleiner Kran.

Die Einzelheiten der Anordnung in der Gondel variieren von Hersteller zu Hersteller.

### **6.2.3 Windkrafttürme**

Windkrafttürme bestehen aus Beton, Metall, Holz oder einer Kombination dieser Materialien. Die meisten großen Windkraftanlagen sind mit Stahlrohtürmen gebaut, die in einzelnen Abschnitten hergestellt werden. Es existieren verschiedene Typen von Windtürmen: Stahltürme, Betontürme, Gittertürme, Hybridtürme und abgespannte Rohrtürme.

Stahltürme bestehen in der Regel aus zwei bis vier Segmenten. Jeder hat eine Länge von 20 bis 30 Metern mit Flanschen an jedem Ende. Sie werden auf dem Windparkgelände verschraubt.

Betontürme können mit speziell entwickelten Bauteilen hergestellt werden. Diese werden auf dem Windparkgelände zusammengebaut. Die Turmabschnitte selbst werden komplett in einer Vorgussanlage hergestellt. Es ist auch möglich, dass der Turm komplett vor Ort mit einer Kletterschalung (Ortbeton) errichtet wird.

Die Gitterturmbauweise basiert auf dem Prinzip, Material nur dort zu verwenden, wo Kräfte in die Struktur eingeleitet werden müssen. Mit dieser Methode ist es möglich, das Gewicht des Turms zu reduzieren.

Hybridtürme kombinieren einen segmentierten Turm aus vorgefertigtem Beton mit Stahlprofilen an der Oberseite. Der Vorteil besteht darin, dass die Segmente leicht über gewöhnliche Lastkraftwagen transportiert werden können, insbesondere in den Ländern, in denen der Transport von Stahltürmen mit großen Durchmessern problematisch ist und wo die Betonsegmente lokal hergestellt werden können.

Abgespannte Rohrtürme werden nur für kleine Windkraftanlagen verwendet. Sie sind leicht und können ohne Kran aufgestellt werden.

### 6.3 Umweltauswirkungen der Windenergie Nutzung

In einer Windkraftanlage treten verschiedene Umweltauswirkungen während der Bau-, Betriebs- und Stilllegungsphase auf. In Tabelle 6.2 sind die möglichen Umweltauswirkungen einer Windenergieanlage aufgeführt. Zum Beispiel ist der Wasserfußabdruck einer Windkraftanlage vergleichsweise geringer als bei einer PV- und CSP-Anlage. Auswirkungen während des Betriebs des Windparks werden in den folgenden Punkten diskutiert.

Tabelle 6.2 Umweltauswirkungen von Windenergieanlagen

(Hernandez, et al., 2014 und Saidur, Rahim, Islam & Solangi, 2011).

Rohstoffgewinnung	Herstellung	Konstruktion	Betrieb	Außerbetriebnahme
Biodiversitätsverlust Lebensraum Verlust Giftige Abwässer Abfallproduktion Erschöpfung der natürlichen Ressourcen	Wasserbelastung und –verschmutzung Abfallproduktion	Biodiversitätsverlust Wasser- und Bodenverschmutzung Erdbewegungen wegen Transport	Auswirkungen auf die Tierwelt Visuelle Auswirkung	Staubproduktion Abfallproduktion
CO2 und andere Treibhausgasemissionen				
Lärmbelästigung				

### **6.3.1 Auswirkungen auf die Tierwelt**

Es gibt viele Studien, die die Auswirkungen von Windkraftanlagen auf Vogelarten zeigen (H Kunz, et al., 2007) (Drewitt & Langston, 2006) (Saidur, Rahim, Islam & Solangi, 2011). Im Vergleich zur Anzahl der auf der Jagd getöteten Vögel, ist die Zahl der Todesfälle durch Windparks minimal. Dennoch können die Fälle von Windkraftanlagen vermieden werden, wenn vorher eine genaue Untersuchung des Standorts durchgeführt wurde, um die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten. Eine Studie von S. Mariò et al. mit dem Titel “Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain ecosystems of northwest Portugal” erklärt, dass bei schlechtem Wetter oder bei nebeliger Nacht die von Windkraftanlagen emittierten Lichter die Vögel anzieht und dadurch Zusammenstöße mit den Windturbinenschaufeln provoziert (Santos, et al., 2010). Das Design des Turms in der Windanlage ist auch einer der Faktoren für die Vogelsterblichkeit. Ältere Turbinen mit niedrigeren Nabenhöhen und kürzeren Rotordurchmessern verursachen eine Rotation der Rotorblätter bei hohen Drehzahlen und folglich eine höhere Anfälligkeit für die Vogelsterblichkeitsrate (Magoha, 2002).

### **6.3.2 Visuelle Auswirkungen**

Abhängig von Windenergietechnologien, deren Farbe, Größe, Entfernung zu den Wohngebäuden und Schattenflimmern, können die Auswirkungen einer Windenergieanlage variieren (Ladenburg, Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience, 2009). Um den visuellen Eindruck zu reduzieren, sind die Windturbinen an der Basis grün eingefärbt und an der Oberseite stufenweise hellgrau lackiert. Das Schattenflimmern tritt entweder durch Bewegung der Klinge oder durch Reflexion der Sonnenstrahlen auf dem Körper der Windkraftanlage auf, so dass ein sogenannter Diskoeffekt auftritt (Saidur, Rahim, Islam & Solangi, 2011).

Dieser Effekt hält nicht lange an und tritt nur in bestimmten kombinierten Umständen auf, z.B. wenn,

- die Sonne in einem niedrigen Winkel scheint
- die Turbine sich direkt zwischen der Sonne und dem betroffenen Grundstück befindet
- die Windgeschwindigkeit über der Windgeschwindigkeit der Turbine liegt (um sicherzustellen, dass sich die Turbinenblätter bewegen). (Department of the Environment, Heritage and Local Government of Ireland, 2006)

Schattenflackern kann durch sorgfältige Standortwahl, Design und Planung beeinflusst werden.

### **6.3.3 Lärmemissionen**

In einer Windturbine könnte das abgegebene Geräusch als aerodynamischer oder mechanischer Typ klassifiziert werden. Geräusche, die von den Bewegungen des Getriebes, des elektrischen Generators und der Lager verursacht werden, sind mechanischer Art und das Geräusch, welches durch die Luftströmung über und hinter den Schaufeln einer Turbine erzeugt wird, ist aerodynamischer Art. Solche Geräusche variieren mit der Größe der Turbine, der Windstärke und der Windrichtung und können die Anwohner in der Nähe stören. Lärmbelästigung und visuelle Effekte lassen Grundstückspreise in der Nähe einer Windkraftanlage sinken. Mechanische Geräusche während des Betriebs könnten durch Isolationsvorhänge und schwingungsdämpfende Fußstützen reduziert werden. Aerodynamische Geräusche könnten minimiert werden, indem die Flügel so konstruiert werden, dass während der Bewegung nur ein minimaler Lärm entsteht (Saidur, Rahim, Islam & Solangi, 2011) (Gauld, 2007). Um die Akzeptanz an lärmsensiblen Orten wie Wohnheimen, Krankenhäusern, Wohngebieten usw. zu gewährleisten, ist eine sorgfältige Planung der Windparkanlage unerlässlich. Zum Beispiel, wurde in Bundesland Bayern ein Gesetz verabschiedet welches besagt, dass der Abstand zwischen einer

Windkraftanlage und Wohngebieten das Zehnfache der Höhe der Windkraftanlage betragen muss.

## Referenzen

Achieng Ogola, P. F. (2007, November 2-17). Environmental Impact Assessment General Procedures. *United Nations University - Geothermal Training Programme*. Naivasha, Kenya.

ACWA Power. (2015). *Specific Environment and Social Impact Assessment*. Ouarzazate Morocco. Retrieved July 14, 2017, from <http://documents.worldbank.org/curated/en/618461468274482428/pdf/E44890V90P131200Box391417B00PUBLIC0.pdf>

Allan L. Drewitt, R. H. (2006, March 27). Assessing the impacts of wind farms on birds. *International journal of avian science*, 148, pp. 29 - 42.

B. Corona, E. C. (2016, June 29). Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs. *Elsevier*, 135, pp. 758 - 768.

Corona, B., Cerrajero, E., López, D., & San Miguel, G. (2016, June 29). Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs. *Elsevier*, 135, pp. 758 - 768. doi:10.1016/j.solener.2016.06.059

Department of the Environment, Heritage and Local Government of Ireland. (2006).

Drewitt, A., & Langston, R. (2006, March 27). Assessing the impacts of wind farms on birds. *International journal of avian science*, 148, pp. 29 - 42.

Edgar G. Hertwich, T. G. (2014, September 3). Integrated life cycle assessment of electricity supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 112(20), pp. 6277 – 6282.

Fthenakis, V., & Kim, H. (2011, February 23). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85, pp. 1609 - 1628. doi:10.1016/j.solener.2009.10.002

Gauld, R. (2007). Wind developments: Ecological, technical and social impact considerations. Orkney Sustainable Energy Ltd.

H Kunz, T., Arnett, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., . . . Tuttle, M. D. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(6), pp. 315 - 324.

Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., . . . Allen, M. F. (2014, August 11). Environmental Impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 766 - 779. doi:10.1016/j.rser.2013.08.041

Hertwich, E., Gibon, T., Bouman, E., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G., . . . Shi, L. (2014, September 3). Integrated life cycle assessment of electricity supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 112(20), pp. 6277 – 6282. doi: 10.1073/pnas.1312753111

Hnizdo E, V. V. (2003, April 1). Chronic obstructive pulmonary disease due to occupational exposure to silica dust: a review of epidemiological and pathological evidence. *Occupational and Environmental Medicine*, 60, pp. 237 - 243.

Hnizdo, E., & Vallathan, V. (2003, April 1). Chronic obstructive pulmonary disease due to occupational exposure to silica dust: a review of epidemiological and pathological evidence. *Occupational and Environmental Medicine*, 60, pp. 237 - 243. doi:10.1136/oem.60.4.237

Ladenburg, J. (2009, June 27). Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience. *Applied Energy*, 86, pp. 380-387.

Ladenburg, J. (2009, June 27). Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience. *Applied Energy*, 86, pp. 380-387. doi:10.1016/j.apenergy.2008.05.005

Mário S, B. R. (2010). Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain ecosystems of northwest Portugal. *Ecological Indicators*, 10, pp. 192 - 205.

Magoha, P. W. (2002). Footprints in the wind?: environmental impacts of wind power development. *Fuel and Energy Kurzfassungs*, 3(5), pp. 30 - 33. doi:10.1016/S1471-0846(02)80083-X

Mekonnen, M., Gerbens-Leenes, P., & Hoekstra, A. (2015, March 9). The consumptive water footprint (WF) of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 1, pp. 285 - 297. doi:10.1039/c5ew00026b

Mesfin M. Mekonnen, P. W.-L. (2015, March 9). The consumptive water footprint (WF) of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 1, pp. 285 - 297.

Ogola, P. F. (2007, November 2-17). Environmental Impact Assessment General Procedures. *United Nations University - Geothermal Training Programme*. Naivasha, Kenya.

P., M. (2002). Footprints in the wind?: environmental impacts of wind power development. *Fuel and Energy Kurzfassungs*, 3(5), pp. 30 - 33.

R. R. Hernandez, S. B.-M.-H. (2014, August 11). Environmental Impacts of utility-scale solar energy.

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 766 - 779.

R. Saidur, N. R. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp. 2423 - 2430.

Renewables Academy (RENAC) AG. (2017, January 19). Environmental and social standards in renewable energy (PV, wind and biomass) project finance. Berlin, Germany.

Saidur, R., Rahim, N., Islam, M., & Solangi, K. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp. 2423 - 2430. doi:10.1016/j.rser.2011.02.024

Santos, M., Bastos, R., Travassos, P., Bessa, R., Repas, M., & Cabral, J. (2010). Predicting the trends of vertebrate species richness as a response to wind farms installation in mountain ecosystems of northwest Portugal. *Ecological Indicators*, 10, pp. 192 - 205. doi:10.1016/j.ecolind.2009.04.014

Theocharis Tsoutsos, N. F. (2005). Environmental impacts from the solar energy technology. *Energy Policy*(33), pp. 289 - 296. doi:10.1016/S0301-4215(03)00241-6

Thomas H Kunz, E. B. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(6), pp. 315 - 324.

Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*(33), pp. 289 - 296. doi:10.1016/S0301-4215(03)00241-6

V. M. Fthenakis, H. C. (2011, February 23). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85, pp. 1609 - 1628.

World Wind Energy Association. (2011).

Wu, Z., Hou, A., Chang, C., Huang, X., Shi, D., & Wang, Z. (2014). Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. *Environmental Science Processes & Impacts*, 16, pp. 2432 - 2441. doi:10.1039/C4EM00235K

Zhiyong Wu, A. H. (2014). Environmental impacts of large-scale CSP plants in northwestern China. *Environmental Science Processes & Impacts*, 16(10), pp. 2432 - 2441.

## 7 Wellen-, Gezeiten- und Wasserenergie

**Autor:** Aleksandra SRETENOVIC

Fakultät für Maschinenbau, Universität Belgrad, Serbien.

e-mail: [asretenovic@mas.bg.ac.rs](mailto:asretenovic@mas.bg.ac.rs)

**Kurzfassung:** Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Potenzialen der Wellen- und Gezeitenenergiequelle für die Stromerzeugung. Die Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung dieser Technologie werden diskutiert. Die technologische Entwicklung, die Gezeitenturbinen, Gezeitenstaudämme und Wellenfängergeräte umfasst, wird vorgestellt. Die Auswirkungen der Wellen- und Gezeitenenergie auf die Umwelt werden bewertet.

Die industrielle Produktion von Wasserstoffgas und seine Auswirkungen auf die Umwelt werden ausgearbeitet. Sobald Wasserstoff produziert wird, ist es fast ein ausgezeichneter Energieträger. Es kann in Brennstoffzellen zur Erzeugung von Strom und Wärme verwendet werden. Technologische Aspekte der Speicherung, des Transports und der Verwendung von Wasserstoffgas werden vorgestellt. Zuverlässigkeit und wirtschaftliche Aspekte der Wasserstoffgasanwendung werden diskutiert.

### **Lernziele:**

Nach diesem Kapitel wird der Student in der Lage sein:

- Die Potenziale der Wellen- und Gezeitenenergie als erneuerbare Energiequelle zu verstehen.
- Die möglichen Umweltauswirkungen von Wellen und Gezeiten als Energiequellen zu diskutieren und verstehen.
- Die Vor- und Nachteile von Wellen- und Gezeitenströmungen kritisch zu diskutieren.
- Die Potenziale von Wasserstoff als Energiequelle zu verstehen und diskutieren können.
- Die verschiedenen Wasserstoffherzeugungstechnologien und deren Vor- und Nachteile zu diskutieren.

- Die Umweltauswirkungen von Wasserstofferzeugung und –nutzung zu erörtern.

## **7.1 Wellen- und Gezeitenpotenzial für die Stromerzeugung**

Der Begriff "nasse erneuerbare Energiequellen" wird häufig verwendet, um sich auf die Entwicklungen der Offshore-Windenergie sowie auf Gezeitenstaudämme/-zäune und Gezeiten- und Wellenenergie-Systeme zu beziehen (Frid et al., 2012).

Die Nutzung dieser Energieressourcen ist besonders für die Länder mit bedeutenden Küstengewässern wichtig. Der World Energy Council schätzt, dass, wenn weniger als 0,1% der erneuerbaren Energien in den Ozeanen in Strom umgewandelt werden könnten, die gegenwärtige weltweite Nachfrage nach Energie mehr als fünffach gesättigt werden könnten (Rat, 2016). Obwohl Schätzungen zufolge fast 3000 GW Gezeitenenergie weltweit verfügbar sind, befinden sich laut dem World Offshore Renewable Energy Report 2002-2007 weniger als 3% in Gebieten, die für die Stromerzeugung geeignet sind (Esteban & Leary, 2012).

Leider kann nur ein kleiner Teil dieser Meeresenergiequellen an Standorten gefunden werden, die mit der verfügbaren Technologie wirtschaftlich machbar sind.

Es wurde dokumentiert, dass sich 48% der europäischen Gezeitenressourcen im Vereinigten Königreich, 42% in Frankreich und 8% in Irland befinden. Wellenenergie hat ein geschätztes Potenzial von ca. 1.000-10.000 GW, was in der Größenordnung des weltweiten Stromverbrauchs liegt. Der wichtige Vorteil von Gezeitenströmungen als Energiequelle gegenüber Wellen (oder Wind) ist ihre Vorhersagbarkeit, da die Gezeiten wochen- oder sogar jahrelang genau vorhergesagt werden können.

### **Gezeiten**

Was die Gezeitenforschung so attraktiv macht, ist die Regelmäßigkeit der Gezeiten sowie das enorme Energiepotenzial (Pelc & Fujita, 2002). Eine Gezeit ist der regelmäßige Anstieg und Abfall der Oberfläche des Ozeans, verursacht durch die Gravitationskraft von Sonne und Mond auf der Erde und die Zentrifugalkraft, die durch die Rotation von Erde und Mond erzeugt wird. Wenn man bedenkt, dass der Mond näher an der Erde ist, ist seine Gravitationskraft 2,2 Mal größer als die Gravitationskraft der Sonne. Gezeitenströmungen finden sich in Küstengebieten und an Stellen, wo der Wasserstrom gezwungen ist, durch enge Kanäle zu navigieren. Diese Ströme fließen in zwei Richtungen; die in Richtung der Küste ausgerichtete Strömung wird Flut genannt, während die Strömung, die von der Küste zurückzieht, als Ebbe bezeichnet wird. Die Gezeitenenergie besteht aus der potentiellen und kinetischen Komponente. Daher können die Gezeitenkraftwerke in zwei Haupttypen eingeteilt werden: Gezeitenstaudämme, die potenzielle Komponenten nutzen und Gezeitenströmungsturbinen, die kinetische Energie nutzen.

### **Gezeitenstaudämme**

Gezeitenbarriere ist eine Art Gezeitenkraftgenerierung, die den Bau einer niedrigen Staumauer ("Sperrfeuer") über dem Eingang eines Gezeiteneinlasses oder -beckens zur Schaffung eines Gezeitenspeichers beinhaltet (<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html>) (siehe Abbildung 7.1). Dieser Damm hat Unterwassertunnel entlang seiner Breite, die den Meerwasserfluss durch "Schleusentore" navigieren. Innerhalb der Tunnel befinden sich fest installierte Wasserturbinengeneratoren, die die kinetische Wasserenergie nutzen, um die Gezeitenelektrizität zu erzeugen. Ein Tide-Staudamm hat das gleiche Funktionsprinzip wie die Erzeugung von Wasserkraft, mit dem Unterschied, dass die Gezeiten in zwei Richtungen fließen, so dass die Generatoren so ausgelegt sind, dass sie beide Strömungen bewältigen können.

Der Tidenhub ist der vertikale Unterschied zwischen dem Meeresspiegel bei Ebbe und Flut ("http://www.alternative-energy-tutorials.com.html"). Wenn man bedenkt, dass sich die Gezeiten in vertikaler Richtung zwischen niedrigem und hohem Niveau bewegen, entsteht auf ihrem Weg nach unten ein Höhenunterschied, in dem die potentielle Energie gespeichert wird. Dieser "Head" wird verwendet, um einen Unterschied in den Wasserständen auf zwei Seiten des Staudamms zu erzeugen. Die Elektrizität wird erzeugt, während das Wasser durch die Turbinen strömt. Es gibt drei hauptsächliche Gezeitenkraftwerke:

**Hochwassererzeugung:** Die Gezeitenkraft wird erzeugt, wenn das Wasser bei der Flut in das Gezeitenreservoir eintritt.

**Ebbgeneration:** Die Gezeitenkraft wird erzeugt, wenn das Wasser bei Ebbe das Gezeitenbecken verlässt.

**Zwei-Wege-Generation:** Die Gezeitenkraft wird erzeugt, wenn das Wasser während einer Flut und Ebbe in beide Richtungen fließt.

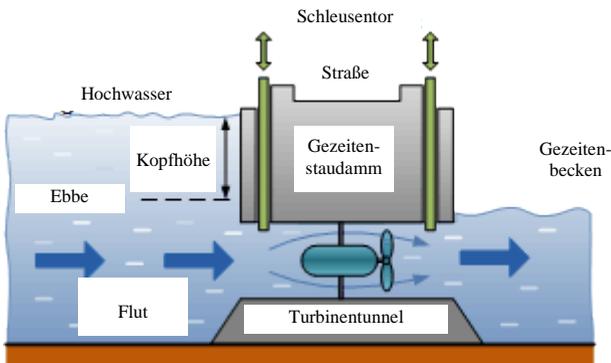


Abbildung 7.1 Gezeitenstaudamm

[www.alternative-energy-tutorials.com.html](http://www.alternative-energy-tutorials.com.html)

Während des Hochwassers werden die Schleusentore geöffnet, damit die Gezeiten in das Gezeitenbecken (Mündung, Fjord oder Bucht) einströmen können. Bei Flut sind die Schleusen im

Sperrwerk geschlossen und fangen das Wasser im Becken ein. Sobald eine ausreichende Höhendifferenz aufgetreten ist, öffnet sich das Turbinengitter und das enthaltene Wasser strömt über die Turbinen aus. Die Stromerzeugung wird fortgesetzt, bis der hydrostatische Druck auf das minimale Niveau fällt, welches einen effizienten Betrieb der Turbinen ermöglicht. Die Schleusen werden dann geöffnet, damit sich das Becken wieder füllen kann. Dieses Vorgehen (Ebb-Generierung) erzeugt die meiste Energie. Es ist auch möglich, Strom über die Flut zu erzeugen, indem das Becken durch die Turbinen nachgefüllt wird. Beide Gezeitenströme können in Dual-Mode-Geräten genutzt werden. Die ersten Gezeitenstaudämme wurden 1966 gebaut, als das Werk in La Rance (Frankreich) in Betrieb genommen wurde (siehe Abbildung 7.2) und heute noch in Betrieb ist (Esteban & Leary, 2012). Das einzige Land, das derzeit an einer ernsthaften Implementierung dieser Systeme arbeitet, ist Südkorea. Andere Länder prüfen noch immer die wirtschaftlichen Aspekte dieser Anlagen, unter Berücksichtigung der erforderlichen hohen Infrastrukturinvestitionen und der potenziellen Umweltschäden. Mit Pelamis (in Portugal) und SeaGen (in Nordirland), die im Sommer 2008 errichtet wurden, wurden kürzlich die ersten kommerziellen Farmen in Betrieb genommen.

Die Tide-Staudammkonstruktion erfordert eine große Menge an Materialien, um die enorme Belastung durch Stauwasser zu bewältigen (Rourke, Boyle & Reynolds, 2010). Der größte Nachteil von Tide Staudämmen ist deren negative Auswirkungen auf die Umwelt. Der Bau eines Staudamms über eine Flussmündung oder Bucht kann den natürlichen Gezeitenfluss beeinflussen, was sich auf das Meeresleben in der Flussmündung sowie auf die Wasserqualität und den Sedimenttransport auswirkt. Der Gezeitenstaudamm beeinflusst Fische und andere Meerestiere, aber auch den Seeverkehr. Im Falle eines Ebbeerzeugenden Systems ist dieses Problem nicht so signifikant, da das Becken im Vergleich zu einem Hochwassererzeugungssystem auf einem höheren Wasserstand gehalten wird.

## **Gezeiten-Turbinen**

Gezeitenströmungsturbinen nutzen die kinetische Energie des Gezeitenstroms zur Stromerzeugung (Rourke et al., 2010). Die Ähnlichkeit zur Windenergietechnologie ist auf den ersten Blick erkennbar, da Gezeitenstromgeneratoren den Unterwasserwindparks ähneln. Aufgrund der Unterschiede in der Dichte und Geschwindigkeit zwischen Luft und Wasser gibt es jedoch unterschiedliche Betriebsbedingungen im Ablauf. Die Offshore-Windkraftgeneratoren können durch Stürme oder Seegang beschädigt werden, während Gezeitenturbinen unterhalb des Meeresspiegels oder am Meeresboden befestigt sind. In Anbetracht der Tatsache, dass Turbinen in Wasser eingetaucht sind, sind sie im Vergleich zu Windkraftanlagen größeren Kräften und verschiedenen Anforderungen ausgesetzt. Sie sind so ausgelegt, dass sie in dem Zeitraum, in dem sie keine Elektrizität erzeugen, erhebliche Lasten aushalten können und in der Lage sind, in beiden Richtungen der Strömung (Flut und Ebbe) Strom zu erzeugen.

Es gibt zwei gängige Methoden der Gezeitenstromextraktion:

**Horizontale Gezeitenströmungsturbinen:** Die Turbinenschaufeln drehen sich um eine horizontale Achse, die parallel zur Richtung des Wasserflusses steht.

**Gezeitenströmungsturbinen mit vertikaler Achse:** Die Turbinenschaufeln drehen sich um eine vertikale Achse, die senkrecht zur Richtung des Wasserflusses steht.

Die großen Gezeitenströmungen können an folgenden Orten gefunden werden: Arktischer Ozean, Ärmelkanal, Irische See, Golf von Mexiko, Amazonas, Magellanstraße, Gibraltar usw. ("<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html> "<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html> ")

## **Wellenenergie-Nutzung**

Der Hauptnachteil der Wellenenergie als Energiequelle (da sie durch den Wind verursacht wird) ist ihre meist zufällige

Variabilität, obwohl einige saisonale Muster gefunden werden können (Antonio, 2010). Die Ölkrise in den 1970er Jahren führte zu einem deutlich gestiegenen Interesse an der Energiegewinnung aus Wellen. Die Wellenenergieabsorption ist ein komplexer hydrodynamischer Prozess, der erhebliche theoretische Schwierigkeiten mit sich bringt. Daher waren die ersten Arbeiten zur Wellenenergie meist theoretischer Natur. Seit die Europäische Kommission 1991 Wellenenergie in das F & E-Programm aufgenommen hat, haben sich die ersten Projekte entwickelt. Derzeit gibt es eine Vielzahl von Technologien zur Erfassung von Wellenenergie, die sich aus den unterschiedlichen Arten ergeben, in denen Energie aus den Wellen absorbiert werden kann. Die ausgewählten Technologien hängen auch von der Wassertiefe und dem Standort ab (Küstenlinie, nahe Küste, Off-Shore). Die ersten Prototypen waren Küstengeräte, die den Vorteil einer einfacheren Installation und Wartung haben und keine Tiefwasserliegeplätze und lange Unterwasserkabel benötigen. Das typische Gerät der ersten Generation ist die oszillierende Wassersäule mit Luftturbine. Die oszillierende Wassersäule besteht aus einer teilweise eingetauchten Struktur, die unterhalb der Wasseroberfläche geöffnet ist (siehe Abbildung 7.2). Die oszillierende Wasserbewegung, die durch Wellen erzeugt wird, zwingt die Luft, durch die Turbine zu fließen, die den elektrischen Generator antreibt.

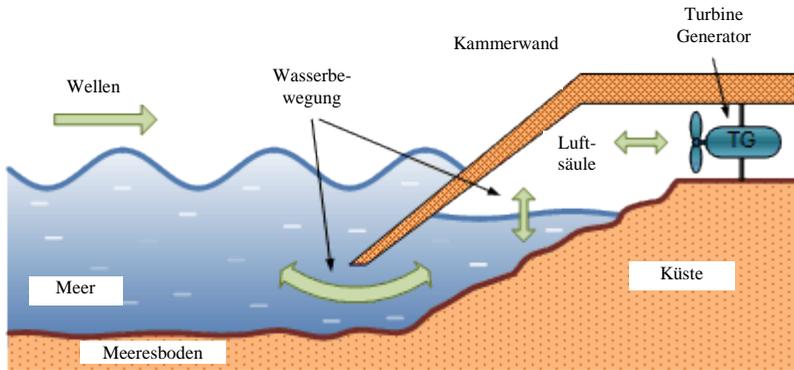


Abbildung 7.2 Oszillierende Wassersäule

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html> .)

Der Typ des Windgenerators, der in einer oszillierenden Wassersäule verwendet wird, ist das Schlüsselement für seine Effizienz. Die Luft in der Kammer verändert ständig die Bewegungsrichtung, die durch die vertikale (Aufwärts- und Abwärts-) Bewegung des Wassers verursacht wird, was den Saug- und Blaseffekt durch die Turbine verursacht. Um dieses Problem zu lösen, wird der Typ der in diesen Systemen verwendeten Windturbine als "Wells Turbine" bezeichnet. Die Wells-Turbine hat die bemerkenswerte Eigenschaft, unabhängig von der Richtung der Luftströmung in der Säule in die gleiche Richtung zu rotieren. Die kinetische Energie wird aus dem reversierenden Luftstrom entnommen und zum Antrieb eines elektrischen Induktionsgenerators verwendet. Diese Technologie erzeugt keine Treibhausgasemissionen und ist somit eine umweltfreundliche und erneuerbare Energiequelle, die durch natürliche Übertragung von Windenergie durch eine Bohrloch-turbine entsteht. Der Vorteil dieses Küstenlinien-Schemas ist, dass das Hauptbewegungsstück, die Turbine, leicht zu Reparatur- oder Wartungsarbeiten entfernt werden kann, da es sich an Land befindet. Der Nachteil ist, dass die Ausgabe der oszillierenden Wellenspalten von der Höhe der Wellenenergie abhängig ist, die sich je nach Jahreszeit Tag für Tag ändert.

Off-Shore-Geräte sind auf Wasser schwimmende Schwingkörper, die die stärkeren Wellen im Tiefenwasser ausnutzen können (siehe Abbildung 7.3). Die einfachsten Welleneinfangvorrichtungen bestehen aus einer hebenden Boje, die gegen den festen Rahmen (Meeresboden oder Struktur, die an der Unterseite befestigt ist) reagiert. Das Schaukeln und Heben der Wellen verursacht eine relative Bewegung zwischen einem Absorber und einem Reaktionspunkt. Der lineare Absorber (Wellenabschwächer) schwimmt auf der Wasseroberfläche. Es ist an den Meeresboden gebunden, so dass es senkrecht zu den ankommenden Wellen schwingen kann. Wenn die Wellen entlang der Länge dieser schlangenartigen Wellenenergievorrichtung verlaufen, bewirken sie, dass der lange zylindrische Körper in die Wellentäler absinkt und sich nach oben wölbt, wenn der Wellenkamm vorbeiläuft. Verbindungsgelenke entlang des Körpers des Geräts biegen sich in den Wellen, wobei sie eine große Kraft ausüben, die verwendet wird, um einen Hydraulikzylinder an jeder Verbindung anzutreiben. Der hydraulische Stößel treibt Öl durch einen hydraulischen Motor an, der einen Generator antreibt, der Elektrizität erzeugt.

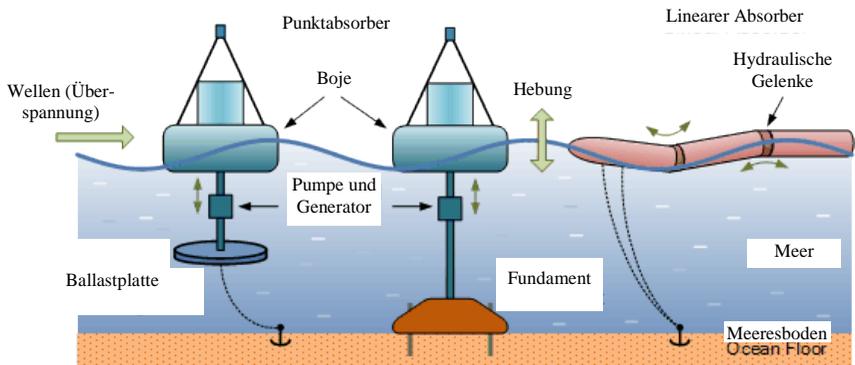


Abbildung 7.3 Wellenerfassungsgeräte

(["http://www.alternative-energy-tutorials.com.html"](http://www.alternative-energy-tutorials.com.html))

## Andere Meeresenergiepotentiale

Die in Abbildung 7.4 dargestellte Umwandlung der thermischen Meeresenergie (OTCE) erzeugt Elektrizität aus dem natürlichen Wärmegradienten des Ozeans, wobei die in warmen Oberflächenwasser gespeicherte Wärme zur Verdampfung genutzt wird, während kaltes, tiefes Wasser aus einer Tiefe von 1.000 m zum Kühlen (Kondensation) verwendet wird (Pelc & Fujita, 2002). In diesem Prozess wird Arbeitsfluid wie Ammoniak alternativ verdampft und kondensiert, um einen Rankin-Zyklus anzutreiben. Normalerweise wird die Energie in dem verdampften Ammoniak mit einer Turbine aufgefangen, der einen Generator dreht, um elektrische Energie für ein Versorgungsnetz zu erzeugen. OTEC ist an Orten mit großen Temperaturunterschieden möglich, die mit einer Wärmekraftmaschine Energie gewinnen. Insgesamt wird geschätzt, dass etwa 10 TW Leistung, die in etwa dem aktuellen globalen Energiebedarf entspricht, von OTEC bereitgestellt werden könnten, ohne die thermische Struktur des Ozeans zu beeinflussen.

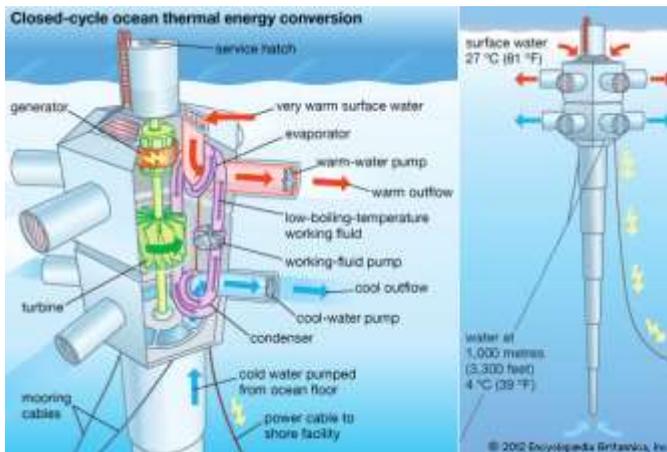


Abbildung 7.4 Umwandlung thermischer Meeresenergie

("https://www.britannica.com/technology/ocean-thermal-energy-conversion,")

Salinitätsgradienten können auch zur Energiegewinnung durch Osmose genutzt werden. Der Anbau mariner Biomasse kann viele nützliche Produkte liefern, einschließlich erneuerbarer Brennstoffe zur Stromerzeugung. Aufgrund technologischer Einschränkungen und wirtschaftlicher Überlegungen sind osmotische und thermische Energieentwicklungen jedoch begrenzt.

## **7.2 Umweltauswirkungen von Wellen- und Gezeitenenergie**

Bisher wurden Gezeitenzäune und Wellenenergie-Erfassungsgeräte nur als mehrere experimentelle Modelle betrieben, so dass die Vorhersage ihrer Umweltauswirkungen auf sehr begrenzten empirischen Daten beruht. Es hat sich gezeigt, dass die Tide Staudämme, durch den Bau eines Staudamms über eine Bucht, potenziell erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Dies zeigt sich an Orten wie Vogelfuttergebieten, Kindergärten oder Laichgebieten. Diese Auswirkungen lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen: 1) Auswirkungen auf Lebensräume und Arten, 2) direkte Auswirkungen auf Fortpflanzung und Rekrutierung und 3) Auswirkungen auf Prozesse in der Wassersäule und der Hydrologie. Gezeitenbarrieren beeinflussen die Fortpflanzung und Migration von Arten und beeinflussen Lebensräume sowohl stromabwärts als auch stromaufwärts der Anlage. Der Wellenenergiekollektor kann je nach Konfiguration auch den maritimen Lebensraum verändern, der durch die beweglichen Teile des Energiesystems verursacht wird (Frid et al., 2012).

In Anbetracht der Tatsache, dass der Lebenszyklus der Staustufe mehr als 100 Jahre beträgt, sind diese Auswirkungen langfristig und sollten sorgfältig untersucht werden. Die Veränderungen in den Gezeitenregimes und der Wasserrückhaltung haben Auswirkungen auf die Vogelgemeinschaften und die Verfügbarkeit adäquater Lebensräume. Befindet sich das Gebiet auf einer Fischmigrationsroute (Salmoniden, Aale, Shad), ist es

zum Beispiel ratsam, eine angemessene Passage für Fische frei zu lassen, obwohl ein gewisser Verlust des regionalen Lebensraums unvermeidlich ist (Pelc & Fujita, 2002). Veränderungen, die durch das Gezeitenspermauer verursacht werden, umfassen auch eine Verringerung der Gezeitenzone, langsamere Strömungen, einen verringerten Salzgehalt und veränderte Bodeneigenschaften. Neuere Innovationen umfassen Gezeitenzäune, die aus Turbinen bestehen, die sich vollständig über einen Kanal erstrecken, in dem der Gezeitenstrom relativ schnelle Strömungen erzeugt (siehe Abbildung 7.5).

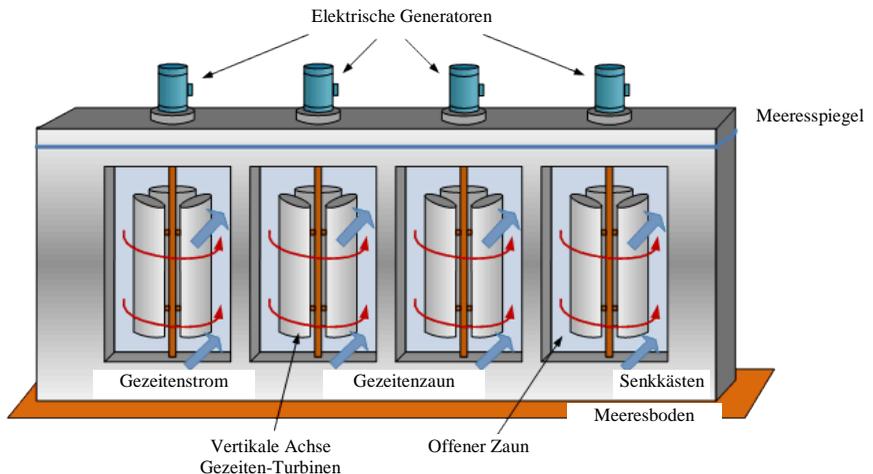


Abbildung 7.5 Gezeiten Zaun

("http://www.alternative-energy-tutorials.com.html ")

Die Turbinen sind so konstruiert, dass Fische, Wasser und Sedimente durch den Kanal gelangen können. Gezeitenanlagen an Flussmündungen verursachen die gleichen Umweltprobleme wie große Staudämme. Durch Veränderung des Salzwasserflusses durch die Flussmündungen können Gezeitenanlagen die Hydrologie und den Salzgehalt dieser sensiblen Umgebungen beeinflussen. Flussmündungen dienen als Brutstätte für viele

Organismen sowie als einzigartiger und unersetzbarer Lebensraum für Ästuarorganismen. Eine Veränderung dieses Habitats, durch den Bau großer Gezeitenanlagen, sollte vermieden werden. Während der Bauphase der Gezeitenanlage in La Rance wurde die Flussmündung für 2-3 Jahre komplett vom Meer abgeschnitten, es dauerte lange, bis die Flussmündung ein neues ökologisches Gleichgewicht erreichte. In der Zukunft sollte der Bau eines neuen Staudamms die Mündung vom Meer nicht vollständig absperren. Diese Anlagen sollten erst gebaut werden, wenn detaillierte Umweltuntersuchungen vorliegen und diese nur eine minimale Auswirkung auf das Meeresökosystem zeigen. Gezeitenzäune und Gezeitenkraftwerke sind wahrscheinlich umweltfreundlicher. Gezeitenzäune könnten negative Auswirkungen auf die Umwelt haben, da sie Kanäle blockieren, die es für Fische und Wildtiere schwierig machen, durch diese Kanäle zu wandern. Meeressäugtiere könnten durch einen Zaun geschützt werden, der größere Tiere fern halten würde, und ein Sonarsensorsystem, welches das System abschaltet, wenn Meeressäugtiere entdeckt werden. Gezeitenkraftwerke könnten die umweltfreundlichste Gezeitenkraftoption sein. Sie blockieren keine Kanäle oder Mündungsöffnungen, unterbrechen weder die Fischwanderung noch verändern sie die Hydrologie. Gezeitenkraftwerke und Gezeitenzäune können beträchtliche Erzeugungskapazitäten ohne größere Auswirkungen auf den Ozean bieten, während Gezeitenstaudämme wahrscheinlich zu schädlich für das Meeresökosystem sind. Die Gezeitenenergieprojekte sollten so platziert und gebaut werden, dass wichtige Migrationskanäle offen bleiben. Die Turbinen sollten langsam genug drehen, dass die Fischsterblichkeit minimiert wird und der Nährstoff- und Sedimenttransport weitgehend unbeeinflusst bleibt. Wellenenergiekonverter hatten nur geringe direkte Auswirkungen auf die benthische Gemeinschaft (Makrofauna Biomasse, Dichte, Artenreichtum und Biodiversität) in Bezug auf natürliche hohe Variabilität.

### 7.3 Wasserstoffenergie

Wasserstoff ist das dritthäufigste Element in unserer Umgebung, aber es ist immer mit anderen Elementen verbunden, wodurch Verbindungen wie Methan ( $\text{CH}_4$ ), Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) entstehen. Die Tatsache, dass es nicht frei gefunden werden kann (es muss vor der Verwendung getrennt werden) hat erhebliche Auswirkungen auf seinen Wert als Energiequelle. Dieser Extraktionsprozess erfordert eine erhebliche Menge an Energie, während die verwendete Energiequelle erneuerbarer oder fossiler Brennstoff sein kann. Wasserstoff wird oft als "Kraftstoff der Zukunft" bezeichnet, es gibt eine Reihe von Vorteilen, die diesen Titel rechtfertigen können (Tabak, 2009). Es brennt leicht und es gibt eine beträchtliche Menge an Wärme pro Masseneinheit ab. Wasserstoff kann auch dazu verwendet werden, Energieumwandlungsvorrichtungen, die als Brennstoffzellen bezeichnet werden, mit Energie zu versorgen, indem ein Verfahren angewendet wird, das effizienter als die Verbrennung ist. Theoretisch ist Wasserstoff eine erneuerbare Energiequelle, wenn man bedenkt, dass Wasser sowohl eine Wasserstoffquelle als auch ein Produkt seiner Verwendung ist. Die Vorteile von Wasserstoff führen dazu, dass viele Forscher glauben, dass der Wasserstoff die fossilen Brennstoffe ersetzen wird. Gegenwärtig gibt es jedoch erhebliche Hindernisse für eine weitverbreitete, effiziente Anwendung:

Er ist teuer in der Herstellung und beim Transport.

Als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge ist es schwierig, diesen an Bord in ausreichender Menge zu lagern, um dem Fahrer eine gewisse Reichweite zu bieten.

Brennstoffzellen haben sich bisher in der Herstellung als teuer erwiesen und sind zu fehleranfällig für den Einsatz in vielen praktischen Anwendungen.

Was Wasserstofftechnologien so interessant macht, ist das Potenzial, zweier Punkte in der gegenwärtigen Phase der Energiesystementwicklung: Energiespeicher für intermittierende

Energiequellen (insbesondere erneuerbare) und Kraftstoff für den Transport (anstelle fossiler) (Leveque et al., 2010). Im Allgemeinen sind die auf fossilen Brennstoffen basierenden Technologien zur Wasserstoffherzeugung im Moment gut entwickelt, obwohl es notwendig ist, signifikante Verbesserungen zu implementieren, um eine weit verbreitete industrielle Produktion zu erreichen. Eine nachhaltige großtechnische Wasserstoffproduktion mit fossilen Brennstoffen erfordert die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (CCS). Die Nutzung von Erdgas für die Wasserstoffproduktion kann zu Problemen bei der Versorgungssicherheit in Europa führen. Diese Fakten, auch unter Berücksichtigung des wirtschaftlichen Aspekts, implizieren, dass die Wasserstoffproduktion aus Kohle eine bessere Alternative ist.

Die Wissenschaftler stellen einige Probleme dar, die die Entwicklung der erneuerbaren Wasserstoffzukunft beeinflussen könnten. Während die Energieverluste in einem effizienten Stromnetz etwa 10% betragen, liegen die Verluste, wenn Wasserstoff als Speicher- und Transportmedium verwendet wird, bei 75-80%. Daher scheint dieser ineffiziente Strom-Wasserstoff-Stromweg mit einer nachhaltigen Energiezukunft nicht vereinbar zu sein. Zweitens, wenn Wasserstoff als Speichermedium für andere erneuerbare Energiequellen verwendet wird, bedeutet dies, dass der Wasserstoff nur in Fällen von überschüssiger Stromproduktion produziert werden sollte. Dies bedeutet, dass die Verbreitung erneuerbarer Energiequellen erheblich sein muss, bevor Wasserstoff effektiv produziert werden kann. Diese Art der sehr geringen und stark unregelmäßigen Wasserstoffproduktion wirkt sich jedoch nachteilig auf die Effizienz von Elektrolyseuren aus. Drittens könnten nicht-intermittierende erneuerbare Energiequellen möglicherweise auch nicht für die Wasserstoffproduktion verfügbar sein. Biomasse hat bereits verschiedene Anwendungszwecke, ein großer Teil sollte zur Düngung verwendet werden, was sich wiederum auf die verfügbare Menge auswirkt. Auch Strom aus

Großwasserkraftwerken wird nicht empfohlen, da sich die Umweltauswirkungen dieser Anlagen als erheblich erwiesen haben, weshalb sie als nicht erneuerbar gelten. Es gibt eine Frage des Preises der erforderlichen Infrastrukturentwicklung, besonders in Fällen von niedrigen Produktionskapazitäten. Anstatt sich vollständig auf die Verbindung zwischen Wasserstoff und erneuerbaren Energien zu konzentrieren, empfiehlt es sich, andere Wasserstofferzeugungstechnologien zu erforschen und die Wechselwirkung zwischen Wasserstoff und anderen Energieträgern sorgfältig zu untersuchen. Die enormen Kosten der derzeitigen Technologien für die Produktion und den Transport von Wasserstoff stellen die Frage nach der möglichen Endnutzung, die die Investition rechtfertigen kann. Zu diesem Zeitpunkt beschränkt sich der Einsatz von Wasserstoff auf die Anwendungen von Brennstoffzellen, bei denen eine zuverlässige Stromerzeugung mit sehr geringen lokalen Umweltauswirkungen erforderlich ist. Diese Anwendungen haben bedeutende Fortschritte in der Brennstoffzellentechnologie bewirkt. Der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr wird von vielen als die eigentliche Rechtfertigung einer Wasserstoffwirtschaft angesehen. Gegenwärtig kosten geeignete Niedertemperatur-Brennstoffzellen für den Fahrzeugeinsatz rund 8.000 € / kW. Es wird geschätzt, dass die Kosten um zwei Größenordnungen gesenkt werden sollten, um wettbewerbsfähig zu sein. Dual-Fuel-Motoren (Wasserstoff und Benzin), die bereits von Automobilherstellern entwickelt wurden, emittieren viel weniger organische Verbindungen und andere Schadstoffemissionen.

### **7.3.1 Wasserstofferzeugungstechnologien**

Technologien für die Wasserstoffproduktion lassen sich grob in drei Hauptkategorien einteilen: elektrolytische, thermochemische und biologische Wasserstoffproduktion. Ein Überblick über die potenziellen Quellen und Extraktionstechnologien ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Das Extrahieren von Wasserstoff aus dem Ausgangsmaterial ist im Allgemeinen ein Prozess mit

geringer Effizienz, der manchmal sogar mehr Energie benötigt, als er erzeugen kann.

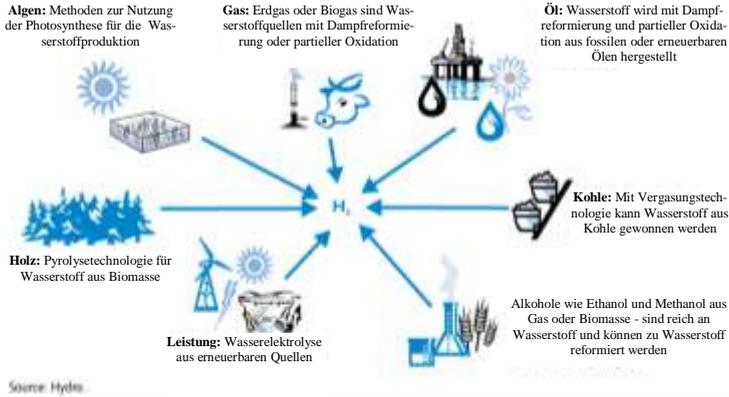


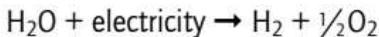
Abbildung 7.6 Einsatzstoffe und Prozesstechnologien für die Wasserstoffproduktion

(IEA, 2006)

Wasserstoff kann aus Wasser, Biomasse, Erdgas oder Kohle (nach Vergasung) gewonnen werden (Turner, 2004). Heute wird Wasserstoff hauptsächlich aus Erdgas über Dampf-Methan-Reformierung hergestellt.

### Wasserelektrolyse

Die Wasserelektrolyse ist eine bekannte, kommerziell verfügbare Technologie für eine sehr saubere Wasserstoffproduktion. Es ist der Prozess der Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff unter Anwendung von elektrischer Energie, wie in folgender Gleichung:

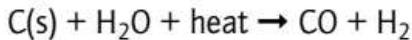


Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es einen dezentralen Betrieb ermöglicht, was die Infrastruktur im Vergleich zur Wasserstoffproduktion aus fossilen Brennstoffen oder Biomasse

deutlich vereinfacht. Um diese Technologie wirtschaftlich rentabel zu machen, ist es notwendig, dass die elektrolytische Ausrüstung signifikant billiger und effizienter wird oder dass der Strompreis verglichen mit den Gas- oder Kohlepreisen niedriger wird. In Anbetracht dessen, dass bei höheren Temperaturen, die benötigt werden, die elektrische Energie abnimmt, können die Hochtemperatur-Elektrolyse-Systeme für Orte, an denen Wärme auf hoher Temperatur verfügbar ist, bevorzugt werden.

### **Produktion aus Kohle**

Kohlevergasung könnte eine Technologie sein, die dank der großen verfügbaren Kohlevorkommen erhebliche Mengen an Wasserstoff und Elektrizität erzeugt. Wegen seiner relativ geringen Kosten wird es oft als die beste Quelle für die wirtschaftliche Herstellung großer Mengen von Wasserstoff genannt. Eine typische Reaktion für das Verfahren, bei dem Kohlenstoff in Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt wird, ist in folgender Gleichung angegeben:



Das CO wird weiter in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> umgewandelt. Die Energie, die für die notwendige Sequestrierung von CO<sub>2</sub> benötigt wird, welches ein führendes Nebenprodukt bei allen Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen ist, erhöht jedoch den Kohleverbrauch. Die Wasserstoffproduktion mit Sonnen-, Wind-, Kern- und Geothermie umfasst die Elektrolyse von Wasser, thermische chemische Kreisläufe mit Wärme und Biomasseverarbeitung. Biomasse kann leicht in eine Reihe von flüssigen Brennstoffen umgewandelt werden, einschließlich Methanol, Ethanol, Biodiesel und Pyrolyseöl, die transportiert und zur Erzeugung von Wasserstoff vor Ort verwendet werden können. Obwohl Biomasse eindeutig nachhaltig ist, kann sie Wasserstoff nicht in den erforderlichen Mengen liefern.

## Thermochemische Wasserspaltung

Da die direkte thermische Spaltung von Wasser Temperaturen von mehr als  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  erfordert und das Produkt schnell eine Mischung aus Wasserstoff und Sauerstoff rekombiniert, untersuchten die Wissenschaftler verschiedene thermisch chemische Kreisläufe, die niedrigere Temperaturen verwenden und Wasserstoff und Sauerstoff in getrennten Schritten erzeugen können. Eine der gebräuchlichsten Methoden erfordert die Verwendung von Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) bei  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  und Iodwasserstoff (HI) bei  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es ist jedoch notwendig, Materialeigenschaften zu erreichen, die die erforderliche Stabilität unter den Betriebsbedingungen von HI und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  erfüllen können. Aus Sicherheitsgründen ist eine lange Wärmeübertragungsleitung erforderlich, um diese Anlage weit vom Reaktor entfernt zu halten. Solarthermische Systeme könnten auch verwendet werden, um solche thermochemischen Zyklen zu steuern. Jede Technologie, die Elektrizität erzeugt, kann einen Elektrolyseur dazu bringen, Wasserstoff zu produzieren. Aufgrund des enormen Potenzials von Sonne und Wind scheint es möglich, dass diese Quellen in Zukunft stärker genutzt werden können. Die Effizienz der auf dem Markt verfügbaren Elektrolyseure liegt im Bereich von 60 bis 73%, daher wird häufig auf die geringe Effizienz hingewiesen. Es ist zwar sehr wichtig, aber die Effizienz selbst sollte nicht der ausschlaggebende Faktor sein, insbesondere bei der Entscheidung für neue Technologien. Die Energie, die benötigt wird, um Wasser zu spalten, kann aus einer Kombination von Wärme und Elektrizität gewonnen werden. Die Menge an Wasser, die benötigt wird, um Wasserstoff für den Transport zu produzieren, ist nicht groß. Die Umwandlung der 230 Millionen Fahrzeuge in Brennstoffzellenfahrzeuge würde etwa 100 Milliarden Gallonen Wasser pro Jahr erfordern, um den benötigten Wasserstoff zu liefern. Nachhaltige Wasserstoffherzeugungstechnologien, die die Wasserstoffproduktion in Zukunft beeinflussen könnten, umfassen photobiologische und photoelektrochemische Ansätze (siehe Abbildung 7.7). Diese

Systeme produzieren Wasserstoff direkt aus Sonnenlicht und Wasser und bieten die Möglichkeit, die Effizienz des Solar-zu-Wasserstoff-Pfades zu erhöhen und die Kapitalkosten des Systems zu senken, aber sie benötigen immer noch Landfläche, um Sonnenlicht zu sammeln. Diese Systeme könnten die Verwendung von Meerwasser direkt als Ausgangsmaterial anstelle von hochreinem Wasser ermöglichen (siehe Abbildung 7.8).

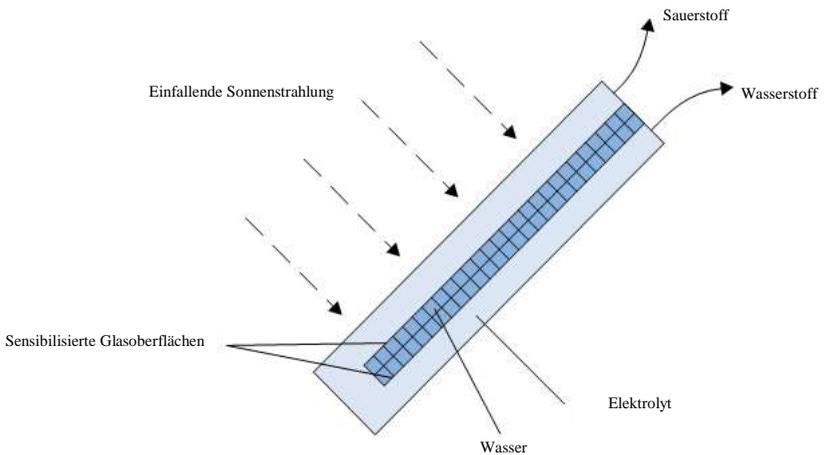


Abbildung 7.7 Prinzip der photoelektrolytischen Zelle

(IEA, 2006)

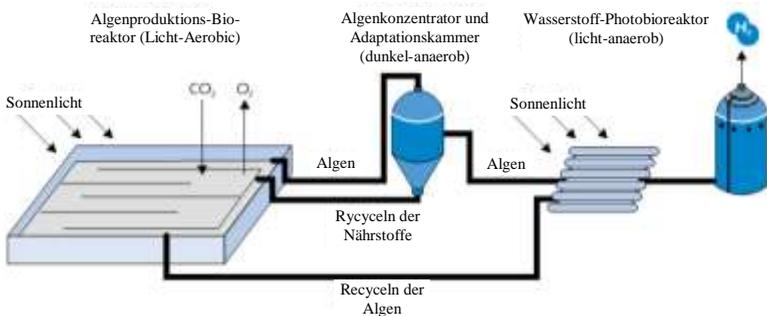


Abbildung 7.8 Prinzip der photobiologischen Wasserstoffproduktion

(IEA, 2006)

### 7.3.2 Auswirkungen auf die Umwelt

Wasserstoff kann dazu beitragen, CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre zu reduzieren, insbesondere wenn er als Energiequelle für Fahrzeuge anstelle von konventionellen, fossil betriebenen Fahrzeugen, verwendet wird. Laut dem Bericht der Internationalen Energieagentur aus dem Jahr 2011 ist der Transportsektor für 23% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe verantwortlich (große Mehrheit von Pkw und Lkw). Es wird prognostiziert, dass die weltweite Nachfrage nach Straßentransporten bis 2035 um 40% steigen wird. Die Fahrzeuge, die mit Wasserstoff-Brennstoffzellen betrieben werden, können die Treibhausgasemissionen erheblich reduzieren, wenn man bedenkt, dass die einzigen Nebenprodukte Wärme und Wasser sind. Die National Academy of Sciences prognostiziert, dass im Jahr 2020 zwei Millionen Wasserstofffahrzeuge unterwegs sein könnten, bis 2030 sollen es 25 Millionen Fahrzeuge sein. Dies würde bei leichten Nutzfahrzeugen zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen von 20% bis 2035 und sogar von mehr als 60% bis 2050 führen. Obwohl die Brennstoffzellen selbst kein CO<sub>2</sub> emittieren, sind diese Fahrzeuge nicht ganz "grün", da Wasserstofferzeugungstechnologien für einige Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Zwei gängige Methoden, die Erdgas-Dampfreformierung und die Kohlevergasung, setzen beide CO<sub>2</sub> während des Extraktionsprozesses frei. Aber selbst wenn die Emissionen aus der Kraftstoffproduktion berücksichtigt werden, emittieren Wasserstoffkraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (Petroleum Fueled Cars) immer noch deutlich weniger Treibhausgase.

Die kürzlich veröffentlichte Studie zeigt, dass Brennstoffzellenfahrzeuge, die Wasserstoff aus Erdgas verwenden, die gesamten Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellen benzinbetriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor um 60% reduzieren. Dieser Anteil ist natürlich noch höher, wenn die weniger kohlenstoffintensive Technologie für die Wasserstoffproduktion genutzt wird. Wenn Wasserstoff mithilfe von

Elektrolysetechnologie hergestellt wird, die mit erneuerbaren Energiequellen betrieben wird, wird wenig oder gar kein Treibhausgas emittiert, was es zu einer der umweltfreundlichsten Quellen für Kraftstoff macht. Wenn sie mit erneuerbarer Energie erzeugt werden, sind die gesamten Treibhausgasemissionen von Wasserstoff aus der Produktion in Brennstoffzellenfahrzeugen niedriger als die Gesamtemissionen von herkömmlichem Benzin-, Biokraftstoff- oder Hybridfahrzeugen. Um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, arbeiten Wissenschaftler an der Gewinnung von Wasserstoff mit Methoden, die CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage) verwenden, die Kohlendioxidemissionen erfassen, transportieren und speichern, bevor sie in die Luft gelangen. Mit CCS wird das durch die Wasserstoffproduktion entstehende CO<sub>2</sub> zu einem Speicher transportiert und unter hohem Druck in tiefe unterirdische Kavernen injiziert, wo es nicht in die Atmosphäre entweichen und zur Erderwärmung beitragen kann. Die Verwendung dieser Technologien macht die Wasserstoffproduktion umweltfreundlicher. Die Kombination von CCS mit Kohlevergasung ermöglicht eine kostengünstige Wasserstoffproduktion mit geringen Treibhausgasemissionen. Während dieses Prozesses wird die Kohle in Gas umgewandelt, das unter anderem Wasserstoff enthält. Der Wasserstoff wird dann in mehreren Schritten extrahiert. Mit CCS werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu kohlebetriebenen Kraftwerken um bis zu 90% reduziert. Einige Wissenschaftler behaupten jedoch, dass Wasserstoff-Energie im Moment nicht so sauber ist, wie es sich anhört. Zusätzlich zu den potenziellen Treibhausgasemissionen während der Wasserstoffproduktion kann Wasserstoff selbst eine Gefahr für die Atmosphäre darstellen. Es ist unmöglich, Wasserstoff herzustellen, zu lagern und zu transportieren, ohne dass etwas in die Atmosphäre entweicht. Wenn mehr Wasserstoff verwendet wird, könnte entwichener Wasserstoff in der Atmosphäre akkumulieren, die Ozonschicht abbauen und zur globalen Erwärmung beitragen. Wissenschaftler haben versucht, umweltfreundlichere Methoden zur Herstellung von Wasserstoff zu entwickeln.

Bisher ist keines dieser Modelle über Computermodelle und Forschungslabors hinausgegangen. Zum Beispiel hat Wasserstoff, der durch Elektrolyse erzeugt wird und erneuerbare Energiequellen wie Wind- oder Solarenergie nutzt, keine oder nahezu keine Treibhausgasemissionen und ist in der Theorie sehr attraktiv. Mit dieser Methode werden heute sogar weniger als 5% des Wasserstoffs produziert. Dies dürfte sich in naher Zukunft nicht ändern, da derzeit keine emissionsfreien Wasserstoffproduktionsanlagen im kommerziellen Maßstab betrieben werden.

## Referenzen

Antonio, F de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918.

Council, World Energy. (2016). *World Energy Resources 2016*.

Esteban, Miguel, & Leary, David. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*, 90(1), 128-136.

Frid, Chris, Andonegi, Eider, Depestele, Jochen, Judd, Adrian, Rihan, Dominic, Rogers, Stuart I, & Kenchington, Ellen. (2012). The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 133-139.

International Energy Agency (IEA), (2006), *Hydrogen Production and Storage*

Web page (2017) retrieved from <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html>

Leveque, Francois, Glachant, Jean-Michel, Barquin, Julian, von Hirschhausen, Christian, Holz, Franziska, & Nuttall, William J. (2010). *Security of Energy Supply in Europe. Natural Gas, Nuclear and Hydrogen*: Edward Elgar.

Pelc, Robin, & Fujita, Rod M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479.

Rourke, Fergal O, Boyle, Fergal, & Reynolds, Anthony. (2010). Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2), 398-409.

Tabak, John. (2009). *Natural gas and hydrogen*: Infobase Publishing.

## 8 Geothermie

**Autor:** Aleksandra SRETENOVIC

Fakultät für Maschinenbau, Universität Belgrad, Belgrad, Serbien.

E-mail: [asretenovic@mas.bg.ac.rs](mailto:asretenovic@mas.bg.ac.rs)

**Kurzfassung:** Die Geothermie hat ein sehr hohes Potenzial. Da die Erde ständig Wärme abgibt, kann sie überall auf der Welt gefunden werden. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturniveaus kann Geothermie für die Stromerzeugung und für anderen Wärmebedarf verwendet werden. Wärmequellen sind in Wasser (niedrige, mittlere oder hohe Temperatur) oder im Boden (heiße Steine) enthalten. Hochtemperaturwasser (oder Dampf) aus diesen Quellen kann zur Stromerzeugung verwendet werden, Wasser mit mäßiger Temperatur kann direkt zum Heizen oder in industriellen Anwendungen verwendet werden, während Wärme von Niedertemperaturwasser und -boden hauptsächlich als Wärmequelle für Wärmepumpen verwendet wird. Einige weit verbreitete oder vielversprechende technische Lösungen werden erläutert. Die Auswirkungen der Nutzung von Geothermie auf die Umwelt werden diskutiert.

### **Lernziele:**

Am Ende dieses Kapitels ist der Leser in der Lage

- die Potenziale und Verfügbarkeit von Geothermie zu verstehen
- Auswirkungen der Geothermie auf die Umwelt zu verstehen und zu diskutieren
- kritisch Fragen im Zusammenhang mit den möglichen Anwendungen der Geothermie zu erörtern

Geothermische Energie ist die Restwärme aus der Entstehung des Planeten vor 4,5 Milliarden Jahren (ca. 40%) sowie die Wärme aus dem radioaktiven Zerfall natürlich vorkommender

radioaktiver Isotope (Rest 60%) (Glassley, 2014). Die thermische Energie in der Erde ist sowohl in den Gesteinen als auch in der natürlichen Flüssigkeit in ihren Brüchen und Poren auf unterschiedlichen Temperaturniveaus enthalten (Leveque et al., 2010). In der Geschichte wurden die warmen geothermischen Flüssigkeiten zum Kochen und Baden verwendet, aber zu Beginn des 20. Jahrhunderts fand diese erneuerbare Energiequelle ihre breitere industrielle und kommerzielle Anwendung, wie zur elektrischen Energieerzeugung. Der durchschnittliche Wärmefluss durch die Erdkruste beträgt fast 59 mW / m<sup>2</sup>. Für die meisten kontinentalen Gebiete wird der Wärmefluss durch zwei Elementarprozesse verursacht: Die Wärmekonvektion und Wärmeleitung aus dem Erdmantel und Kern und die Wärme, die durch den Zerfall radioaktiver Elemente in der Kruste (Isotope von Uran, Thorium und Kalium) in der Erdatmosphäre erzeugt wird. In Gebieten mit vulkanischen oder tektonischen Aktivitäten wird ein höherer Wärmefluss registriert, weshalb die Menschen Geothermie normalerweise nur mit diesen Orten in Verbindung bringen, wie Island, Neuseeland, Japan und dem Yellowstone National Park (neuer Vulkanismus). Es wird oft vernachlässigt, dass es auch in vielen anderen Regionen Möglichkeiten gibt, geothermische Energiequellen zu nutzen.

Um Elektrizität zu erzeugen, ist es notwendig, bis zu Tiefen zu bohren, wo Wärme bei hohen Temperaturen (im Bereich von 150 ° C bis 200 ° C) gefunden werden kann. Für andere Heizanwendungen reicht es, niedrigere Temperaturen von 100 ° C bis 150 ° C zu erreichen. Erdwärme kann direkt und indirekt zum Heizen und Kühlen von Gebäuden verwendet werden, wodurch der elektrische Bedarf für Heizung, Lüftung, Klimatisierung und Kühlung (HVAC) reduziert wird (Glassley, 2014). Auch bei Temperaturen unter 50 ° C kann Geothermie für verschiedene Zwecke genutzt werden. Geothermie-Wärmepumpen sind die am häufigsten verwendeten Technologien, die für den Heiz- und Kühlbedarf in Gebäuden genutzt werden. Die zwischen 2 und 200 m liegende Energie kann einfach erreicht werden,

wodurch die Stromkosten erheblich gesenkt werden. Obwohl die Temperaturen im erdnahen Erdreich von äußeren Witterungsbedingungen abhängen, sind die Temperaturen in Tiefen von mehr als 3 Metern aufgrund des konstanten Wärmeflusses aus dem Erdinneren nahezu konstant. Eine der hervorstechenden Eigenschaften von Erdwärmepumpen im Vergleich zu Luft-Wasser-Wärmepumpen ist ihre konstante Effizienz das ganze Jahr hindurch (variiert nicht durch die Außenlufttemperatur). Die Geothermie weist einige hervorstechende Merkmale auf: Sie benötigt keine externe Brennstoffinfrastruktur, da die Wärme nie aus dem Erdinneren abgeführt wird. Die Treibhausgasemissionen für die Stromerzeugung im Vergleich zu fossil befeuerten Kraftwerken werden um mehr als 90% reduziert oder vollständig eliminiert. Diese Energiequelle tritt auf verschiedene Arten auf, wodurch es möglich ist, sie für verschiedene Zwecke zu verwenden. Die Erdwärme mittlerer Temperatur kann direkt für die Lebensmittelverarbeitung, Trocknungsmaterialien, landwirtschaftliche Aktivitäten und Gewächshäuser, Aquakultur und Papierherstellung verwendet werden. Obwohl diese direkt verwendbaren Anwendungen entwickelt wurden und sich als sehr erfolgreich erwiesen haben, sind sie immer noch relativ unbekannt und weitestgehend wenig ausgelastet. Die effektivste Nutzung von Geothermie findet dort statt, wo verfügbare Quellen und Technologien den Bedürfnissen des beobachteten Energiesektors entsprechen. Kraft-Wärme-Kopplung in Kraft-Wärme-Kopplungs- und Hybridsystemen sowie Wärmepumpenanwendungen sind Optionen, die eine verbesserte Energieeinsparung bieten (Leveque et al., 2010). Viele Eigenschaften der Geothermie, nämlich ihre weitverbreitete Verteilung, ihre Grundlast-Disposition ohne Speicherung, ihre geringe Stellfläche und geringe Emissionen, sind wünschenswert, um eine nachhaltige Energiezukunft zu erreichen. Geothermie ist eine der wenigen erneuerbaren Energieressourcen, die eine kontinuierliche Grundlaststromversorgung bietet und nur minimale visuelle und ökologische Auswirkungen auf die Umwelt hat. Diese Systeme haben einen geringen Platzbedarf und

praktisch keine Emissionen. Wenn ein wesentlicher Teil der Grundlast von geothermischen Quellen geliefert würde, würde dies einen Puffer für Instabilitäten von Gaspreisschwankungen und Versorgungsunterbrechungen bieten.

## **8.1 Geothermische Energieerzeugung**

Das Hauptmerkmal der Geothermiekraftwerke ist, dass sie typischerweise als Grundlastkraftwerke ausgelegt sind. Dies unterscheidet sie von anderen erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne, die stark intermittierend sind. Folglich können diese Einrichtungen aufgrund der unterbrochenen (und oft unvorhersehbaren) Stromerzeugung aus Sonne oder Wind keine solide Grundlastkapazität bereitstellen. Es ist die Grundlastleistung, die das meiste Infrastruktursystem unterstützt, diese muss zuverlässig durch eine konsistente Energiequelle angetrieben werden. Wenn man bedenkt, dass die Erdwärme niemals aus dem Erdinneren austritt, ist sie eine gute Wahl für die Energiequelle des Grundlastkraftwerks. Die erste Stromerzeugung aus geothermischem Dampf wurde 1904 in Larderello, Italien, installiert (Leveque et al., 2010). Seit dieser Zeit haben andere hydrothermale Entwicklungen, wie das Dampffeld bei The Geysers, Kalifornien, die Heißwassersysteme in Wairakei, Neuseeland, Mexiko, Reykjavik, Island, Indonesien und den Philippinen, zur gesamten installierten elektrischen Erzeugungskapazität von fast 10.000 MWe zu Beginn des 21. Jahrhunderts beigetragen. Die direkte Nutzungskapazität beträgt mehr als 100.000 MWt (thermische MW) (Glassley, 2014). Ein weiteres wichtiges Merkmal der geothermischen Stromerzeugung ist, dass keine externe Brennstoffinfrastruktur benötigt wird. Da diese Energiequelle in der Nähe des Kraftwerks natürlich vorkommt, ist kein Kraftstofftransport erforderlich, was sie ökonomisch und ökologisch macht. Jüngste Studien haben gezeigt, dass geothermische Stromerzeugung auch flexibel sein kann. Damit eine Ressource flexibel ist, erfordert ein Stromgenerator, dass die Leistungsabgabe von der Erzeugungsanlage erhöht oder

verringert werden kann, wenn sich die Leistungsnachfrage während des Tages ändert und sich die Stromeinspeisung in das Netz ändert. Flexible Generierung erfordert zusätzliche Designkomponenten und Betriebsstrategien, die noch in der Entwicklung sind.

Wie derzeit angewendet, wird eine flexible Erzeugung durch Variieren der Menge an heißer geothermischer Flüssigkeit erreicht. Das wird entweder durch das Umgehen der Erzeugungsausrüstung durch die Verwendung von sekundären Rohrleitungskreisläufen in die Energieerzeugungsausrüstung eingeführt oder durch das Drosseln der Geschwindigkeit, mit der geothermische Flüssigkeit aus dem Reservoir extrahiert wird. Die Erzeugung von Strom aus Erdwärme beruht auf der Fähigkeit, Erdwärme in der Tiefe in Elektrizität umzuwandeln. Die dazu erforderliche Ausrüstung ist ein Rohrleitungskomplex, der heiße Flüssigkeit aus der Tiefe einer Turbinenanlage auf die Oberfläche bringt. Wo die thermische Energie in kinetische Energie in Form einer rotierenden Turbine umgewandelt wird. Die kinetische Energie der Turbine wird dann unter Verwendung eines elektrischen Generators in elektrische Energie umgewandelt. Damit ein geothermischer Standort nützlich ist, muss er in der Lage sein, Dampf in einer ausreichend hohen Rate zu erzeugen, um die Erzeugung von Elektrizität wirtschaftlich machbar zu machen. Obwohl Bedingungen wie Baukosten, Explorationsinvestitionen, der Zugang zu elektrischer Infrastruktur und andere Überlegungen große Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit eines Standorts haben, wird allgemein angenommen, dass ein Standort in der Lage sein muss, mehr als ein MW an Leistung zu erzeugen um für die Energieübertragungsinfrastruktur verwendet zu werden. Wenn die Anwendung lokal geplant ist, z. B. Strom für eine kleine Gemeinde, einige Industriegebäude oder einen Universitätscampus, können viel kleinere Einheiten (einige zehn kW) wirtschaftlich eingesetzt werden. Die geothermische Ressource muss in Bezug auf den Druck und den Bohrlochkopf der Quelle sowie ihre Beziehung mit der

Durchflussrate durch die Turbine bewertet werden. Trockendampfsysteme werden selten gefunden, sind jedoch in der Lage, eine signifikante Energieerzeugung zu liefern. Ein erfolgreiches Beispiel sind die Geysire in Kalifornien (Abbildung 1) mit einer installierten Leistung von derzeit etwa 1400 MW, von denen 933 MW in Betrieb sind. Damit ist es der weltweit größte geothermische Stromerzeuger mit zusätzlichen Erzeugungskapazitäten in der Entwicklung. Larderello, in Italien, ist die einzige andere in Betrieb befindliche Trockendampfanlage der Welt. Dieser Prozess wird unter Verwendung von Produktionsbohrlöchern durchgeführt, die Hunderte bis Tausende von Metern in den Untergrund eindringen und einen niedrigen Weg für das Aufsteigen der Reservoirflüssigkeit aus der Tiefe bereitstellen. Injektionsbrunnen werden verwendet, um das Reservoir aufzufüllen, indem Kondenswasser recycelt und (falls erforderlich) mit anderen Wasserquellen ergänzt wird. Es gibt verschiedene Arten von Reservoiren. Trockendampfereservoire haben eine ausreichende Enthalpie, um das gesamte verfügbare Wasser zu verdampfen. Solche Systeme sind am einfachsten zu konstruieren und verfügen über die höchste Energieverfügbarkeit aller geothermischen Ressourcen, sind aber geologisch ungewöhnlich (siehe Abbildung 8.1).

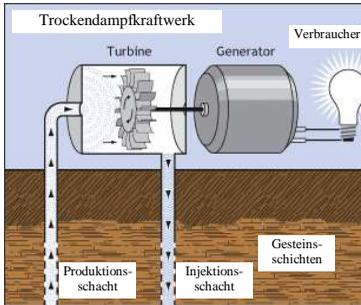


Abbildung 8.1 Trockendampfkraftwerk

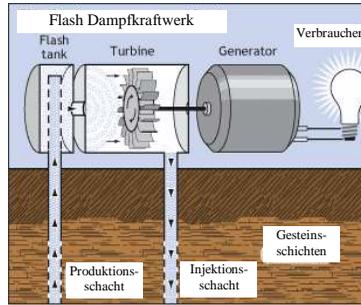


Abbildung 8.2 Flash Dampfkraftwerk

(www.energy.gov)

Abbildung 8.2. Flash Dampfkraftwerk (www.energy.gov)

Die anderen gebräuchlicheren hydrothermalen Systeme besitzen normalerweise genügend Wärme (Temperaturen im Bereich von etwa  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bei erhöhtem Druck, damit Wasser bei Annäherung an die Turbine zu Dampf aufblitzen kann (siehe Abbildung 8.2). Wenn der Dampf abkühlt, kondensiert er zu Wasser und wird wieder in den Boden eingespritzt, um erneut verwendet zu werden. Strom wird in Trockendampf- und Hydrothermalkraftwerken durch die Expansion des Dampfes erzeugt. Dieser wird so effizient wie möglich aus der Flüssigkeit gewonnen, wenn sich der Dampf in einer Turbinenanlage ausdehnt und abkühlt. Geothermische Ressourcen mit niedrigerer Temperatur können verwendet werden, um Energie unter Verwendung von binären Pflanzen zu erzeugen, die eine Arbeitsflüssigkeit (üblicherweise eine organische Verbindung wie Isopentan oder Propan oder eine Ammoniak-Wasser-Lösung) verwenden, deren Siedetemperatur deutlich unter der von Wasser liegt. In einer binären Anlage strömt das geothermische Wasser durch einen Wärmetauscher, überträgt seine Wärme auf das Arbeitsfluid und wird dann in das Reservoir zurückgeleitet (siehe Abbildung 8.3). Binäre Anlagen werden zum am

schnellsten wachsenden Teil des Geothermiemarktes. Sie haben den Vorteil, dass sie Ressourcen mit niedrigerer Temperatur benötigen, sie emittieren keine Gase in die Atmosphäre und können modular aufgebaut werden. (Leveque et al., 2010) Heute werden weltweit fast 10.000 MWe Strom aus Geothermie erzeugt. Es gibt verschiedene Technologien zur Energieumwandlung, die in verschiedenen Reifegraden erhältlich sind (direkte Dampfausdehnung, ein- und mehrstufige Dampfentleerung, organische binäre Rankine-Kreisläufe, Zweiphasen-Strömungsexpander). Die Umwandlung geothermischer Energie in Elektrizität unterliegt aufgrund der niedrigeren Temperatur der geothermischen Flüssigkeiten im Vergleich zu viel höheren Verbrennungstemperaturen für fossile Brennstoffe gewissen Einschränkungen.

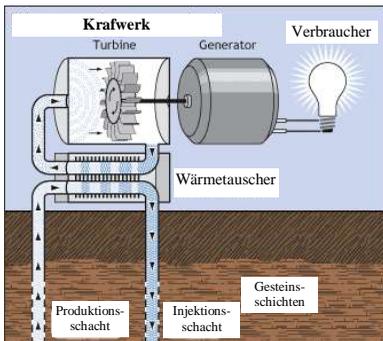


Abbildung 8.3 Geothermisches Kraftwerk des binären Zyklus

([www.energy.gov](http://www.energy.gov))



Abbildung 8.4 Erdwärmepumpe

(<http://www.dustymars.net/heat-pump-geothermal/>)

Niedrige Energiequellentemperaturen ergeben ein geringeres maximales Arbeitsproduktionspotential in Bezug auf die Verfügbarkeit oder Exergie der Flüssigkeit; und folglich des zweiten Hauptteils der Thermodynamik in niedrigeren Wärme-zu-Energie-Wirkungsgraden.

Der Wert der Verfügbarkeit bestimmt die maximale Menge an elektrischer Energie, die für eine gegebene Strömungsrate der erzeugten Geoflüssigkeit bei gegebener Temperatur und Dichte oder spezifischem Druck erzeugt werden könnte. Die derzeitige Praxis für geothermische Umwandlungssysteme zeigt, dass die Nutzungseffizienzen typischerweise im Bereich von 25% bis 50% liegen. Die zukünftige Ingenieurspraxis möchte diese auf 60% oder mehr erhöhen, was weitere Investitionen in Forschung und Entwicklung erfordert, um die Wärmeübertragungsschritte durch Minimierung der Temperaturdifferenzen und Erhöhung der Wärmeübergangskoeffizienten sowie durch Verbesserung der mechanischen Wirkungsgrade von Konvertern wie Turbinen, Turbolader und Pumpen zu verbessern.

### **Geothermische Wärmepumpen**

Geothermische Wärmepumpen nutzen die Niedertemperatur-Erdwärme, die im relativ flachen Untergrund (<300 m Tiefe) zu finden ist. Der konstante Wärmefluss aus dem Erdinneren zusammen mit dem solaren Fluss zum Boden macht ihn zu einer Energiequelle mit relativ konstanter Temperatur während des ganzen Jahres. Dies ist sehr wichtig in Bezug auf die Effizienz (Heizleistung und COP von Luft-Wasser-Wärmepumpen sinkt deutlich mit niedrigeren Umgebungstemperaturen). Die derzeit verfügbare geothermische Wärmepumpentechnologie liefert die COP-Werte im Bereich von 3 bis 5 und ist damit die energieeffizienteste Anlage für HLK-Zwecke. Die Dimensionierung und Auslegung dieser Systeme ist in der Praxis bekannt und entwickelt, aber es ist wichtig, die Eigenschaften der geothermischen Quelle angemessen zu untersuchen und sie mit den Anforderungen der Gebäudesysteme zu verknüpfen (siehe Abbildung 8.4).

### **Direkte Nutzung der Geothermie**

Im Gegensatz zur geothermischen Stromerzeugung, bei der Wärme in Elektrizität umgewandelt wird, wird bei direkten Anwendungen die Wärmeenergie direkt in einen Prozess

eingebraucht. Geothermie mit Temperaturen im Bereich von 10 ° C bis 150 ° C kann die Wärme liefern, die für ein breites Spektrum industrieller Bedürfnisse benötigt wird. Ab 2010 wurden weltweit rund 122 TWh / Jahr thermische Energie für den direkten Gebrauch genutzt, die aus einer installierten Leistung von 50.583 MW stammten (Lund & Boyd, 2016). Die Zunahme der installierten Kapazität von Direktanwendungs-Anwendungen spiegelt ein schnelles Wachstum der internationalen Entwicklung dieser Art von System wider. 1985 berichteten 11 Länder, dass sie mehr als 100 MW direkt nutzbare Geothermie nutzen. Im Jahr 2010 war diese Zahl auf 78 gestiegen. Die Zusammenfassung der verschiedenen Kategorien der Direktnutzung ist in Tabelle 8.1 dargestellt, während der Vergleich der Energienutzung für die Jahre 1995-2015 in Abbildung 8.5 zu sehen ist.

Tabelle 8.1 Zusammenfassung der verschiedenen Kategorien der Direktnutzung von Geothermie weltweit für das Jahr 2015.

(Lund & Boyd, 2016)

	Kapazität [MWt]	Nutzung [TJ/Jahr]
Geothermische Wärmepumpen	50,258	326,848
Raumheizung	7,602	88,668
Gewächshausheizung	1,972	29,038
Aquakultur Teichheizung	696	11,953
Landwirtschaftliches Trocknen	161	2,030
Industrielle Anwendungen	614	10,454
Baden und Schwimmen	9,143	119,611
Kühlung / Schneeschmelze	360	2,596
Anderes	79	1,440
Summe	70,885	592,638

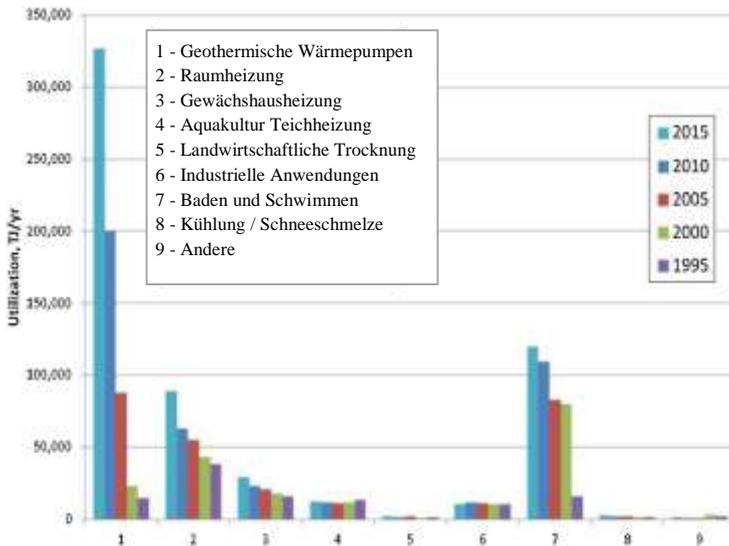


Abbildung 8.5 Vergleich der weltweiten Geothermie mit direkter Nutzung in TJ / Jahr von 1995, 2000, 2005, 2010 und 2015

(Lund & Boyd, 2016)

Jedes direkt genutzte Anwendungssystem muss im Detail auf Wärmeverluste, Bedarfslast und die Größe der potenziellen Erdwärmerversorgung untersucht werden. Eine effizientere Nutzung dieser Ressourcen mit niedriger bis moderater Temperatur kann erhöht werden, indem mehrere Anwendungen in einer Kaskadenweise kombiniert werden. Solche Systeme erlauben es, die maximale Wärmemenge für nützliche Arbeiten zu verwenden. Einer der Hauptvorteile der geothermischen Direktanwendungs-Anwendungen ist, dass sie den Energieverbrauch, der normalerweise von mit fossilen Brennstoffen betriebenen Systemen stammt, erheblich reduzieren oder vollständig eliminieren. Sie haben auch einen hohen Kapazitätsfaktor und reduzieren das Brandrisiko, da keine Verbrennung erforderlich ist, so dass sie gegenüber herkömmlichen Technologien erhebliche Vorteile bieten können. Sie reduzieren auch die Treibhausgasemissionen erheblich.

## Fernwärme

Im Jahr 2010 entfielen auf die Raumheizung 63.025 TJ / Jahr von insgesamt 423.830 TJ / Jahr Energie, die durch Direktanwendungen verbraucht wurden, im Jahr 2015 waren es 88.688 TJ / Jahr von insgesamt 592.638 TJ / Jahr. Das ist der drittgrößte Anwendungszweck der direkten Nutzung von Geothermie weltweit (Abbildung 5). Bei diesen Raumheizungsanwendungen handelt es sich in der Regel um ein Fernwärmenetz, das die Gebäude mit der notwendigen Wärme versorgt. Das System besteht aus einer Erdwärmequelle, einem Rohrleitungsnetz, einem Steuersystem und einem Entsorgungs- oder Reinjektionssystem. Wenn die Temperatur der geothermischen Flüssigkeit hoch genug ist ( $> 65\text{ °C}$ ), wird das heiße Wasser, das aus dem flachen Brunnen oder der Quelle entnommen wird, direkt in das System eingeleitet, wobei die Flüssigkeit direkt entsorgt wird. An Orten mit moderaten Temperaturen ( $50\text{ °C} - 65\text{ °C}$ ) wird die Flüssigkeit von der geothermischen Quelle zum Wärmetauscher gebracht, der den Wärmeübergang im geschlossenen Kreislauf ermöglicht. Für Standorte mit niedrigen Temperaturen wird die Verwendung von Wärmepumpen empfohlen, während diese Systeme zusätzlichen Energieaufwand erfordern.

Im Rahmen einer von der EU geförderten Studie wurde der "Pan-European Thermal Atlas" online veröffentlicht (siehe Abbildung 8.6). Es zeigt die unterschiedlichen Heizmöglichkeiten in Europa, mit aktuellem Wärmebedarf, Potenzial für Solarenergie, Biomasse und Geothermie für Fernwärme. Dieses Energieplanungswerkzeug bietet europäischen Regierungen, Unternehmen, Beratern, Wissenschaftlern und Planern die Möglichkeit, fundierte Entscheidungen über Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen und die Nutzung ungenutzter alternativer Energiequellen für Heizung und Kühlung zu treffen.

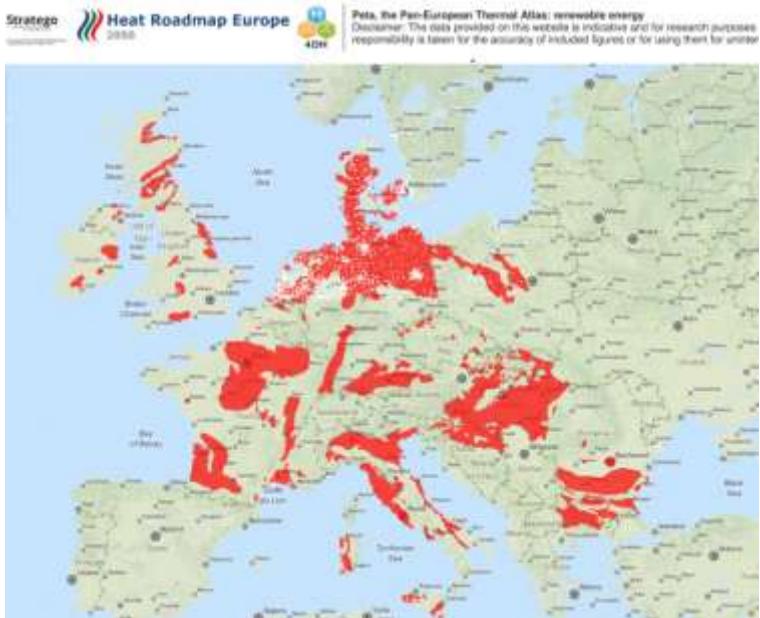


Abbildung 8.6 Europa thermal atlas

(Quelle: heatroadmap.eu)

## **Aquakultur**

Eine der einfachsten Direktanwendungen für geothermische Flüssigkeiten ist die Aquakultur. Geothermische Flüssigkeiten können verwendet werden, um verschiedene Arten von Fischen zu züchten, wie zum Beispiel Wels, Barsch, Meeräsche, Aale, Lachs, Forelle, tropische Fische, Hummer, Alligatoren, Algen, Garnelen, Garnelen, Muscheln, Jakobsmuscheln usw. Geothermische Wärme wird verwendet, um die Temperatur für die Zucht, das Wachstum und die Gesundheit der interessierenden Arten zu optimieren.

## **Trocknen**

Geothermische Wärme wird oft zum Trocknen von Lebensmitteln wie Zwiebeln, Fleisch, Obst, Kartoffeln, Gewürzen,

Zucker, aber auch Materialien wie Bauholz, Betonblöcken und vielen anderen Substanzen verwendet. Die Nutzung von Erdwärme für diesen Zweck spart Brennstoff ein, im Vergleich zu herkömmlichen Heizkesseln mit fossilen Brennstoffen. Darüber hinaus bieten Kraft-Wärme-Kopplungs- und Hybridsysteme die Möglichkeit über die Wärmepumpenanwendung Energie einzusparen.

## **8.2 Umweltauswirkungen der Nutzung von Geothermie**

Die Ergebnisse der Analyse des gesamten Lebenszyklus von Geothermie-Anlagen zeigen, dass ihre Umweltbelastung im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken deutlich geringer ist (Leveque et al., 2010). Wenn man bedenkt, dass diese erneuerbare Energiequelle unterirdisch angeordnet ist, während die Ausrüstung dieser Systeme relativ kompakt ist, sind ihre Auswirkungen auf die Umgebung insgesamt gering. Die Treibhausgasemissionen sind minimal. Die Verfügbarkeit und Konsistenz der Geothermie ermöglichen eine zuverlässige Grundlastquelle, so dass keine Speicher- oder Backup-Systeme benötigt werden. Diese Quelle muss nicht an einem Ort produziert und dann über große Entfernungen verteilt werden, so dass im Vergleich zu fossilen oder Biomasse erhebliche Einsparungen möglich sind. Diese Einsparungen beziehen sich nicht nur auf Transportkosten, sondern auch auf Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen, die während des Transports entstehen. Es gibt minimale Emissionen von Stickstoff oder Schwefeloxiden, die aus seiner Verwendung resultieren, und es besteht keine Notwendigkeit, radioaktives Material zu entsorgen. Die allgemeine Schlussfolgerung aus allen kürzlich veröffentlichten Studien ist, dass Emissionen und andere Auswirkungen von geothermischen Anlagen dramatisch niedriger sind als bei anderen Formen der Stromerzeugung (Tester et al., 2006). Die Umweltauswirkungen von Erdwärmepumpen sind ziemlich begrenzt, da sie üblicherweise während des Hochbaus installiert werden und

normalerweise einen unter der Frostlinie vergrabenen unterirdischen Wärmetauscher verwenden. Es gibt jedoch einige potenzielle Auswirkungen, die vor einer breiteren Nutzung der Geothermie evaluiert und analysiert werden sollten. Einige der wichtigsten Probleme beziehen sich auf induzierte Seismizität oder Bodensenkungen, Wassernutzung und Kontamination. Lärm, Sicherheit, visuelle Auswirkungen und Landnutzung im Zusammenhang mit Bohr- und Produktionsvorgängen sind ebenfalls wichtig, aber durchaus beherrschbar. Es gibt mehrere mögliche Umweltauswirkungen aus jeder geothermischen Energieentwicklung, dazu gehören: Gasförmige Emissionen, Wasserverbrauch und -verschmutzung, Feststoffemissionen, Lärmbelästigung, Landnutzung und Bodensenkungen, induzierte Seismizität und Erdbeben, Störung des natürlichen Lebensraums und der Vegetation, Veränderung der natürlichen Umwelt Aussichten und mögliche katastrophale Ereignisse. Trotz dieser langen Liste weisen aktuelle und kurzfristige geothermische Energietechnologien im Allgemeinen eine viel geringere Gesamtauswirkung auf die Umwelt auf als konventionelle fossil betriebene Kernkraftwerke.

### **Gasförmige Emissionen**

Geothermische Dampf- und Flash-Anlagen emittieren im Vergleich zu fossil betriebenen Kraftwerken deutlich weniger CO<sub>2</sub> pro MWh, während binäre Anlagen praktisch keine CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen. Die Konzentrationen der regulierten Schadstoffe - Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) - in den Gasableitungen aus geothermischen Dampf- und Flash-Anlagen sind äußerst gering. Kürzlich veröffentlichte Daten zeigen, dass geothermische Anlagen weitaus umweltfreundlicher sind als die anderen konventionellen Anlagen (Tester et al., 2006).

### **Wasserverschmutzung**

Flüssigkeitsströme, die aus der Bohrung und Produktion stammen, können gelöste Mineralien enthalten. Die Menge erhöht sich mit der Flüssigkeitstemperatur, daher ist es für

Hochtemperaturquellen ( $> 230^{\circ}\text{C}$ ) notwendig, sie zu untersuchen. Einige Elemente wie Bor und Arsen können den Boden und das Wasser in Mitleidenschaft ziehen und negative Auswirkungen auf lokale Lebensräume und Vegetation haben. Wenn das Systemschachtgehäuse beschädigt ist, können diese Flüssigkeiten in die Umgebung gelangen und diese schädigen. Daher ist es notwendig, den Standort in der Bohr- und Betriebsphase zu überwachen, um gefährliche Leckagen zu vermeiden. Im Allgemeinen besteht eine sehr geringe Gefahr der Kontamination der Umwelt, da die gesamte produzierte Flüssigkeit erneut injiziert wird (Tester et al., 2006).

### **Feststoffemissionen**

Eine Kontamination von Oberflächenanlagen oder der Umgebung durch den Austritt von Feststoffen aus dem Geofluid ist praktisch ausgeschlossen. Die einzige möglicherweise gefährliche Situation könnte ein Unfall sein, der mit einer Flüssigkeitsbehandlung oder einem Rückgewinnungssystem für Mineralien verbunden ist, die ein Verschütten von Feststoffen in der Umgebung verursachen würde. Um auf der sicheren Seite zu sein, ist es ratsam, vorsichtig zu sein, wenn die Flüssigkeit chemisch behandelt werden muss, um Feststoffe zu entfernen. Die in diesem Verfahren verwendeten Chemikalien können toxisch sein und einer geregelten Entsorgung unterliegen (Tester et al., 2006).

### **Lärmbelästigung**

Der Lärm, der durch die geothermischen Anlagen verursacht wird, unterscheidet sich nicht signifikant von anderen industriellen Anlagen. Die höchsten Lärmpegel werden in der Bohr-, Stimulations- und Testphase erreicht, wo diese Werte im Bereich von 80-115 dBA liegen. Während des normalen Betriebs des Systems sind die Geräuschpegel in einer Entfernung von 900 m nicht höher als 71-83 dBA. Diese Werte sind wesentlich niedriger, wenn wir uns weiter von der Quelle entfernen. Wenn man bedenkt, dass geothermische Anlagen in großen

geothermischen Reservoirbereichen liegen, sollte es keine offensichtlichen Probleme mit Lärm geben. Zum Vergleich haben verstopfte Stadtgebiete typischerweise Lärmpegel von etwa 70-85 dBA und in der Nähe einer großen Autobahn 90 Dezibel vorzufinden sind (Tester et al., 2006).

### **Bodennutzung**

Der Einfluss des beobachteten geothermischen Kraftwerks auf das Land, hängt stark von den Eigenschaften der geothermischen Flüssigkeit und des Abflusses ab. Normalerweise werden diese Anlagen aufgrund von Druck- und Temperaturverlusten, die durch lange Rohrleitungen entstehen können, auf dem Gelände in der Nähe eines Stausees errichtet. Um einen zu großen Einfluss auf das Gebiet zu vermeiden und die Landwirtschaft oder andere Nutzungen von Land zu ermöglichen, können die Rohrleitungen gesammelt und an Säulen und Geländern montiert werden. Daher ist die Gesamtfläche des Kraftwerks zusammen mit den Hilfsaggregaten relativ klein (Tester et al., 2006).

## Referenzen

Glassley, William E. (2014). Geothermal energy: renewable energy and the environment: CRC Press.

Leveque, Francois; Glachant, Jean-Michel; Barquin, Julian; von Hirschhausen, Christian; Holz, Franziska & Nuttall, William J. (2010). Security of Energy Supply in Europe. Natural Gas, Nuclear and Hydrogen: Edward Elgar.

Lund, John W, & Boyd, Tonya L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.

Tester, Jefferson W; Anderson; Brian J, Batchelor; Anthony S, Blackwell; David D, DiPippo; Ronald, Drake, E; Nichols, Kenneth. (2006). The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. Massachusetts Institute of Technology, 209.

## 9 Wasserkraft

**Autor:** Aleksandra SRETENOVIC

Universität von Belgrad, Serbien.

E-Mail: [asretenovic@mas.bg.ac.rs](mailto:asretenovic@mas.bg.ac.rs)

**Kurzfassung:** Die Potenziale und der aktuelle Zustand der Wasserkraftnutzung werden herausgearbeitet. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Wasserkraftwerken, die Hauptkategorien sind: Reservoir-Typ, Lauf-of-River-Systeme, Pumpspeicher und kleine Wasserkraftanlagen. Die Technologie verschiedener Typen wird erklärt. Die meist verwendeten Turbinen in Wasserkraftwerken sind: Impulsturbine (Pelton, Cross Flow) und Reaktionsturbine (Propeller, Frances, Kinetic). Die Umweltauswirkungen von Wasserkraftwerken werden herausgearbeitet, wobei der Unterschied zwischen Großanlagen, die nicht mehr als "grüne" Anlagen gelten und Kleinwasserkraftwerken hervorgehoben wird.

### **Lernziele:**

Nach dem lesen dieses Kapitels wird der Leser in der Lage sein:

- Ein Verständnis der Potenziale und Verfügbarkeit von Wasserkraft für die Stromerzeugung zu haben
- Die Vor- und Nachteile der Wasserkraftproduktion (wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Aspekt) zu diskutieren
- Mögliche Umweltauswirkungen von Wasserkraftanlagen (sowohl im großen als auch im kleinen Maßstab) zu diskutieren und zu verstehen
- Kritisch die Fragen zur möglichen Nutzung von Wasserkraft (Anlagentypen, eingesetzte Turbinen) zu diskutieren

## 9.1 Wasserkraftsysteme

Wasserkraft ist eine ausgereifte Technologie, die derzeit in etwa 160 Ländern zur Stromerzeugung genutzt wird. Mit einer Gesamtkapazität von etwa 1.060 GWe (19,4% der weltweiten elektrischen Kapazität im Jahr 2011) erzeugt die Wasserkraft rund 3.500 TWh pro Jahr, was 15,8% der weltweiten Stromerzeugung von 2011 entspricht. Wasserkraftwerke liefern mindestens 50% der gesamten Stromversorgung in mehr als 35 Ländern. Einer ihrer Vorteile ist, dass sie Hochwasserschutz und Bewässerung bieten. Die Nutzung von Wasserkraft zur Stromerzeugung ist sehr kosteneffizient. Es bietet eine hohe Effizienz bei niedrigen Betriebs- und Erzeugungskosten, obwohl die anfänglichen Investitionskosten erheblich sind. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die betriebliche Flexibilität. Die Kapazität von Wasserkraftwerken kann in einem Bereich von 23% bis 95% variieren, das ist abhängig von den Zielen und der Leistung (d. H. Grundlast, Spitzenlast) des spezifischen Kraftwerks.

Das globale technische Wasserkraftpotenzial ist sehr bedeutend und wird auf etwa 15.000 TWh pro Jahr geschätzt. Die Hälfte dieses Gesamtpotenzials ist in Asien und 20% in Lateinamerika verfügbar. In Europa, Afrika, Lateinamerika und Asien sind weiterhin große ungenutzte technische Potenziale vorhanden. Selbst in den am meisten wasserkraftentwickelten Regionen Europas gibt es immer noch etwa 50% des ungenutzten Potenzials. Für kleine Wasserkraftanlagen wird das Potenzial auf 150-200 GWe geschätzt. Bisher wurden nur etwa 20% dieses Potenzials ausgeschöpft.

Große Wasserkraftprojekte können jedoch aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit, Ökosysteme und die Umwelt auf soziale Widerstände stoßen und müssen die Bevölkerung, die von dem Projekt betroffen sein könnte, verlagern. Zu den großen Problemen der Wasserkraftwerke gehören die Akzeptanz durch die Öffentlichkeit, hohe Anfangsinvestitionskosten und lange Amortisationszeiten, lange Genehmigungs-

und Bauzyklen sowie lange Vorlaufzeiten für den Erhalt oder die Erneuerung von Konzessionsrechten und Netzanschlüssen. Diese Herausforderungen dürften das umsetzbare Wasserkraftpotenzial begrenzen. Wasserkraftanlagen können wie folgt kategorisiert werden (Egré & Milewski, 2002):

- Reservoir-Systeme mit erheblicher Speicherkapazität;
- Laufwassersysteme mit wenig oder keinen Speicherkapazitäten und Flussumleitungssystemen
- Pumpspeicheranlagen;
- Klein-, Mini- und Mikrowasserkraftanlagen.
- Reservoirartige Systeme

Reservoirsysteme (siehe Abbildung 9.1) beinhalten Stauwasser hinter einem Staudamm, um die Regulierung des Durchflusses während des ganzen Jahres (täglich oder monatlich) oder sogar in einigen Fällen mehrjährig für sehr große Stauseen zu ermöglichen. Das Reservoir stellt auch eine Energiereserve zur Verfügung, um während Trockenzeiten und / oder Spitzenbedarfszeiten den Strombedarf zu decken.

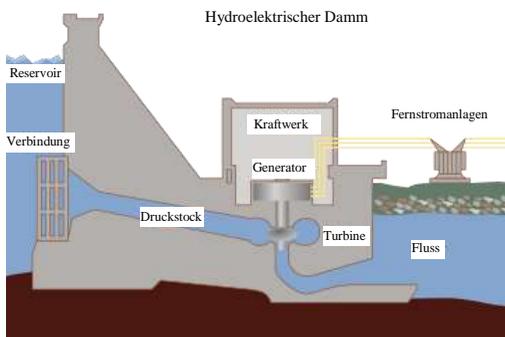


Abbildung 9.1 Reservoir Wasserkraft

<https://en.wikipedia.org>

Die Umweltauswirkungen von Reservoir-Systemen entstehen durch:

- die Bautätigkeiten beim Bau des Staudamms, der Deiche, der Dämme und des Kraftwerks;
- Vorhandensein von Infrastruktur (Zufahrtsstraßen, Stromleitungen, Umspannwerke usw.);
- die Veränderungen der Flussmuster;
- die Schaffung eines Stausees, der möglicherweise erhebliche ökologische Veränderungen von Land- und Flusslandschaften zu einer See ähnlichen Umgebung hervorruft, aber auch Landnutzungsänderungen, wie die Umsiedlung von Gemeinden und Produktionsaktivitäten.

### **Laufwasserkraftwerke**

Diese Art der Wasserkrafterzeugung nutzt den Wasserfluss im natürlichen Flussgebiet ohne die Notwendigkeit eines Reservoirs (oder eines kleinen). Sie können mit kleinem Kopf, im Allgemeinen auf großen Flüssen mit leichten Steigungen oder mit hohem Kopf, normalerweise auf kleinen Flüssen mit steilen Steigungen entworfen werden. Laufwasserprojekte (siehe Abbildung 9.2) können den gesamten Fluss oder nur einen Bruchteil davon nutzen.

Die Menge an Strom, die von Laufwassersystemen erzeugt wird, die den gesamten Fluss nutzen, kann das ganze Jahr über erheblich variieren, da sie vom Flussabfluss abhängt. Die meisten Laufwasserkraftwerke sind daher so konzipiert, dass sie die Basisleistung ganzjährig mit der gleichen Leistung erbringen und nur einen Bruchteil der gesamten Flussmenge verbrauchen. Eine gemeinsame Strategie zur Optimierung der Energieausbeute von Wasserkraftwerken an einem Fluss ist der Bau eines großen Speicherbeckens im oberen Einzugsgebiet, in dem mehrere Laufwasser- oder kleinere Speicherkraftwerke flussabwärts fließen. In allen Laufwasserprojekten trägt das Fehlen eines großen Reservoirs dazu bei die sozialen als auch die

ökologischen Auswirkungen erheblich zu begrenzen, da der Fluss nicht in einen See umgewandelt wird. Darüber hinaus bleibt das Strömungsmuster des Flusses im Wesentlichen unverändert, was stromabwärts gerichtete Aufpralle des Triebwerks reduziert.

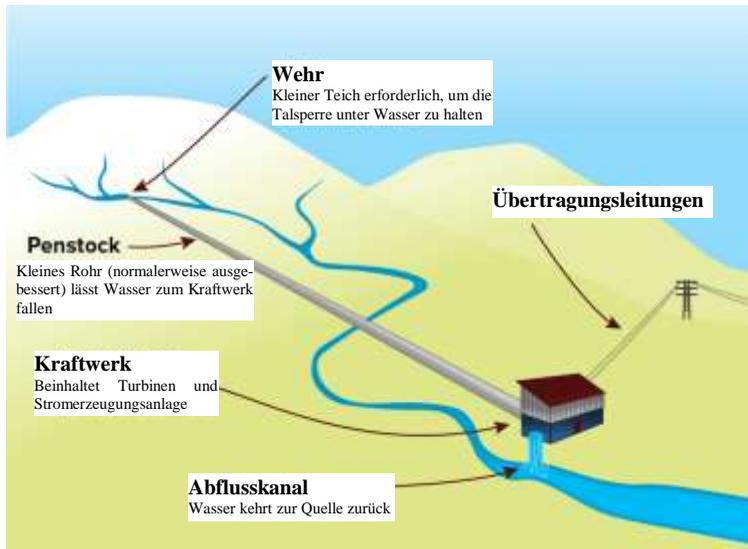


Abbildung 9.2 Laufwasserkraftdiagramm

(<http://nextgenerationhydro.ca/resource-centre/hydro-basics/>)

## Umleitungswasserkraftanlagen

Flussumleitungen bestehen aus:

- **In-Stream-Umleitung:** Ein Fluss wird aufgestaut und der Wasserfluss wird durch Tunnel in die Bergseite geleitet, um sich weiter stromabwärts in seinem Flussbett abzulassen.
- **Abzweigung zwischen Wassereinzugsgebieten:** Diese Strategie wird den Strom des aufnehmenden Flusses, in dem sich das Kraftwerk befindet, erhöhen und den Strom des abwärts umgeleiteten Flusses verringern.

Bei In-Stream-Umleitungen ist das Ziel, die Kraftwerksleistung zu erhöhen und damit die verfügbare Leistung und Energie zu erhöhen. Bei Überschneidungen mit Wasserscheiden führt dies zu einer Erhöhung der Energie, diesmal durch die Erhöhung der Strömung des Empfangsstroms, wo sich das Kraftwerk befindet. Die spezifischen Umweltauswirkungen von Umleitungswasserkraftanlagen sind eine starke oder vollständige Verringerung der Strömung unmittelbar stromabwärts der Umleitung. Dies kann Auswirkungen auf die Ufererosion, die Wassertemperatur und die Wasserqualität haben. Das Ausmaß solcher Auswirkungen ist eine Funktion der betroffenen Ökosysteme, insbesondere hinsichtlich der Biologie des Wassers und der Länge des Flussabschnitts mit verminderter Strömung. Bei einer Überwasserumlenkungen kann eine zusätzliche Auswirkung durch die erhöhte Strömung im aufnehmenden Fluss auftreten. Es besteht auch die Gefahr, dass unerwünschte Arten, Fische oder Pflanzen zwischen Einzugsgebieten verbreitet werden.

Letztendlich erscheint ein neues ökologisches Gleichgewicht mit der Kolonisierung des Flussrandes durch Pflanzen, Sträucher und terrestrische Fauna in verminderten Fließgewässern und einer Zunahme von Wasserlebensräumen in Fließgewässern. Die wirksamste Maßnahme ist die Gewährleistung eines ökologischen Mindestabflusses stromabwärts von einer Umleitung, um den Lebensraum eines Flusses und die bestehende Landnutzungen stromabwärts (Fischerei, Schifffahrt, städtische und industrielle Wasserversorgung usw.) zu erhalten. Die Strömung der meisten natürlichen Flüsse variiert von Saison zu Saison erheblich und einige Flüsse versiegen teilweise während des Jahres. Das Ökosystem jedes Flusses hat sich im Laufe der Zeit an das Strömungsmuster des Flusses angepasst. Die Gestaltung einer ökologischen Strömung in einem abgeleiteten Fluss kann auf den Lebensräumen der am meisten geschätzten aquatischen Arten im Fluss basieren, um beispielsweise die Verluste von Laichgründen zu minimieren. In einem Fluss mit

reduzierter Strömung können kleine Wehre gebaut werden, um einen Wasserstand zu gewährleisten, der den Vorableitungsbedingungen ähnlich ist.

## Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke (siehe Bild 9.3) pumpen Wasser außerhalb der Hauptverkehrszeiten in einen oberen Speicher, indem sie überschüssigen Strom aus Grundlastkraftwerken nutzen. Sie kehren den Strom zurück, um während der täglichen Spitzenlastperiode Elektrizität zu erzeugen. Sie gelten als eine der effizientesten verfügbaren Technologien zur Energiespeicherung. Das Konzept, Wasser außerhalb der Stoßzeiten zurück in das Oberbecken zu pumpen, bedeutet, dass diese Anlagen Nettoenergieverbraucher sind: Es braucht mehr Energie, um Wasser bis zum oberen Reservoir zu pumpen, als es von der Anlage produziert wird, wenn das Wasser zum unteren Reservoir hinabfließt. Im Allgemeinen werden während der Erzeugungsphase 65% bis 75% der für das Pumpen erforderlichen Elektrizität zurückgewonnen.

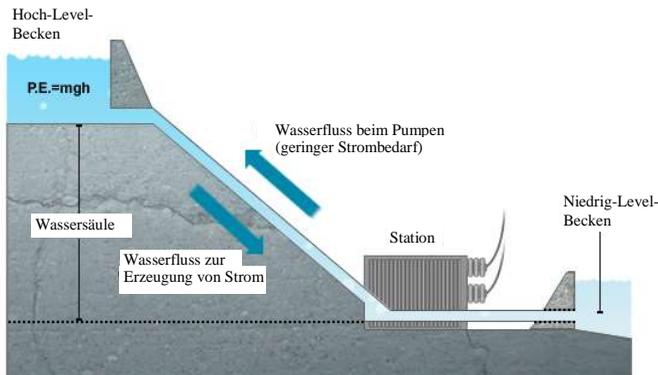


Abbildung 9.3 Pumpspeicher-Wasserkraftanlage

(<http://energystoragesense.com/pumped-hydroelectric-storage-phs/>)

Die Entwicklung von Pumpspeicherkraftwerken ist kostengünstiger, als andere Anlagen im Netz, die hauptsächlich Basisenergie mit geringer Flexibilität erzeugen, wie Kohlekraftwerke und / oder Kernkraftwerke. In solchen Fällen können die Spitzenkosten doppelt so hoch oder höher sein als die Kosten für Schwachstrom. Ein kleiner oberer Pool, der sich in kurzen Abständen ein- oder zweimal pro Woche sehr schnell entleert, charakterisiert Pumpspeicherwerke. Der Abfluss im oberen Reservoir ist daher sehr signifikant. Diese Pools sind oft künstlich angelegt und entwickeln sich nicht zu einer stabilen Wasserumgebung. Pumpspeicherkraftwerke können manchmal einen Fluss, einen See oder ein bestehendes Reservoir als unteres Reservoir nutzen oder zusätzliche Pools schaffen. Die mit Pumpspeicherkraftwerken verbundenen Umweltprobleme beziehen sich meist auf die Standortwahl des oberen Beckens, den Kraftwerksstandort (unterirdisch oder oberirdisch) und die Beschaffenheit des Ökosystems des unteren Reservoirs. Diese Probleme sind im Wesentlichen standortspezifisch und können während der Entwurfsphase des Projekts angegangen werden.

### **Klein-, Mini und Mikrowasserkraftanlagen**

Die Definitionen von Klein-, Mini- und Mikrowasserkraftanlagen sind relativ und variieren je nach den Umständen jedes Landes. Daher gibt es keine Definitionen, die auf der ganzen Welt allgemein akzeptiert sind. Im Vergleich zu Großprojekten profitieren Kleinanlagen von einer einfachen Einführung, da die Planungs- und Bauzeit kürzer, die Investitionen geringer sind und nur kleine Flächen erworben werden müssen. Kleinwasserkraft wird oft für Anwendungen mit dezentraler Erzeugung als Alternative zu oder in Kombination mit Dieselgeneratoren oder anderen Kleinkraftwerken für ländliche Anwendungen verwendet.

Die Umweltauswirkungen sind in etwa proportional zur überschwemmten Fläche. Es gibt auch Vorteile im Zusammenhang mit reduzierten Sicherheitsrisiken im Zusammenhang mit

kleinen Staudämmen und geringerer Bevölkerungszahl. Aus ökologischer Sicht ist die Unterscheidung zwischen erneuerbaren kleinen Staudämmen und nicht erneuerbaren großen Staudämmen etwas willkürlich. Es ist nicht die Größe, die definiert, ob ein Projekt erneuerbar und nachhaltig ist oder nicht, sondern die spezifischen Merkmale des Projekts und seines Standorts. Die Frage, die sich erhebt, lautet: Was ist weniger schädlich für die Umwelt? Ein sehr großes Kraftwerk an einem Fluss mit einer installierten Kapazität von 1000 MW oder 200 kleine Wasserkraftwerke mit 5 MW auf 100 Flüssen? Könnte die Gesamtauswirkung eines einzelnen 1000-MW-Projekts geringer sein als die kumulative Auswirkung von 200 kleinen Wasserkraftprojekten von 5 MW aufgrund der Anzahl der betroffenen Flüsse und Nebenflüsse? Obwohl es offensichtlich ist, dass ein kleinerer menschlicher Eingriff in einen bestimmten Lebensraum weniger Auswirkungen hat als ein sehr großer Eingriff in denselben Lebensraum, sollte man Wasserkraftprojekte auf der Grundlage der erzeugten Energie vergleichen. Unter diesem Gesichtspunkt könnten die kumulativen Auswirkungen einer Vielzahl von Kleinwasserkraftprojekten größer sein als die eines einzelnen Projekts angesichts der Vielfalt der betroffenen Ökosysteme und der viel größeren kumulativen Fläche, die bei kleineren Projekten für ein gleichwertiges Speichervolumen überschwemmt werden muss.

Die größten **Vorteile** der Wasserkraftproduktion (Okot, 2013):

Wirtschaftliche Aspekte

- Es hat geringe Betriebs- und Wartungskosten
- Es hat eine langlebige und robuste Technologie: Systeme können ohne größere Neuinvestitionen 50 Jahre oder länger halten
- Es ist eine zuverlässige Energiequelle
- Es fördert die regionale Entwicklung, schafft Beschäftigungsmöglichkeiten

- Es nutzt die bewährte, bekannte Technologie mit höchster Effizienz

#### Soziale Aspekte

- Verbessert den Lebensstandard
- Lässt Wasser für andere Zwecke übrig
- bietet meistens Hochwasserschutz
- Kann die Navigationsbedingungen verbessern
- Verbessert die Zugänglichkeit des Territoriums und seiner Ressourcen

#### Umweltaspekte:

- produziert keine Luftschadstoffe und nur sehr wenige Treibhausgasemissionen
- Es wird kein Abfall produziert
- Vermeidet die Erschöpfung nicht erneuerbarer Brennstoffressourcen
- Verlangsamt den Klimawandel

#### Die größten Nachteile:

#### Wirtschaftliche Aspekte

- Hohe Kapitalkosten
- Erfordert multidisziplinäre Beteiligung
- Langfristige Planung und langfristige Vereinbarung sind erforderlich

#### Sozialer Aspekt:

- Kann zur Neuansiedlung führen
- Das Dammieren großer Flächen reduziert den Zugang der Öffentlichkeit. Es beeinflusst Freizeitaktivitäten im Freien
- Die Stromleitungen können die Landschaft ändern
- Management der Wassernutzung ist erforderlich

#### Umweltaspekt

- Barrieren für Fischwanderung und -mitnahme

- Beinhaltet Veränderung von aquatischen Lebensräumen
- Erfordert Management der Wasserqualität
- Die Populationen müssen möglicherweise überwacht werden
- Staudammgebiete, die reich an artenreicher Flora sind, verursachen Kohlenstoffemissionen

**Abbildung 9.4.** zeigt Komponenten eines vereinfachten Wasserkraftsystems (Okot, 2013). Das grundlegende Wasserkraftprinzip beruht auf der Umwandlung eines großen Teils des Bruttokopfes  $H_g$  (m) in mechanische und elektrische Energie. Hydro-Turbinen wandeln den Wasserdruck in mechanische Energie um, die dann zum Antrieb eines Generators oder einer anderen Maschine genutzt werden kann. Die produzierte Leistung ist proportional

Der Wasserdruck wird durch Hydroturbinen in mechanische Wellenleistung umgewandelt. Die mechanische Wellenleistung kann verwendet werden, um einen elektrischen Generator oder andere Maschinen anzutreiben. Die verfügbare Leistung ist direkt proportional zum Produkt aus Druckhöhe und Volumenstrom. In der Regel hält die hydraulische Leistung  $P_0$  (kW) und die entsprechende Energie  $E_0$  (kWh) über einen Zeitintervall.

$\Delta t$ (h) are

$$P_0 = \rho g Q H$$

$$E_0 = \rho g Q H \Delta t$$

Wo  $\rho$  die Dichte von Wasser ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) und  $g$  die Schwerkraft ( $\text{m} / \text{s}^2$ ) ist. Die endgültige Leistung  $P$ , die an das Netzwerk geliefert wird, ist gegeben durch  $P = \eta P_0$ , wobei  $\eta$  der hydraulische Wirkungsgrad des Turbogenerators ist. Hydro ist immer noch der effizienteste Weg, Elektrizität zu erzeugen. Moderne Wasserturbinen sind in der Lage, bis zu 90% der verfügbaren Energie in Elektrizität umzuwandeln, obwohl dies mit der

Größe abnimmt. Mikrowasserkraftanlagen haben eine Effizienz von 60-80%.

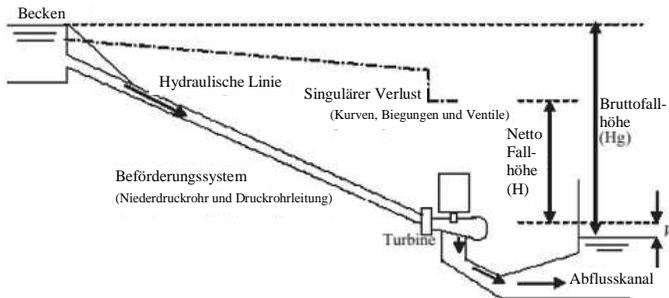


Abbildung 9.4 Komponenten eines Wasserkraftwerks

(Okot, 2013)

## Wasserturbinen

Derzeit sind verschiedene Konstruktionen von Wasserturbinen im Einsatz, wobei jede ihre eigenen Vor- und Nachteile und einen optimalen Betriebsbereich aufweist. Wenn man bedenkt, dass die Turbinenleistung von der Kombination von Förderhöhe, Wassermenge und Wasserdruck auf den Schaufeln abhängt, ist es notwendig, den für die ausgewählte Anlage am besten geeigneten Turbinentyp auszuwählen. Die am meisten verwendeten Turbinen können unterteilt werden in:

**Reaktionsturbine** - Die Schaufeln sind in einem unter Druck stehenden Gehäuse eingeschlossen und vollständig in Wasser eingetaucht. Die Druckdifferenz über ausreichend profilierte Blätter bewirkt, dass sich die Blätter schnell drehen.

**Impulsturbine** - Der Wasserfluss trifft von einem oder mehreren Wasserstrahlen (Düsen) auf die Turbinenschaufeln. Die mechanische Leistungsabgabe einer Impulsturbine ergibt sich aus der kinetischen Energie des Wasserflusses.

Neben der Art des Betriebs können Turbinen nach der Konstruktion, Struktur und Anordnung der Schaufeln kategorisiert werden. Pelton-, Turgo- oder Kaplan-Turbinen sind nach ihren

Erfindern benannt. Der Unterschied zwischen höherer und niedrigerer Wasserhöhe (wo die potentielle Energie gespeichert wird) ist der Kopf des Systems. Im Allgemeinen bedeutet bei Wasserkraft- und Wasserkraftanlagen ein niedriger Kopf einen vertikalen Abstand von weniger als 30 m, ein mittlerer Kopf einen vertikalen Abstand zwischen 30 und 150 m, während ein hoher Kopf einen vertikalen Abstand von mehr als 150m bedeutet.

Die Pelton Wasser Turbine (Pelton Wheel), benannt nach ihrem Erfinder Lester Pelton, ist die am häufigsten verwendete offene Turbinenradkonstruktion (siehe Abbildung 9.5). Es ist eine Impulsturbine, die am besten für hohen Kopf und niedrigen Wasserdurchfluss geeignet ist. Entlang des Umfanges des Rades befinden sich kleine gebogene Becher (Eimer). Ein Hochgeschwindigkeitswasserstrahl, der durch die Düsen eingespritzt wird, trifft auf diese Becher und induziert eine Impulskraft, die die Turbine zum Rotieren bringt. Die wichtigste Komponente des Pelton-Rades ist die Schaufel, die in zwei Hälften geteilt ist, wobei jede Hälfte gedreht und zurückgebogen wird. Die spezielle Form lässt den Jet fast 180 Grad drehen.

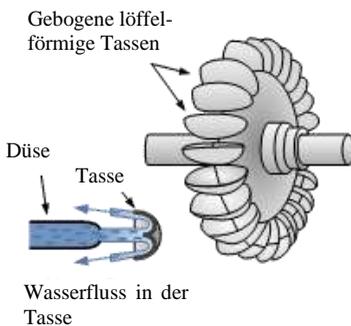


Abbildung 9.5 Pelton Turbine

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>)



Abbildung 9.6 Turgo Turbine

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

Die potentielle Energie, die durch den Wasserstrahl erzeugt wird, wird durch diese Düsen in kinetische Energie umgewandelt und nahezu die gesamte Energie des sich bewegenden Wassers fließt in den Antrieb der Becher. Die Wasserstrahlen aus den Düsen drücken gegen die Becher der Turbine, wodurch sich das Rad dreht und somit Drehmoment und Leistung erzeugt werden. Die Pelton-Turbine gewinnt mechanische Energie, rein aufgrund der Änderung der kinetischen Energie des Strahls. Abhängig von dem verfügbaren Wasserkopf und der Anzahl der Düsen, die tangential um das Rad angeordnet sind, können die Geschwindigkeit und die Richtung der von diesen Düsen kommenden Wasserstrahlen gesteuert werden, um eine konstante langsamere Geschwindigkeit zu ermöglichen, die ideal für die Erzeugung elektrischer Energie ist. Die Geschwindigkeit einer Pelton-Turbine kann durch Einstellen des Wasserflusses zu den Bechern oder Eimern durch die Düsen gesteuert werden.

Die Turgo-Wasserturbine ist eine weitere Impuls-Wasserturbine, bei der ein Hochgeschwindigkeits-Wasserstrahl auf die Turbinenschaufeln auftrifft (siehe Abbildung 9.6). Der Unterschied zum Pelton-Rad besteht darin, dass der Strahl in einem Winkel von ca.  $20^\circ$  auf die Schaufel trifft. Die gekrümmten Schaufeln fangen das Wasser auf und lassen die Turbinenwelle rotieren. Aufgrund der höheren Durchflussrate kann eine Turgo-Turbine ein Rad mit einem viel kleineren Durchmesser als ein äquivalenter Pelton für die gleiche Menge an Ausgangsleistung haben, was ihnen erlaubt, mit höheren Geschwindigkeiten zu rotieren. Das Turgo-Rad ist jedoch weniger effizient als das Pelton-Rad.

Die Francis Water Turbine, benannt nach ihrem Erfinder James Francis, ist eine Radialströmungs-Reaktionsart von Wasserturbinen, bei der das gesamte Turbinenrad in Wasser eingetaucht und von einem Gehäuse umgeben ist (siehe Abbildung 9.7). Das Wasser tritt unter Druck in das Gehäuse ein und wird durch einen Satz von festen oder einstellbaren Schlitzen geführt, die als Leitschaufeln um das Gehäuse herum angeordnet sind und den

Wasserfluss zu den Turbinenschaufeln im richtigen Winkel lenken. Das Wasser tritt radial in die Turbinenschaufeln ein und tritt axial aus, wodurch es sich dreht.

Eine Francis-Turbine ist eine Unterwasserturbine, deren Konstruktion einer Propellerturbine ähnlich ist, die Wasserdruck und kinetische Energie verwendet, um die Schaufeln zu drehen. Die Energie aus der Wasserströmung wird in Form von Drehmoment und Rotation auf die Abtriebswelle der Turbine übertragen. Diese Turbine eignet sich für Anwendungen mit niedrigem bis mittlerem Kopf, erfordert jedoch eine relativ große Wassermenge.

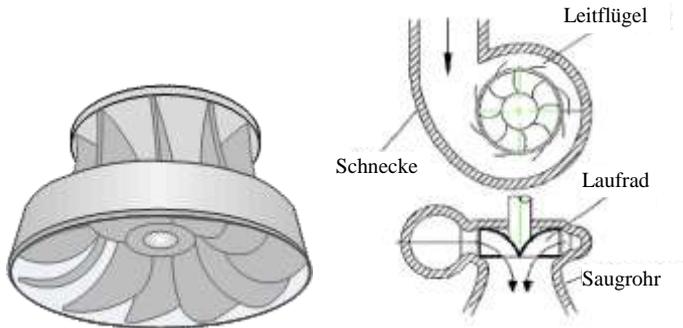
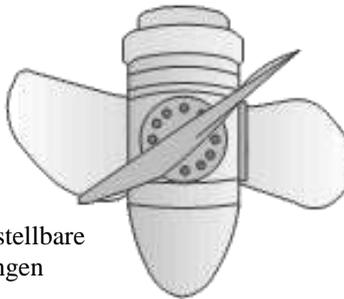


Abbildung 9.7 Francis Turbine

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>), (Okot, 2013)

Die Kaplan-Wasserturbine, benannt nach ihrem österreichischen Erfinder Victor Kaplan, ist eine Wasserturbine mit axialer Strömungsreaktion, die einem Schiffspropeller sehr ähnlich sieht (siehe Abbildung 9.8). Es wird auch als Propeller Turbine bezeichnet. Der Propeller-förmige Rotor des Kaplans hat zwei oder mehr feste oder justierbare Blätter. Der Betrieb einer Kaplan-turbine ist umgekehrt zu dem eines Schiffspropellers. Das Wasser tritt in den Turbinendurchgang in einer radialen Richtung über die Einlassschaufeln ein. Der Winkel und die Position dieser Flügel bewirkt, dass das Wasser wirbelt, wodurch ein

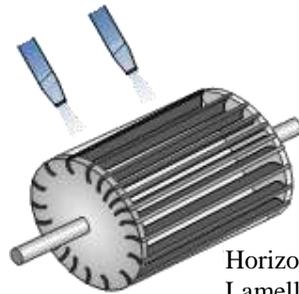
Wirbel in dem umschlossenen Kanal erzeugt wird, der eine Kraft auf die winkelförmigen Propellerflügel ausübt. Wenn die verdrehten Propeller Rotorblätter innerhalb dieses Kanals an einer zentralen Welle befestigt sind, überträgt die Kraft des wirbelnden Wassers, das gegen die Rotorblätter drückt, Energie auf die Rotorblätter. Dadurch wird eine Rotation und Drehung erzeugt. Einer der Hauptvorteile der Kaplan turbine besteht darin, dass sie in Anwendungen mit sehr niedrigen Fallhöhen eingesetzt werden kann, vorausgesetzt, dass die Wasserdurchflussmenge durch die Turbine ausreichend groß ist, ohne dass Dämme und Wehre eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Umwelt haben.



Einstellbare  
Klingen

Abbildung 9.8 Kaplan Turbine

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>)



Horizontale  
Lamellen

Abbildung 9.9 Querstrom-Turbine

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

Die Querstrom-Wasserturbine (Michell-Banki-Turbine) ist eine Wasserturbine vom Impulstyp, die einen trommelartigen Rotor aufweist und eine längliche Düse mit rechteckigem Querschnitt verwendet, die gegen gekrümmte Flügel (Lamellen) auf einem zylindrisch geformten Läufer gerichtet ist (vgl. Abbildung 9.9). Querstrom-Turbinen sind weniger effizient als die heutigen Turbinen (d. H. Pelton, Turgo, Francis und Kaplan), aber sie können größere Wasserströmungen und niedrigere Köpfe aufnehmen. Das Wasser wird diesen Lamellen durch eine einzelne

oder doppelt vertikale rechteckige Düse zugeführt, um einen Wasserstrahl entlang der gesamten Länge des Läufers zu treiben. Diese Düsen leiten das Wasser zu den Läufern und wandeln die potentielle Energie des Wassers in kinetische Energie um. Nach dem Schlagen der ersten Klinge fällt das Wasser durch die Trommel und verlässt die Turbine auf der gegenüberliegenden Seite. Dann nutzt die Querstrom-Turbine die Energie des Wassers zweimal, einmal von oben und einmal von unten, um das Turbinenrad um seine zentrale Achse zu drehen, was für zusätzlichen Wirkungsgrad sorgt. Der Hauptvorteil der Querstrom-Turbine besteht darin, dass sie ihren Wirkungsgrad unter variierender Last- und Wasserströmungsbedingungen beibehält. Aufgrund ihrer relativ einfachen Konstruktion, der guten Regulierung und der Tatsache, dass sie mit einem sehr niedrigen Wasserstand arbeiten können, sind Querstrom-Wasserturbinen ideal für den Einsatz in Mini- und Mikro-Wasserkraftanlagen. Die Auswahl des besten Wasserturbinendesigns für die spezifische Situation hängt oft von der Menge an Förderhöhe und Durchflussrate ab, die an Ihrem bestimmten Standort verfügbar ist und ob es sich an der Seite eines Flusses oder Baches befindet oder das Wasser direct kanalisiert an den Standort geleitet werden soll.

Abbildung 9.10 gibt eine Grundvorstellung, welche Wasserturbinen am besten für die verfügbare Kopfhöhe und den Wasserdruck am jeweiligen Standort geeignet ist.

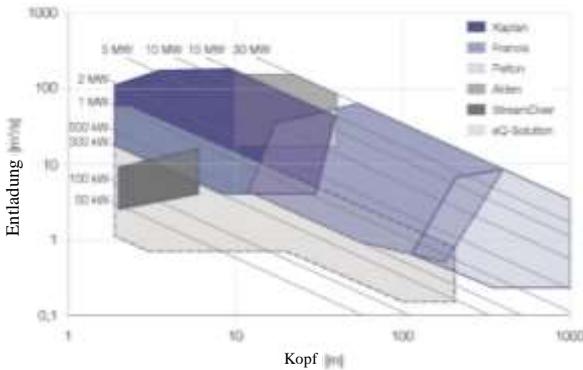


Abbildung 9.10 Arten von Kleinwasserkraft nach Kopfhöhe, Abfluss oder Kapazität

(Voith, 2013)

## 9.2 Umweltauswirkungen

Große Wasserkraftprojekte stellten sich als kontrovers heraus, da sie die Wasserverfügbarkeit in großen geografischen Regionen erheblich beeinträchtigen könnten; natürliche Ökosysteme stören; zwingen die Umsiedlung von Bevölkerungsgruppen gegen ihren Willen, erfordern eine große Stromübertragungsinfrastruktur. Dies sind die Hauptgründe für einige Ökologen und Umweltaktivisten, die behaupten, dass die Großwasserkraftwerke nicht so begehrenswert sind, um Strom zu erzeugen, und nicht so "grün", wie es auf den ersten Blick aussieht. Es ist offensichtlich, dass die Wasserkraft neben der erzeugten Elektrizität, wie Bewässerung, Wasserversorgung, Lebensmittelkontrolle und Erholung, zahlreiche wirtschaftliche und soziale Vorteile mit sich bringt. Obwohl die Wasserkraftentwicklung traditionell als grüne Energieressource angesehen wurde, wurde in veröffentlichten Berichten zwischen "Kleinwasserkraft" als erneuerbar und nachhaltig unterschieden, während "Großwasserkraft" dies nicht ist (Pang, Zhang, Ulgiati & Wang, 2015). Seit Mitte der 70er Jahre wurden Störungen des Sedimenttransports, der Fischwanderung, der Abflüsse und Flussmündungen in

verschiedenen Projekten sorgfältig beobachtet. Es gibt zahlreiche Hinweise darauf, dass die gebauten Staudämme den Wasserfluss des Flusses verändert haben, was sich auf die Wassertemperatur, das Überschwemmungsausmaß und die Nahrungsaufnahme auswirkte, was Konsequenzen für die Fütterung und die Aufzucht von Lebensräumen entlang des Flusses mit sich brachte. Einige Anti-Damm-Organisationen behaupten, dass die THG-Emissionen ähnlich sind wie die thermischen Anlagen mit gleicher Leistung. Außerdem gibt es unvermeidliche sozio-ökonomische Auswirkungen, die unerwünschte Bewegung von Menschen aus dem Gebiet, die umfassende Zerstörung von Agrar- und Waldflächen, Schäden an historischen und mineralischen Ressourcen und den Verlust von archäologischen, landschaftlichen und touristischen Standorten beinhaltet. Die Abwägung der Vorteile gegenüber den Nachteilen ist eine schwierige Aufgabe für die Entscheidungsträger. Die mit der Wasserkraftnutzung verbundenen Umweltauswirkungen können in vier wichtigen Kategorien zusammengefasst werden: Fauna, Flora, Landschaft und historische Überreste. Die Flora wird am häufigsten in kürzlich veröffentlichten Studien erwähnt, aufgrund der offensichtlichen direkten Schäden, die durch die Auswirkungen des Baus von Staudämmen auf die Flora verursacht wurden, wie landwirtschaftliche Verluste, Verluste in der Forstwirtschaft, Erosion und Vegetation. Art und Ausmaß der Auswirkungen hängen stark von standortspezifischen Merkmalen sowie von der Art und der Größe der Wasserkraftwerke ab (Botelho, Ferreira, Lima, Pinto, Sousa, 2017). Dies bedeutet, dass die Auswirkungen auf die lokalen Gemeinschaften von Fall zu Fall beurteilt werden müssen. Da die Großwasserkraft nicht mehr als saubere erneuerbare Energiequelle akzeptiert wird, kann die Kleinwasserkraft, deren Beliebtheit seit den 1960er Jahren zurückgegangen ist, eine mögliche Lösung für erhöhte Umweltprobleme darstellen und ein sauberer Ersatz für große Wasserkraftwerke werden. Kleinwasserkraftwerke beeinflussen jedoch auch Flussökosysteme in gewissem Maße. Diese Veränderungen des lokalen Ökosystems betreffen

hauptsächlich zwei Aspekte: Störungen der ursprünglichen Landschaft und stromabwärts liegende Degradation der Ökosysteme durch stauendes und ableitendes Wasser, was zu einer periodischen Austrocknung des Flusses führen kann. Obwohl Wasserkraft das Wasser nicht verbraucht oder verschmutzt, unterbricht es den natürlichen Fluss. Da der Wasserfluss der Hauptfaktor für die ökologischen Prozesse des Flusses ist, beeinflussen diese Veränderungen dramatisch die Gesundheit der Flussökosysteme.

Die Wasserspeicherung und die periodische Austrocknung, die durch den Damm verursacht wird, provoziert den Abbau der nachgelagerten Ökosystemleistungen. Wenn es möglich ist, dies zu vermeiden, ist der Einfluss der Umwelt relativ gering. Das Problem könnte sich verschärfen, wenn die Kleinkraftwerke in einigen Ländern ohne planmäßige Planung installiert werden. Dies kann sowohl den instabilen Betrieb als auch ein signifikanteres Austrocknen verursachen. Der Bau von Kleinwasserkraftwerken an ausgewählten Standorten darf den Fluss nicht beeinträchtigen. Die umfassende Anwendung dieser Technologie an allen möglichen Standorten an Flüssen und Wasserfällen wird jedoch die Umweltbelastung dramatisch erhöhen. Eine zu intensive Nutzung der Kleinwasserkraft kann die umweltschädliche Geschichte großer Wasserkraftprojekte wiederholen. Deutliche Fortschritte in der Wasserkrafttechnologie versprechen weitere positive Entwicklungen. Neue, weniger aufdringliche Turbinen mit geringer Förderhöhe werden jetzt für kleinere Lagerstätten entwickelt, was die Investitionskosten erhöhen kann (Pang et al., 2015). Die Umsetzung der notwendigen Fortschritte ist jedoch oft langsam und die Investitionen in FuE unzureichend. Dies ist teilweise auf die falsche Wahrnehmung zurückzuführen, dass Wasserkraft eine ausgereifte Technologie ist und nur wenige Verbesserungsperspektiven bietet.

## Referenzen

Egré, Dominique, & Milewski, Joseph C. (2002). The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, 30(14), 1225-1230.

Okot, David Kilama. (2013). Review of small hydropower technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 515-520.

Pang, Mingyue, Zhang, Lixiao, Ulgiati, Sergio, & Wang, Changbo. (2015). Ecological impacts of small hydropower in China: Insights from an emergy analysis of a case plant. *Energy policy*, 76, 112-122.

Voith (2013), "Small hydro", Voith, Germany, [http://voith.com/en/Broschuere\\_SH\\_final\\_screen.pdf](http://voith.com/en/Broschuere_SH_final_screen.pdf).

## 10 Bioenergie

**Autor:** László MAGYAR

Energiaklub Klimapolitik Institut und Angewandte Kommunikation, Ungarn

E-mail: [magyar@energiaklub.hu](mailto:magyar@energiaklub.hu)

**Kurzfassung:** Biomasse als Energiequelle ist eine Alternative zu fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdöl und Erdgas). In den letzten Jahren ist das Interesse an Biomasse-Energie wieder gestiegen, da Biomasse im Gegensatz zu Kohlenstoff emittierenden fossilen Brennstoffen als CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequelle wahrgenommen wird. Bioenergie ist auch eine vielseitige Energiequelle, da sie in feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe umgewandelt werden kann. Bioenergie kann zur Beheizung von Wohnungen, zur Elektrifizierung von Gemeinschaften und zur Förderung des Verkehrs genutzt werden. In diesem Kapitel werden verschiedene Quellen der Biomasse, technische Hintergründe der Bioenergieproduktion und Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit den Prozessen detailliert diskutiert.

### **Lernziele:**

Die Leser werden über verschiedene Biomasse-Energiequellen informiert und lernen zwischen verschiedenen Biomasse-Energietechnologien zu unterscheiden

Die Leser werden in der Lage sein, die Umweltauswirkungen des Energieverbrauchs von Biomasse zu bewerten

### **10.1 Biomasse-Energie**

Biomasse ist der Oberbegriff, der Phytomasse oder Pflanzenbiomasse und Zoomasse oder Tierbiomasse. Biomasse enthält gespeicherte Energie von der Sonne. Pflanzen absorbieren die Energie der Sonne durch Photosynthese und wandeln sie in chemische Energie um (siehe Abb. 10.1) (Abbasi et al., 2010).

## Photosynthese



Bei der Photosynthese wandeln Pflanzen Strahlungsenergie aus der Sonne in chemische Energie in Form von Glukose - oder Zucker um.

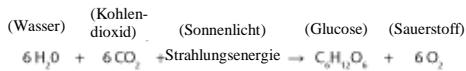


Abbildung 10.1 Der Prozess der Fotosynthese

(US National Energy Education Project)

Die gesamte auftreffende Solarenergie, die die Oberfläche erreicht, beträgt 173.000 TW (Terawatt), was 17.000-mal so hoch ist, zu dem was der Mensch heute an fossilen Brennstoffen verbraucht (Goldemberg J, Johansson TB, 2004). Die von der Photosynthese aufgenommene Energie beträgt etwa 140 TW, was ein sehr kleiner Prozentsatz der gesamten Sonnenenergie ist, die unseren Planeten erreicht. Dennoch ist das gesamte Volumen an Biomasse, das erzeugt wird, immer noch sehr groß, es ist das Zehnfache unseres derzeitigen Energiebedarfs. Rund 100 Milliarden Tonnen Kohlenstoff werden jährlich in Biomasse umgewandelt (Abbasi et al., 2010).

Biomasse als Energiequelle ist eine Alternative zu fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdöl und Erdgas). Die Verbrennung von fossilen Brennstoffen oder Biomasse setzt Kohlendioxid frei. Die Pflanzen, die die Biomasse liefern, fangen jedoch während der Wachstumsphase durch Photosynthese eine nahezu äquivalente Menge CO<sub>2</sub> ein. In den letzten Jahren ist das Interesse an Biomasse wieder gestiegen, da Biomasse als CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequelle wahrgenommen wird, im Gegensatz zu

kohlenstoffausstoßenden fossilen Brennstoffen, die zu globaler Erwärmung und Ozeanversauerung geführt haben (US National Energy Education Project).

Wenn Biomasse verbrannt wird, wird die chemische Energie in Biomasse als Wärme freigesetzt. Bioenergie ist eine vielseitige Energiequelle. Im Gegensatz zu anderen Energiequellen kann Biomasse in feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe umgewandelt werden. Darüber hinaus kann Bioenergie zur Beheizung von Wohnungen, zur Elektrifizierung von Gemeinschaften und zur Förderung des Verkehrs genutzt werden (World Energy Council, 2016).

## **10.2 Verbrauch von Biomasseenergie**

### **10.2.1 Globaler Verbrauch**

Weltweit entfielen im Jahr 2012 14% des weltweiten Energieverbrauchs auf Bioenergie (einschließlich Abfall), wobei etwa 2,6 Milliarden Menschen auf traditionelle Biomasse für den Energiebedarf angewiesen sind (siehe Abbildung 10.2) (World Bioenergy Association, 2014).

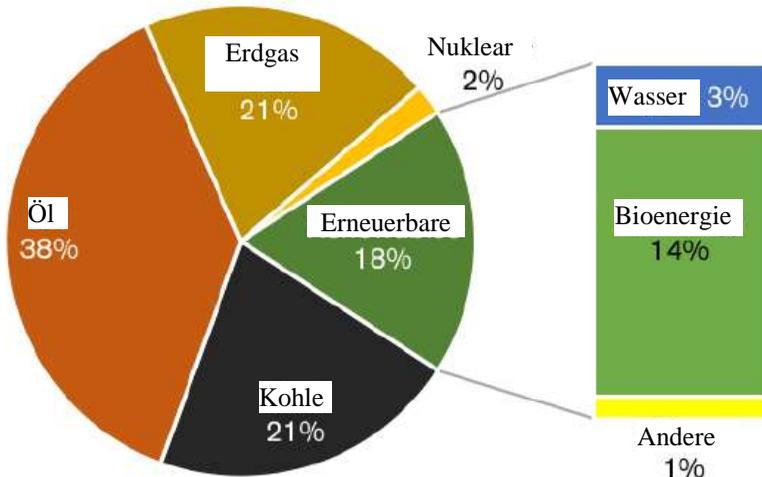


Abbildung 10.2 Globaler Endenergieverbrauch 2013  
(World Bioenergy Association, 2014)

Die USA und Brasilien sind weltweit führend in der Produktion und dem Verbrauch von flüssigen Biokraftstoffen für den Transport (fast 80% der Produktion). Im Transportsektor hat die Produktion von Maisethanol in den USA und Zuckerrohr ethanol in Brasilien deutlich zugenommen (World Energy Council, 2016).

Die Verwendung von Biomasse für Strom ist in Europa und Nordamerika bekannt – sie wird überwiegend aus forstwirtschaftlichen Produkten und Reststoffen hergestellt. Die Kontinente Europa und Amerika verbrauchen mehr als 70% der Biomasse die zur Elektrizitätsgewinnung benötigt wird. In den letzten Jahren hat Biomasse in Entwicklungsländern in Asien und Afrika, wo ein erheblicher Teil der Bevölkerung keinen Zugang zu Elektrizität hat, eine zunehmende Verbreitung gefunden. (Weltenergieat, 2016).

Derzeit wird Biomasse hauptsächlich in ländlichen Regionen und Entwicklungsländern in Form von Wärme genutzt. Etwa 90% des gesamten Bioenergieverbrauchs wird traditionell genutzt. Es beinhaltet die Verwendung von Brennholz, Holzkohle, landwirtschaftlichen Rückständen usw. zum Kochen und Heizen. Dies wird sich bald ändern, da eine rasche Urbanisierung, eine ineffiziente Nutzung von Biomasse, Entwaldung, Klimaziele und steigende Energienachfrage zu einer besseren Umwandlungseffizienz und modernen Bioenergiequelle wie Biogas, Pellets, flüssige Biokraftstoffe usw. führen werden (World Energy Council, 2016).

### **10.2.2 Verbrauch in der Europäischen Union**

In der EU wurde 2015 ein neuer Konsumrekord von 93,8 Mio. t RÖE verzeichnet (Eurobserv'er, 2016). Der Anstieg der Produktion und des Verbrauchs von fester Biomasse war in den letzten zwei Jahrzehnten konstant (siehe Abbildung 10.3).

Der gesamte Biokraftstoffverbrauch im EU-Verkehr belief sich 2016 auf 14,4 Mio. t RÖE. Der Biodieselanteil am gesamten Biokraftstoffverbrauch im EU-Verkehr lag 2016 bei 80,6%. Ziel ist es, die negativen Umweltauswirkungen von Treibhausgasemissionen zu reduzieren, die bei der Herstellung von Biokraftstoffen durch indirekte Landnutzungsänderungen entstehen. Kraftstofflieferanten müssen außerdem die Treibhausgasintensität ihres Kraftstoffs bis 2020 um 6% senken (Eurobserv'er, 2017).

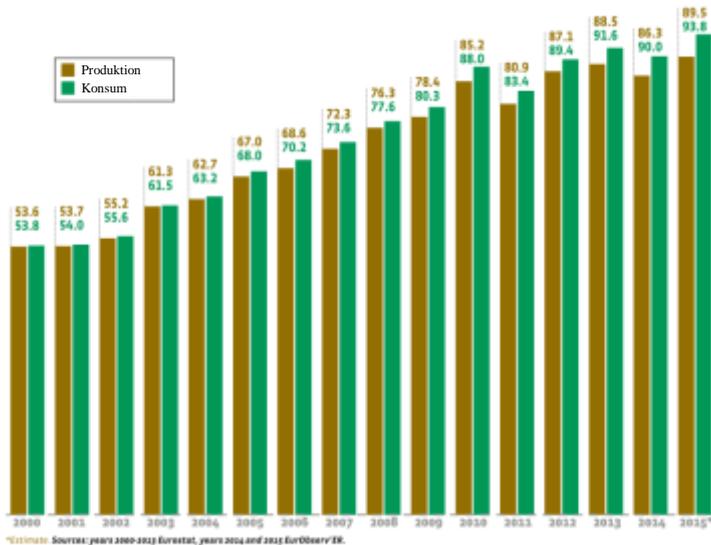


Abbildung 10.3 Entwicklung der Primärenergieproduktion von festen Biomasse und des Inlandsverbrauchs in der EU seit 2000 (in Mio. t RÖE)

(Euroserv'er: Festbiomassenbarometer 2016)

## 10.3 Biomassequellen für die Energieerzeugung

### 10.3.1 Nahrungspflanzen

Nahrungsmittel wie Zuckerrohr, Mais, Soja, Weizen, Zuckerrüben und Pflanzenöle werden für die Herstellung von Biokraftstoffen verwendet: Ethanol, Biodiesel und Benzin / Diesel-Additive (Abb. 10.4) (Abbasi et al., 2010).

Nahrungsmittel-Energie- Programme werden immer genauer geprüft, weil sie mit der Verwendung dieser Feldfrüchte als Nahrungsmittel konkurrieren, was die Nahrungsmittelpreise in die Höhe treibt und die Existenz von lebenden Menschen bedroht. Sie degradieren auch Land- und Wasserteile (Abbasi et al., 2010).

### **10.3.2 Kohlenwasserstoffreiche Pflanzen**

Eine große Anzahl von Pflanzen enthält Kohlenwasserstoffe in Konzentrationen, die signifikant genug sind, um eine potentielle Quelle für einen dieselähnlichen Brennstoff zu werden. Auch wenn von einigen dieser Pflanzen große Hoffnung ausgeht, sind die negativen Auswirkungen ihrer großflächigen Nutzung ähnlich denen von Nahrungspflanzen (Abbasi et al., 2010).

### **10.3.3 Abfall**

Zu den Abfällen gehören landwirtschaftliche Rückstände (Stroh, Gemüse- / Fruchtschalen und Pflanzenabfälle), forstwirtschaftliche Abfälle, Lebensmittelabfälle und Biomassebestandteile von Siedlungsabfällen. Aus diesen Abfällen kann erhebliche Energie gewonnen werden, da in ihnen weltweit mehrere Milliarden Tonnen Biomasse enthalten sind. Es ist jedoch eine große Herausforderung, die Energie auf saubere und kosteneffektive Weise zu extrahieren (Abbasi et al., 2010).

### **10.3.4 Unkraut und wildes Wachstum**

Invasive Pflanzen, die ihren Nutzen für den Menschen übersteigen, werden Unkraut genannt. Invasive Pflanzen verdrängen die meisten anderen Arten und wirken sich destabilisierend und degradierend auf die von ihnen besiedelten Gebiete aus. Wenn solche Pflanzen als Energiequelle genutzt werden können, wäre es wirtschaftlich möglich, sie regelmäßig zu ernten und zu verwenden, wodurch ihre Ausbreitung kontrolliert und der von ihnen verursachte Schaden verringert wird (Ganesh et al., 2009).

### **10.3.5 Schnell wachsende Gräser und Holzarten**

Sie beinhalten:

- Holzarten wie Weiden, Pappeln und andere Harthölzer

- Krautige Arten wie Rutenhirse, Big Blustem, Schilfrohrgras und Miscanthus

Von diesen hat Rutenhirse aufgrund seines hohen Biomasseertrages, seiner breiten geographischen Ausdehnung, seiner effizienten Nährstoffverwertung, seines geringen Erosionspotentials, seiner Kohlenstoffsequestrationsfähigkeit und der geringeren Anforderungen an fossilen Brennstoffeinsatz im Vergleich zu einjährigen Pflanzen besondere Beachtung gefunden (McLaughlin, Kszos, 2005). Bei der Auswahl von Arten für den Einsatz als Biokraftstoff muss die Eigenschaft berücksichtigt werden, die einige Arten für diese Nutzung ideal machen. Wie zum Beispiel C4-Photosynthese, lange Kronendauer, Mangel an Schädlingen und Krankheiten und schnelles Frühlingwachstum, sind ebenfalls mit Invasivität assoziiert (Raghu et al., 2006).

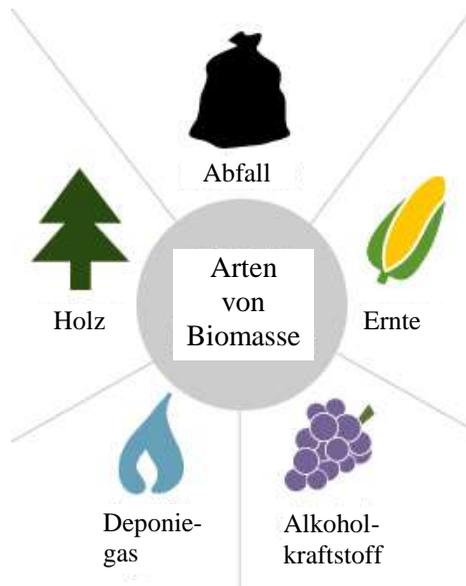


Abbildung 10.4 Biomassequellen zur Energiegewinnung  
(US National Energy Education Project)

## 10.4 Umwandlung von Biomasse in andere Energieformen

Brennen ist nur eine Möglichkeit, die Energie in Biomasse freizusetzen. Biomasse kann in andere nutzbare Energieformen wie Methangas oder Transportkraftstoffe wie Ethanol und Biodiesel umgewandelt werden.

Methangas ist ein Bestandteil von Deponiegas oder Biogas, das entsteht, wenn sich Müll, landwirtschaftliche Abfälle und menschliche Abfälle auf Deponien oder in speziellen Behältern, sogenannten Fermentern (EIA), zersetzen.

Kulturen wie Mais und Zuckerrohr werden fermentiert, um Kraftstoffethanol zur Verwendung in Fahrzeugen zu produzieren. Biodiesel, ein anderer Transporttreibstoff, wird aus Pflanzenölen und tierischen Fetten (EIA) hergestellt.

In Tabelle 10.1. sind die Biomassequellen und ihre Verwendung für die Energieerzeugung aufgeführt.

Tabelle 10.1 Beispiele für Biomasse und ihre Nutzung für Energie

[www.eia.gov](http://www.eia.gov)

Quelle für Biomasse	Sein Einsatz für die Energieerzeugung
Holz und Holzverarbeitungsabfälle	Gebrannt um Gebäude zu heizen, um Prozesswärme in der Industrie zu erzeugen und um Strom zu erzeugen
Nutzpflanzen und Abfallstoffe	Verbrannt als Brennstoff oder umgewandelt in flüssige Biokraftstoffe
Essen, Hof und Holzabfall im Müll	Verbrannt, um Strom in Kraftwerken zu erzeugen oder auf Deponien zu Biogas umzuwandeln
Tierdung und menschliche Abwässer	Umwandlung in Biogas, das als Brennstoff verbrannt werden kann

## **10.5 Technische Wege für die Erzeugung von verschiedenen Arten von Energie aus Biomasse**

### **10.5.1 Thermochemische Umwandlung von Biomasse**

Bei der thermochemischen Verarbeitung wird Biomasse durch thermische Zersetzung und chemische Reformierung in eine Reihe von Produkten umgewandelt. Es beinhaltet im Wesentlichen das Erhitzen von Biomasse in Gegenwart von unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen. Wenn Biomasse in völliger Abwesenheit von Sauerstoff erhitzt wird, erzeugt der Pyrolyseprozess verschiedene organische Flüssigkeiten, die manipuliert oder raffiniert werden können, um flüssige Brennstoffe herzustellen. Alternativ führt die Erwärmung mit geringen Sauerstoffkonzentrationen zur Vergasung und zur Produktion von Wasserstoff und organischen Gasen, die auch in flüssige Brennstoffe umgewandelt werden können (Abbasi et al., 2010).

Die Anfahr- und Anlageninstandhaltungskosten thermochemischer Prozesse sind aufgrund der Anforderungen der Hochtemperaturverarbeitung hoch. Um effizient arbeiten zu können, muss die thermochemische Verarbeitung in großem Umfang durchgeführt werden, was den Transport von Biomasse über große Entfernungen erfordert, was zu einer Erhöhung der Kosten führt. Auch thermochemische Prozesse verbrauchen beim Transport von Biomasse und deren Erwärmung eine Menge fossiler Brennstoffe (Abbasi et al., 2010).

### **10.5.2 Strom aus Biomassekraftwerken**

Die direkte Verbrennung von Biomasse zur Stromerzeugung ist eine ausgereifte, kommerziell verfügbare Technologie, die in einem weiten Bereich von wenigen MW bis zu 100 MW oder mehr angewendet werden kann und die häufigste Form der Energieerzeugung aus Biomasse ist (siehe Abbildung 10.5). Rund um den Globus durchlaufen über 90% der energetisch genutzten Biomasse diesen Verbrennungsweg (IRENA, 2012).

Es gibt zwei Hauptkomponenten einer verbrennungsbasierten Biomasseanlage: Der Biomassekessel, der Dampf erzeugt; und die Dampfturbine, die dann zur Stromerzeugung genutzt wird. Die beiden häufigsten Formen von Heizkesseln sind Heizer und Wirbelschicht. Diese können vollständig mit Biomasse betrieben werden oder mit einer Kombination aus Biomasse und Kohle oder anderen festen Brennstoffen mitverbrannt werden. Der in den Kesseln erzeugte Dampf wird in Dampfturbinen eingespritzt. Diese wandeln die im Dampf enthaltene Wärme in mechanische Energie um, die die Stromerzeugung antreibt (IRENA, 2012).

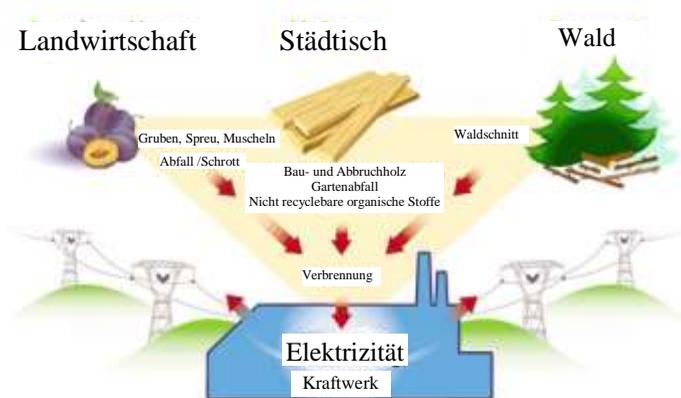


Abbildung 10.5 Biomassequellen für die Stromerzeugung

([http:// www.calbiomass.org/wp-content/uploads/2013/02/biomass-fuel-sources.jpg](http://www.calbiomass.org/wp-content/uploads/2013/02/biomass-fuel-sources.jpg))

### 10.5.3 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Kraft-Wärme-Kopplung oder KWK bezeichnet den Prozess, bei dem ein einziger Brennstoff zur Erzeugung von Wärme und Elektrizität verwendet wird, wodurch der Gesamtwirkungsgrad signifikant erhöht wird. In normalen Stromerzeugungsanlagen werden bis zu 70% der Wärme in Dampf an die Atmosphäre abgegeben. Im Kraft-Wärme-Kopplungs-Modus wird diese

Wärme verwendet, um den Wärmebedarf des Prozesses zu decken (Abbasi et al., 2010). Kraft-Wärme-Kopplungen stellen oft die effizienteste Nutzung von Biomasse dar und verbrauchen etwa 80% der potenziellen Energie (siehe Abbildung 10.6) (EESI).

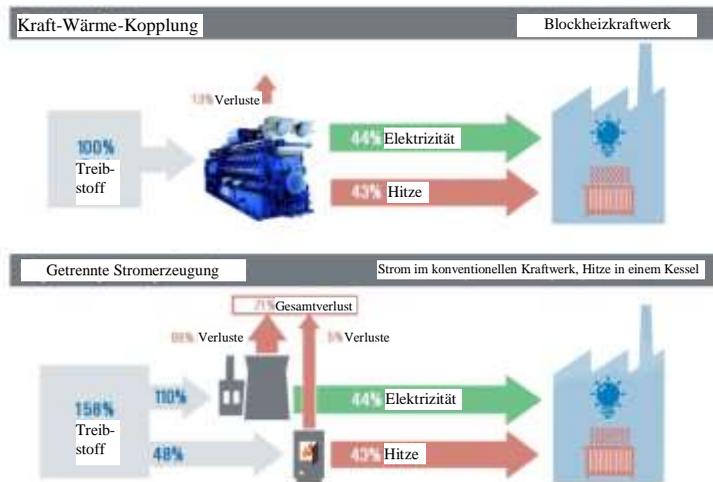


Abbildung 10.6 Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur getrennten Stromproduktion

Quelle: [www.mwm.net](http://www.mwm.net)

Die Kapazität von KWK-Projekten kann von wenigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt Stromerzeugung bei gleichzeitiger Erzeugung von Wärme von weniger als einhundert Kilowatt (Kilowatt thermisch) bis zu vielen MWth (Megawatt thermisch) reichen. KWK-Systeme bieten im Allgemeinen höhere Kohlenstoffeinsparungen als reine Stromversorgungssysteme, haben aber aufgrund der hohen anfänglichen Kapitalkosten weniger günstige wirtschaftliche Eigenschaften (Abb. 10.7) (Abbasi et al., 2010).

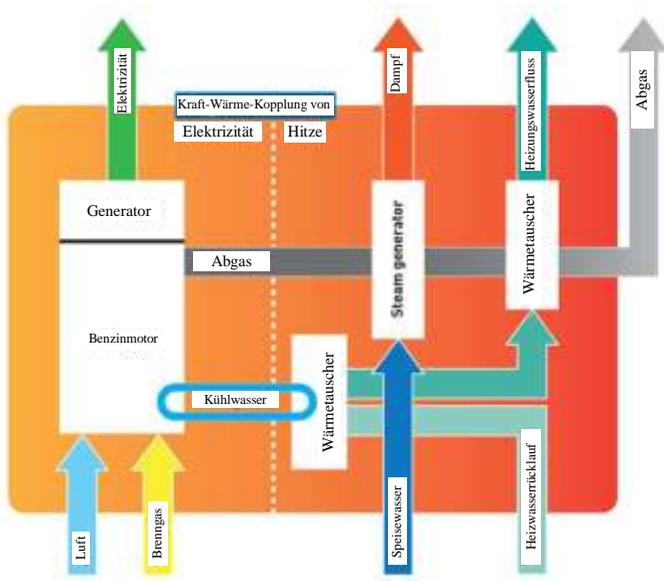


Abbildung 10.7 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Gasmotoren

Quelle: [www.mwm.net](http://www.mwm.net)

#### 10.5.4 Verwendung von Biomasse-Vergasern

Biomassevergaser können in stark verbrauchsintensiven Industrien fossile Brennstoffe ersetzen. Vergasertechnologien bieten die Möglichkeit, Biomasse in ein Produktionsgas umzuwandeln, das in einfachen oder kombinierten Gasturbinen mit höheren Wirkungsgraden als die Verbrennung von Biomasse zum Antrieb einer Dampfturbine verbrannt werden kann. Obwohl Vergasungstechnologien im Handel erhältlich sind, muss in Bezug auf FuE und Demonstration mehr getan werden, um ihre weitverbreitete kommerzielle Nutzung zu fördern (IRENA, 2012).

Es gibt drei Hauptarten der Vergasungstechnologie:

- Festbettvergaser;
- fluidisierte (zirkulierende oder sprudelnde) Bettvergaser; und
- Flugstromvergaser

## **10.6 Biochemische Verarbeitung**

### **10.6.1 Fermentation zu Ethanol**

In den Nahrungspflanzen müssen die Zucker (in Form von Stärke) zuerst in einfachere Zucker umgewandelt werden, bevor die Fermentation zu Ethanol durchgeführt werden kann. Da die Fermentation in Gegenwart von Wasser durchgeführt wird, liegt das resultierende Ethanol in einer verdünnten Form vor. Um als Kraftstoff nutzbar zu sein, muss Ethanol von Wasser befreit werden (Abbasi et al., 2010).

Das große Problem in Zusammenhang mit der Fermentation zu Ethanol ist der Umwandlungsprozess, der alles andere als sauber ist. Einige Wissenschaftler behaupten sogar, dass der gesamte Prozess so umweltverschmutzend ist und so viel Energie verbraucht, dass er letztlich mehr Treibhausgasemissionen erzeugt als Benzin, das er als Transportkraftstoff ersetzt.

### **10.6.2 Ethanolproduktion aus Lignocellulose-Kulturen**

Mit zunehmendem Widerstand gegen die Umlenkung von Nahrungspflanzen für die Biokraftstoffproduktion und wachsender Akzeptanz der Tatsache, dass es nicht so sauber und umweltfreundlich ist, wie es in der Vergangenheit projiziert wurde, verlagert sich der Fokus auf lignocellulosehaltige Biomasse. Während die stärkehaltigen Samen von Mais nur einen kleinen Teil der Biomasse der Gesamtpflanze ausmachen, sind alle anderen Pflanzenteile voller Lignocellulose. Daher können auf jedem Hektar Land, das zur energetischen Nutzung von Biomasse genutzt wird, viel größere Mengen an lignocellulosehaltiger

Biomasse produziert werden als bei einer Nahrungsmittelpflanze (Abbasi et al., 2010).

### **10.6.3 Anaerobe Verdauung**

Anaerobe Verdauung wurde mit zunehmendem Erfolg bei der Verarbeitung von Tierdünger und Abwässern eingesetzt (Ramasamy et al., 2004), wurde aber bei der Verarbeitung von Phytomass mit operativen Problemen und geringer Effizienz belastet (Ganesh et al., 2009).

### **10.6.4 Veresterung zu Biodiesel**

Die größte Herausforderung besteht darin, ölreiche Pflanzen in ausreichend großen Mengen pro Hektar Land anzubauen, um den Ölertrag bei minimalen Umweltkosten zu maximieren (Abbasi et al., 2010).

### **10.6.5 Neue Technologien**

Neue Technologien für die Herstellung von Biokraftstoffen aus Biomasse entwickeln sich rasch, einschließlich der Entwicklung von gentechnisch veränderten Hefen für erhöhte Ethanolausbeuten (Alper et al., 2006), der Verwendung neuer Mikroorganismen für die Ethanolherstellung (Seo et al., 2005), Vorbehandlungen für die Zelluloseverdauung (Mosier et al., 2005), Brennstoffzellen zur direkten Umwandlung von Zuckern in Elektrizität (Chaudhury, Lovley, 2003) und Katalysatoren für eine effizientere Umwandlung von Biomasse zu Synthesegas (Salge et al., 2006).

## **10.7 Umweltauswirkungen von Biomasseenergie**

### **10.7.1 Produktion von Biomasse**

Die Energie der Biomasse kann CO<sub>2</sub>-neutral sein, ist aber nicht nährstoffneutral

Zentral für die Befürwortung von Biomasseenergie ist das Argument, dass es CO<sub>2</sub>-neutral ist; es gibt nur diesen Kohlenstoff zurück an die Atmosphäre, die früher dort durch Photosynthese herausgerissen wurde. Das Argument ist stichhaltig, auch wenn wir berücksichtigen, dass zumindest ein Teil des Kohlenstoffs ein fossiler Brennstoff sein könnte, der in den letzten Jahren von der Biomasse gebunden wurde (Abbasi et al., 2010).

Aber Biomasse ist nicht nur ein Kohlenstoffklumpen, sie enthält Stickstoff und einige andere essentielle Nährstoffe. Jede Anstrengung, Biomasse intensiv zu kultivieren, hat andere Implikationen als die Kohlenstoffbindung (Miller et al., 2007)

Landwirtschaftliche Aktivitäten erzeugen mehr als 75% der emittierten reaktiven Stickstoffverbindungen (Smil, 1999). Die globalen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind seit 1750 um etwa ein Drittel gestiegen; im selben Zeitraum ist ein Anstieg der atmosphärischen N<sub>2</sub>O-Konzentrationen um 15% aufgetreten, aber jedes N<sub>2</sub>O-Molekül hat ein 300 Mal höheres Treibhauspotenzial als ein CO<sub>2</sub> Molekül (Fixen, West, 2002). Darüber hinaus haben anthropogene Störungen im Stickstoffkreislauf zu einer geschätzten Zunahme des Flusses von nicht-reaktivem atmosphärischem Stickstoff zu reaktiven Stickstoffverbindungen um 1100% geführt (Gitay, Suarez, 2002).

Nach der Umwandlung in einen reaktiven Zustand verbleibt Stickstoff in der Umgebung und passiert die Formen von NH<sub>3</sub> N<sub>2</sub>O NO<sub>x</sub> NO<sub>3</sub>, mit einer Auswirkung von der Produktion von bodennahem Ozon, Versauerung, Eutrophierung, Hypoxie, stratosphärischem Ozonabbau und Klimawandel (Galloway et al., 2003). Von diesen Auswirkungen gehören die Eutrophierung von Oberflächengewässern und die Verschmutzung unterirdischer Grundwasserleiter zu den am weitesten verbreiteten Umweltfolgen der Landwirtschaft. Es kommt auch zu Phosphor-Zyklen, die zur Eutrophierung führen (Abbasi et al., 2010).

Es ist nicht möglich, die intensive und repetitive Produktion von Biomasse pro Flächeneinheit, die in den biomassebasierten Energieproduktionsprogrammen vorgesehen ist, auf der Grundlage der nativen Stickstoffvorräte im Boden aufrechtzuerhalten, da sie nicht ausreichen, um genügend Nährstoffe für Nicht-Stickstoff zu liefern -festigende Getreide, wie Mais. Die natürlichen Stickstoffkonzentrationen müssen mit zusätzlichen Nährstoffen, in der Regel in Form von Kunstdünger, ergänzt werden, aber Bodenorganismen, Bodenbiota, Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und zahlreiche Mikronährstoffe können nicht durch Düngemittel ersetzt werden (Abbasi et al., 2010).

### **10.7.2 Land- und Wasserressourcen**

Die Umetzung eines beträchtlichen Biomasse-Energieproduktionsprogramms erfordert große Mengen an Wasserressourcen und Land. In einigen Regionen wird das Grundwasser zehnmal schneller gepumpt als das natürliche Neubildungspotenzial der Grundwasserleiter. Ein weiteres Problem ist die Wasserverschmutzung durch Pestizide und Dünger, die für eine intensive Kultivierung unweigerlich benötigt werden (Pimentel et al., 1992).

Das Land, das für eine erhöhte Energieproduktion aus Biomasse genutzt wird, konkurriert mit Feldfrüchten, Wäldern und der Urbanisierung (Chari, Abbasi, 2005). Die Entfernung von Biomasse aus Land und Wasser für das Energieproduktionsprogramm erhöht den Abbau von Boden und Wasser, Überschwemmungen und die Entfernung von Nährstoffen. Es betrifft auch Wildtiere und die natürlichen Lebensgemeinschaften (Abbasi et al., 2010).

### **10.7.3 Bodenerosion und Wasserabfluss**

Biomasse-Projekte zur Energieerzeugung dürften die Probleme der Bodenerosion verstärken. Die Bodenerosion trägt wesentlich zur Beschleunigung des Wasserabflusses bei und verzögert somit die Grundwasserneubildung. Der nährstoffreiche Abfluss

kann die Qualität der Flüsse, Seen oder Flussmündungen durch Eutrophierung beeinträchtigen (Abbasi, Chari, 2008).

#### **10.7.4 Nährstoffentfernung und –verluste**

Ein erheblicher Nährstoffverlust entsteht durch die Ernte von Ernterückständen für Biomasse-Energie.

#### **10.7.5 Verlust natürlicher Lebensräume, Lebensräume und Wildtiere**

Die Umwandlung natürlicher Ökosysteme in Energiepflanzenplantagen wird sowohl den Lebensraum als auch die Nahrungsquellen von Wildtieren und anderen Biota verändern (Abbasi, Chari, 2008). Die Veränderung von Wäldern und Feuchtgebieten wird viele bevorzugte Habitats und Paarungsgebiete einiger Säugetiere, Vögel und anderer Biota reduzieren. Monokulturplantagen von schnell wachsenden Bäumen reduzieren die Vielfalt der Vegetation und den Wert der Flächen als Lebensräume für viele Wildtierarten. Diese Monokulturen sind weniger stabil als Klimawälder und erfordern einen erhöhten Energieeinsatz in Form von Pestiziden und Düngemitteln, um die Produktivität aufrechtzuerhalten. Bäume in rentablen Plantagen sind 2-3-mal so dicht wie in natürlichen Wäldern (Rowe et al., 2009).

### **10.8 Umwandlung in nutzbare Energie**

Die Produktion von Biomasse ist nur eine Dimension der auf Biomasse basierenden Energiesysteme; seine Umwandlung in nutzbare Energie ist eine andere und ebenso wichtige Dimension (Abbasi et al., 2010).

Die Nutzung von Biomasse ist nicht nur eine Quelle für Treibhausgasemissionen, sondern auch für mehrere hochgiftige Luftschadstoffe (Lewtas, 2007).

#### **10.8.1 Umweltauswirkungen von thermischen Prozessen**

Die größten Umweltprobleme sind:

Luftverschmutzung → Emissionen von Feinstaub, Kohlenstoffoxiden, Schwefeloxiden, Stickoxiden  
organische Emissionen → Dioxin, Kohlenwasserstoffe, toxische Reizstoffe und krebserzeugende Verbindungen;  
Erzeugung von festen Abfällen → Bodenasche, Flugasche, die manchmal giftige Stoffe enthalten und Verschmutzungsproblemen mitsichbringen;  
Wasserverschmutzung → biologischer Sauerstoffbedarf, chemischer Sauerstoffbedarf, Schwebstoffe, Spurenmetalle;  
Druck auf Land- und Wasserressourcen;  
Gefahren im Haushalt → unbeabsichtigte Brände;  
Gefahren am Arbeitsplatz → längere Exposition gegenüber toxischen und ätzenden Chemikalien.

### **10.8.2 Brennendes Holz**

Die Verwendung von Holz, Holzpellets und Holzkohle zum Heizen und Kochen kann fossile Brennstoffe ersetzen und insgesamt zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Gleichzeitig enthält Holzrauch Schadstoffe wie Kohlenmonoxid und Feinstaub. Moderne Holzöfen, Pelletöfen und Kamineinsätze können die Menge an Feinstaub aus brennendem Holz reduzieren. Holz und Holzkohle sind in armen Ländern wichtige Brenn- und Heizstoffe, aber wenn Menschen das Holz schneller ernten, als Bäume wachsen können, verursacht dies Abholzung (EIA).

### **10.8.3 Verwendung von Biomasse für Strom und Wärme**

Die Verwendung von Holz für die Stromerzeugung und Wärmeerzeugung ist in den letzten Jahren stark angestiegen, aber seine tatsächlichen Auswirkungen auf das Klima und die Wälder sind umstritten. Genau wie die Debatte über Biokraftstoffe im Verkehr vor einigen Jahren ist dies ein sehr kontroverses Thema mit sehr wenigen Konsensbereichen (Chatam House).

Die meisten aktuellen Förderrichtlinien für Biomasse für Strom und Wärme basieren auf der falschen Annahme, dass ihre Nutzung sofort und vollständig CO<sub>2</sub>-neutral ist. Diese Annahme

untermauert viele öffentliche Politiken mit dem Ergebnis, dass die Nutzung von Biomasse zunimmt, hauptsächlich zu Lasten der Versuche, den Klimawandel zu begrenzen. In Wirklichkeit emittiert Biomasse mehr Kohlenstoff pro Energieeinheit als die meisten fossilen Brennstoffe. Nur Rückstände, die andernfalls als Abfall verbrannt wurden oder im Wald verblieben wären und schnell verfallen wären, können kurz- bis mittelfristig als CO<sub>2</sub>-neutral angesehen werden (Chatam House).

in Grund für die CO<sub>2</sub>-neutrale Wahrnehmung von Biomasse ist die Tatsache, dass die damit verbundenen Emissionen im Rahmen der internationalen Vorschriften zur Treibhausgasbilanzierung eher in der Landnutzung als im Energiesektor erfasst werden. Die unterschiedlichen Arten, in denen Emissionen aus der Landnutzung berücksichtigt werden, bedeuten jedoch, dass ein Teil der Emissionen aus Biomasse niemals berücksichtigt werden kann (Chatam House).

#### **10.8.4 Verbrennen von Siedlungsabfällen oder Holzabfällen**

Durch die Verbrennung von Siedlungsabfällen zur Energiegewinnung in Müllverbrennungsanlagen wird weniger Müll auf Deponien entsorgt. Auf der anderen Seite erzeugt brennender Müll Luftverschmutzung und setzt die Chemikalien und Substanzen in den Abfällen in die Luft frei. Einige dieser Chemikalien können für Menschen und die Umwelt gefährlich sein, wenn sie nicht ordnungsgemäß kontrolliert werden (EIA).

Wäscher reinigen die Emissionen von Müllheizkraftwerken, indem sie eine Flüssigkeit in die Verbrennungsgase sprühen, um die im Emissionsstrom vorhandenen Säuren zu neutralisieren. Gewebefilter und Elektrofilter entfernen ebenfalls Partikel aus den Verbrennungsgasen. Ein Müll-Energie-Ofen verbrennt bei hohen Temperaturen (1000-1100 ° C), wodurch die Chemikalien in Siedlungsabfällen in einfachere, weniger schädliche Verbindungen (EIA) zerlegt werden.

### **10.8.5 Ascheentsorgung aus Müllverbrennungsanlagen**

Asche kann hohe Konzentrationen verschiedener Metalle enthalten, die im ursprünglichen Abfall vorhanden waren. Batterien sind die größte Quelle für Blei und Cadmium in Siedlungsabfällen. Textilfarben, Druckfarben und Keramik können auch Blei und Cadmium enthalten. Leuchtstofflampen enthalten geringe Mengen Quecksilber. Mülltrennung vor dem Verbrennen kann einen Teil des Problems (EIA) lösen.

### **10.8.6 Sammeln von Deponiegas oder Biogas**

Biogas entsteht durch biologische Prozesse in Kläranlagen, Mülldeponien und Gülle-Management-Systemen. Biogas besteht hauptsächlich aus Methan und  $\text{CO}_2$ . Viele Anlagen verbrennen das Methan zur Wärmeerzeugung oder zur Stromerzeugung und können die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen ersetzen und zu einer Netto-Reduzierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen führen. Das Verbrennen von Methan produziert auch  $\text{CO}_2$  und da Methan ein stärkeres Treibhausgas als  $\text{CO}_2$  ist, ist der Treibhauseffekt insgesamt geringer.

### **10.8.7 Einfluss von Fermentationsprozessen; flüssige Biokraftstoffe: Ethanol und Biodiesel**

Biokraftstoffe können  $\text{CO}_2$ -neutral sein, weil die Pflanzen, die zur Herstellung von Biokraftstoffen verwendet werden (wie Mais und Zuckerrohr für Ethanol und Sojabohnen und Palmölbäume für Biodiesel),  $\text{CO}_2$  absorbieren, wenn sie wachsen und die  $\text{CO}_2$ -Emissionen bei der Produktion und Verbrennung von Biokraftstoffen ausgeglichen werden können (EIA).

Dennoch ist der Anbau von Pflanzen für Biokraftstoffe umstritten, weil Land, Dünger und Energie für den Anbau von Biokraftstoffpflanzen für den Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden könnten. In einigen Teilen der Welt wurden große Gebiete mit natürlicher Vegetation und Wäldern abgeholzt, um

Zuckerrohr für Ethanol und Sojabohnen und Palmölbäume für Biodiesel (EIA) anzubauen.

Diese Aktivitäten tragen sowohl kurzfristig als auch langfristig viel mehr zur Erderwärmung bei als die Einsparungen, die durch die Substitution einiger Benzinanteile durch Ethanol im Transportkraftstoff erzielt werden (Searchinger et al., 2008).

Es gibt alternative Biomassequellen, die nicht mit Nahrungspflanzen konkurrieren und weniger Dünger und Pestizide verbrauchen als Mais und Zuckerrohr. Ethanol kann auch aus Altpapier hergestellt werden, und Biodiesel kann aus Altfett und -ölen und sogar aus Algen hergestellt werden (EIA). Es gibt eine zunehmende Befürwortung der Biokraftstoffproduktion aus auf Lignocellulose basierenden Energiepflanzen wie Rutenhirse, Weiden und Pappeln, insbesondere unter Verwendung landwirtschaftlich marginaler Flächen (Schmer et al., 2008).

Ethanol und Benzin-Ethanol-Gemische sind sauberer und haben höhere Oktanzahlen als reines Benzin, aber sie haben höhere Verdunstungsemissionen von Kraftstofftanks und Dosiergeräten. Diese Verdunstungsemissionen tragen zur Bildung von schädlichem bodennahem Ozon und Smog bei. Benzin erfordert eine zusätzliche Verarbeitung, um die Verdunstungsemissionen zu reduzieren, bevor es mit Ethanol gemischt wird. Die Biodieselveverbrennung produziert weniger Schwefeloxide, weniger Feinstaub, weniger Kohlenmonoxid und weniger unverbrannte und andere Kohlenwasserstoffe, aber es produziert mehr Stickoxide als Erdöldiesel (EIA).

Obwohl Ökobilanzstudien Biokraftstoffe zeigen, die für die Netto-Energiebilanz (NEB) günstig im Vergleich zu den fossilen Brennstoffen sind, die sie ersetzen (Schmer et al., 2008), erscheinen Biokraftstoffe im Gesamtzusammenhang von Energiebilanz, Treibhausgasemissionen, Umweltbelastung und Humanismus immer weniger attraktiv (Abbasi et al., 2008).

## Referenzen

Abbasi, Tasneem, Abbasi, SA: Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization; Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 3, April 2010, Pages 919-937

Abbasi SA, Chari KB. Environmental management of urban lakes. New Delhi: Discovery Publishing House; 2008.

Alper H, Moxley J, Nevoigt E, Fink GR, Stephanopoulos G. Engineering yeast transcription machinery for improved ethanol tolerance and production. Science 2006; 314:1565–8.

Chari KB, Abbasi SA. A Study on the aquatic and amphibious weeds of Oussudu Lake. Hydrology Journal 2005;28(September–December):89–98F.

Chatham House (International Affairs Think Tank)  
(<https://www.chathamhouse.org/about/structure/eeer-department/environmental-impact-use-biomass-power-and-heat-project>)

Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. Natural Biotechnology 2003; 21:1229–32.

EESI: (<http://www.eesi.org/topics/bioenergy-biofuels-biomass/description>)

EIA (U.S. Energy Information Administration) [www.eia.gov](http://www.eia.gov)

Eurobserv'er: Biofuels barometer 2017

Eurobserv'er: Solid biomass barometer 2016

Fixen PE. West FB nitrogen fertilizers, meeting contemporary challenges. AMBIO 2002; 31:169–76.

Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW. The nitrogen cascade. BioScience 2003;53L:41–356.

Ganesh PS, Gajalakshmi S, Abbasi SA. Vermicomposting of the leaf litter of acacia (*Acacia auriculiformis*): Possible roles of reactor geometry, polyphenols, and lignin. *Bioresource Technology* 2009; 100:1819–27.

Gitay HA, Suarez T. In: Watson, Dokken DJ, editor. *Climate Change and Biodiversity. IPCC Technical Paper V*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2002.

Goldemberg J, Johansson TB. *World energy assessment overview: update*. New York: United Nations Development Programme; 2004.

IRENA: *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Biomass for Power Generation*, 2012

Lewtas J. Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. *Mutation Research—Reviews in Mutation Research* 2007; 636:95–133.

McLaughlin SB, Kszos LA. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy* 2005; 28:515–35.

Miller SA, Landis AE, Thesis TL. Environmental trade-offs of biobased production. *Environmental Science & Technology* 2007;(August):5176–82.

Mosier N, Wyman C, Dale B, Elander R, Lee YY, Holtzapple M, Ladisch M. Features of promising technologies for pre-treatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 2005; 96:673–86.

Pimentel D. Competition for land: development, food, and fuel. In: Kaliasha MA, Zcker A, Ballew KJ, editors. *Technologies for a Greenhouse-constrained Society*, Lewis, Boca Raton, FL; 1992. p. 325–48.

Raghu S, Anderson RC, Daehler CC, Davis AS, Wiedenmann RN, Simberloff D, et al. Adding biofuels to the invasive species fire? *Science* 2006; 313:1742.

Ramasamy EV, Gajalakshmi S, Sanjeevi R, Jithesh MN, Abbasi SA. Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Bioresource Technology* 2004; 93:209–12.

Rowe L, Street R, Taylor NR. GIdentifying potential environmental impacts of large-scale development of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13:271–90.

Salge JR, Dreyer BJ, Dauenhauer PJ, Schmidt LD. Renewable hydrogen from nonvolatile fuels by reactive flash volatilization. *Science* 2006; 314:801–5.

Scheer, Hermann: *Handbook of Renewable Energies in the European Union I-II*; Frankfurt am Main, Germany, 2002

Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. USA: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2008.

Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa J, et al. Use of croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change 10.1126/Science.1151861. *Science* 2008; 319:1238–40.

Seo JS, Chong H, Park HS, Yoon KO, Jung C, Kim JJ. The genome sequence of the ethanologenic bacterium *Zymomonas mobilis* ZM4. *Nature Biotechnology* 2005; 23:63–8.

Smil V. Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 1999; 13:647–62.

US National Energy Education Project

World Bioenergy Association: *Global Bioenergy Statistics* 2014

World Energy Council: World Energy Resources – Bioenergy  
2016.