

Weiterbildender Fernstudiengang Umweltschutz

## Leseprobe

### Modul 3

#### Schwerpunkt „Technischer Umweltschutz“

Roland Matzmohr

**Maschinen und Anlagen zur regenerativen Energienutzung und zur  
Reinigung kontaminierter Böden, Teil 1**

Paul Engelke

**Wasserversorgung/ Wasserbeschaffung/ Trinkwasseraufbereitung/  
Technik der Siedlungsentwässerung/ Neuartige Sanitärsysteme - Eco-  
logical Sanitation, Teil 2 (Reader)**

Michael Nelles/ Nils Engler/ Andrea Schüch

**Bioenergie**

Ulf Hansen

**Umweltgerechte Energienutzung**

Gert Morscheck/Abdallah Nassour

**Abfall- und Stoffstromwirtschaft**

Christian Fürll

**Reinhaltung der Luft**



MASCHINEN UND ANLAGEN ZUR  
REGENERATIVEN ENERGIEERZEUGUNG  
UND ZUR REINIGUNG KONTAMINIERTER  
BÖDEN

TEIL 1

Roland Matzmohr

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Maschinen und Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung</b>	<b>13</b>
1.1	Einführung .....	13
1.2	Nutzbare Potenziale regenerativer Energien /2/ .....	15
1.2.1	Zusammenstellung der erwartbaren Potenziale .....	15
1.2.2	Sonnenenergie .....	16
1.2.3	Windenergie .....	17
1.2.4	Bioenergie .....	19
1.2.5	Geothermische Energie .....	20
1.2.6	Wasserkraft .....	20
1.2.7	Umgebungswärme .....	21
1.2.8	Hybridanlagen .....	22
1.3	Maschinen und Anlagen .....	23
1.3.1	Solaranlagen .....	23
1.3.2	Windkraftanlagen .....	48
1.3.3	Bioenergieanlagen .....	55
1.3.4	Geothermie /14,15/ .....	58
1.3.5	Gezeitenkraftwerk .....	61
1.3.6	Wellenenergienutzung /1/ .....	61
1.3.7	Wasserkraftwerke .....	62
1.3.8	Umweltenergienutzung .....	63
<b>2</b>	<b>Maschinen und Anlagen zur Reinigung kontaminierter Böden</b>	<b>70</b>
2.1	Einleitung .....	70
2.2	Sicherungsverfahren .....	71
2.2.1	Einführung .....	71
2.2.2	Einkapselungsverfahren .....	72
2.3	Mechanische Verfahren .....	77
2.3.1	Einleitung .....	77
2.3.2	Zerkleinerung von Bodenpartikeln .....	77
2.3.3	Stoffliche Trennung vor der Bodenbehandlung .....	77
2.4	Waschverfahren .....	78
2.4.1	Einleitung .....	78
2.4.2	Klassierverfahren zur Bodenreinigung .....	80

2.4.3	Waschverfahren mit Energieeintrag zur Schadstoffabtrennung....	82
2.5	Extraktionsverfahren .....	87
2.5.1	In situ-Extraktion.....	87
2.5.2	Extraktionsverfahren mit flüssigen Extraktionsmitteln.....	90
2.6	Biologische Verfahren.....	92
2.6.1	Einleitung .....	92
2.6.2	Auswahl und Einsatz geeigneter Mikroorganismen.....	94
2.6.3	In situ-Verfahren .....	96
2.6.4	Ex situ-Verfahren .....	101
2.7	Thermische Verfahren .....	109
2.7.1	Einleitung .....	109
2.7.2	Hochtemperaturverbrennung.....	110
2.7.3	Pyrolyseverfahren.....	111
2.7.4	Ausblick.....	112

**Abbildungsverzeichnis**

## **Einführung**

Die Bedeutung des Umweltschutzes wird derzeit sicherlich noch nicht ausreichend erkannt oder benannt. Dabei gibt es unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen. Weltweite Umweltprobleme wie Klima- und Gewässerschutz lassen sich nur global angehen. Politische und finanzielle Fragestellungen verhindern hierzu das dringend notwendige konsequente Vorgehen gegen die Abholzung ganzer Waldgebiete, das Einblasen giftiger Stoffe durch Industrie, Haushalt sowie Massen- und Individualverkehr in die Umgebungsluft und das Eintragen von Schad- und Belastungsstoffen in Flüsse, Meere und Böden.

Die Folgen haben wir als gesamte Menschheit zu tragen. Die Verringerung der Ozonschicht mit der Bildung der Ozonlöcher, die Vernichtung von Pflanzen durch Rodung und Sauren Regen, das "Umkippen" von Gewässern durch Eutrophierung und die andauernden Schadstoffeinträge in die Gewässer haben bereits direkte und indirekte Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen.

Die oft wesentlich akuterem und besser sichtbaren Umweltprobleme in regional begrenzten Gebieten, vor allem den Ballungszentren dieser Erde, werden ebenfalls oft aus politischen und finanziellen Gründen nicht mit der gebührenden Konsequenz angegangen. Die hier gern angeführte Vorreiterrolle der Bundesrepublik Deutschland in Europa und der Welt mit einem weitreichenden Netzwerk an rechtlichen Vorschriften und Richtlinien, Genehmigungen und Überwachungen muss spätestens nach der Ozongrenzwert-Debatte und den verwirrenden Ausnahmeregelungen für den Individualverkehr in seiner Ernsthaftigkeit angezweifelt werden.

Nichts desto weniger sind wir in weiten Bereichen auf gerade diesen Gesetzgeber im Umweltschutz angewiesen. Die Verallgemeinerung, dass geeigneter Umweltschutz teuer ist, stimmt nur teilweise. Aber da, wo sie stimmt, kann nur der Gesetzgeber Industrie und Privathaushalt durch rechtliche Vorschriften zwingen, die politisch durchsetzbaren Belastungen zur Verbesserung der Umweltbedingungen zu tragen. Dabei bleibt

globale Umweltprobleme

regionale Umweltprobleme

festzuhalten, dass dem Wähler bei der Feststellung der "Durchsetzbarkeit" eine bedeutende Aufgabe zukommt.

Die wesentliche Aufgabe des Ingenieurs oder technisch orientierten Wissenschaftlers im Umweltschutz für die Zukunft muss sein, durch geeignete Maschinen und Anlagen in intelligenten Verfahren nicht eine "Zusatzbelastung" für Industrie und Haushalt zu erzeugen, sondern wirtschaftliche Vorteile durch sparsamen Umgang mit Energie und Rohstoffen einerseits und Einsparung von Entsorgungstechnik durch "saubere" Produktionsverfahren und "abfallfreie" Einsatzstoffe und Produkte andererseits zu schaffen, wobei gleichzeitig eine hohe Akzeptanz von Verfahren und Produkten zu erreichen ist.

Damit sind die Inhalte einer Ausbildung im Technischen Umweltschutz deutlich abgesteckt:

- Bereitstellung von Energie und Wärme aus "umweltverträglichen" Energieträgern bei hohen Wirkungsgraden
- optimale Nutzung dieser Energien in den Bereichen Stoffherstellung, Stoffveredlung, Produktherstellung, Produkt- oder Stoffrecycling sowie Transport und Logistik
- antriebsstoffarme und "emissionsfreie" Betriebsweise von Maschinen und Anlagen
- Herstellung recyclingfähiger Produkte und Bereitstellung der Recyclingtechnik inklusive der notwendigen Logistik
- Erfassung und Bewertung aller Emissionen und Immissionen die von technischen Einrichtungen ausgehen bzw. durch deren Nutzung in die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft gelangen.

Die Entwicklung von Maschinen und Anlagen in der Umwelttechnik ist ein dynamischer Prozess, der von einer ganzen Reihe unterschiedlicher Randbedingungen aus Industrie, Forschung und Politik beeinflusst wird. Die Darstellung des Standes der Technik und vor allem neuer Entwick-

technische Dimension des Umweltschutzes

Ausbildungsinhalte

Entwicklung im Bereich Maschinen und Anlagen der Umwelttechnik

lungen in der schriftlichen Fixierung kann nur eine Momentaufnahme sein.

Eine endgültige Bewertung ist oft gar nicht möglich, da mit der Etablierung einer Technik im Produktionsmaßstab oft schon neue Entwicklungen im Labor oder Technikum mit gleicher Zielsetzung einhergehen, deren großtechnische und wirtschaftliche Relevanz noch nicht vorhersehbar sind.

Es bleibt damit neben dem Kennen lernen derzeitiger Techniken, der Bewertung und dem großtechnischen Einsatz bewährter Maschinen und Anlagen eine lebenslange Aufgabe des technisch Interessierten im Umweltschutz, den dynamischen Prozess der Verfahrens- und Anlagenentwicklung zu verfolgen.

Da sich die Leistungsfähigkeit einer technischen Einrichtung an den rechtlichen Vorgaben (Grenz- oder Richtwerte) orientieren muss, ist es ebenfalls eine unumgängliche Aufgabe, die Entwicklung auf diesem Sektor zu berücksichtigen und in verfahrens- und anlagentechnische Konzepte einfließen zu lassen.

Zu einer umweltgerechten Problemlösung sind örtliche Gegebenheiten und Strukturen beim Einsatz von Maschinen und Anlagen zu berücksichtigen. Die Ver- und Entsorgung von Ballungsgebieten mit hohem Bedarf und geringer Fläche kann ganz andere Anforderungen an eine "umweltgerechte" Technik stellen, als dies in gering besiedelten und industriearmen Regionen der Fall ist. Es bleibt somit auch Aufgabe des Umwelttechnikers, mit Wissen und Phantasie individuelle Lösungen mit Einbeziehung landschaftlicher und kultureller Eigenschaften für umweltrelevante Problemstellungen zu etablieren.

Mit dieser Aufzählung sind auch die wesentlichen Berufsfelder eines "Umwelt-Ingenieurs" angerissen. Die Entwicklung neuer Techniken, die Berechnung, Projektierung, Realisierung und der Betrieb klein- und großtechnischer Maschinen und Anlagen, die Kontrolle und Wartung technischer Anlagen, die Beaufsichtigung und Prüfung von Sicherheits- und

Anpassung der  
Technik an die  
Umwelt

Berufsfelder in der  
Umwelttechnik

Betriebsparametern als Forscher, Berater, Industrie- oder Behördenmitarbeiter sind die typischen Arbeitsfelder.

Der nachfolgende Lehrbrief "Maschinen und Anlagen der Umwelttechnik I" wird sich mit den Maschinen und Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien als alternative Versorgungstechnik und der klassischen "End of pipe"-Technik Abwasserbehandlung befassen.

Da nach Auffassung der Autoren das Wissen über die theoretischen Aspekte von Maschinen und Anlagen nicht unbedingt ausreicht, um sie zu kennen, wird über das schriftliche Material hinaus ein eintägiges Praktikum mit unterschiedlichen Versuchen zur Photovoltaik, biologischer Abwasserreinigung, Biokonversion sowie Schadstoff- und Geruchsausbreitung angeboten (siehe Anhang des Lehrbriefes). Die erfolgreiche Teilnahme mit der Erarbeitung eines Versuchsprotokolls von mindestens einem Versuch wird als Leistungsnachweis gewertet und berechtigt zur Teilnahme an der Prüfung. Für Fernstudenten, die aus akzeptablen Gründen nicht am Praktikum teilnehmen können, werden Belegthemen oder Berechnungen zu ausgewählten Inhalten des Lehrbriefes vergeben. Die zu erstellenden Belegarbeiten bzw. Berechnungen sollen bei einem maximalen Umfang von 20 Schreibmaschinenseiten den Inhalt des Lehrbriefes überschreiten. Bei der Beschaffung zusätzlicher Literatur oder Berechnungsgrundlagen sind die Autoren behilflich.

Die verfahrens- und bautechnischen Aspekte und Grundlagen der kommunalen Abwasserreinigung werden im Rahmen der Siedlungswasserwirtschaft separat erläutert. Die Fragestellungen zu Abfallentsorgung und Deponietechnik bleiben dem Lehrbrief Abfall- und Stoffstromwirtschaft vorbehalten.

Alle umweltrelevanten Maschinen und Anlagen, die dem Bereich des thermischen Maschinenbaus, der Abluftreinigung und Feststoffbehandlung (Boden, Abfall) zuzuordnen sind, sofern nicht aus didaktischen Gründen in diesem Lehrbrief eingeordnet, werden im nachfolgenden Lehrbrief "Maschinen und Anlagen der Umwelttechnik II" berücksichtigt. Hier wird auch der Prozessintegrierte Umweltschutz vorgestellt. **Zur**

fachlicher Inhalt  
des Lehrbriefes

Praktikum

Belegarbeit/ Be-  
rechnung

Ausschluss von  
Sachinhalten

Struktur des Lehr-  
briefes



**leichteren Erarbeitung der Texte sind die wichtigen Inhalte durch Fettdruck hervorgehoben.** Alle Maschinen und Anlagen, Anlagenteile oder Anlagenfunktionen sind *kursiv* geschrieben.

Die Abbildungen sind in einem separaten Heft vorgelegt, damit Sie die Bilder und den Text nebeneinander benutzen können. Zur eigenen Lernkontrolle sind zu den einzelnen Kapiteln Fragen oder Aufgaben erarbeitet worden. Diese können **nur der Lernkontrolle** dienen und nicht die Erarbeitung des Textmaterials ersetzen. Bei der Prüfung des Stoffes in der Komplexprüfung ist mit Fragen über die hier fixierten hinaus zu rechnen!

An einem gut durchschaubaren Beispiel aus der Sonnenwärmenutzung ist eine Auslegungsrechnung Bestandteil dieses Lehrbriefes. Diese Rechnung ist von Ihnen nach den vorgegeben Datenmaterialien selbständig durchzuführen. Fragen hierzu lassen sich in der Präsenzveranstaltung zur regenerativen Energie diskutieren.

Sie sind aufgerufen, den Autoren dieses Lehrbriefes Anregungen zur fachlichen und formalen Verbesserung des Lehrmaterials für nachfolgende Fernstudenten zukommen zu lassen. Ihre sachliche Kritik und vor allem Ihre Verbesserungsvorschläge sind gern gesehen! Zu einem erfolgreichen Fernstudium gehört neben Ihrem großen Fleiß und Ihrer Einsatzbereitschaft auch gutes Lehrmaterial, für das letztlich wir als Autoren **und** Sie als Leser und Studierender verantwortlich zeichnen sollten. Daher wünschen wir Ihnen und uns einen erfolgreichen Fernstudienverlauf.

Abbildungen und Tabellen

Fragen und Aufgaben

Auslegungsrechnung

Verbesserung des Lehrbriefes

## 1 Maschinen und Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung

### 1.1 Einführung

Die **Energieversorgung** ist neben der Bereitstellung von Nahrungsmitteln eine der **Hauptaufgaben der menschlichen Gesellschaft**. Die Energietechnik war und ist dabei unverzichtbare Grundlage, die Voraussetzungen für die Entwicklung und Erhaltung der als human gesehenen Lebensbedingungen zu schaffen und zu erhalten. Die wachsende Zahl der Weltbevölkerung und die sich ständig verbessernden Lebensbedingungen führten und führen weiter zu global steigendem anthropogenen Energieverbrauch. Allein in den letzten 300 Jahren stieg der Primärenergieverbrauch der Welt um das 70fache auf  $11 \cdot 10^9$  t Steinkohleneinheiten (SKE). Bei einem gleichzeitigen Bevölkerungswachstum um das 8fache hat sich der Pro-Kopf-Verbrauch im betrachteten Zeitraum in etwa verzehnfacht. An dem Primäraufkommen sind beteiligt:

- Mineralöl mit ca. 36 %
- Stein- und Braunkohle mit ca. 29 %
- Erdgas mit ca. 19 %
- Wasserkraft mit ca. 6 %
- Brennholz mit ca. 5 % und
- Kernenergie mit ca. 5 %.

**Fossile und nukleare Brennstoffe** machen gegenwärtig rund **90 % des Aufkommens** aus /3/.

Diese Brennstoffe sind aber nur endlich verfügbar. In einigen Jahrzehnten werden die wirtschaftlich nutzbaren Vorräte erschöpft sein. Aus diesem Beweggrund heraus gilt es bereits jetzt, nach anderen Energiequellen zu suchen und diese entsprechend den technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gegebenheiten zu nutzen.

Ein **weiterer wichtiger Aspekt** bei der Suche nach Alternativlösungen bei der Primärenergieversorgung der Menschheit ist die gegebene **Umweltbelastung** bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energieerzeugung.

Primärenergieanteile

# 1 Maschinen und Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung

## 1.1 Einführung

Durch den Schadstoffausstoß treten durch die Anreicherung verschiedener Verbrennungsprodukte, insbesondere durch CO<sub>2</sub>, Veränderungen im globalen Klimageschehen auf. Erste Anzeichen des so genannten "**Treibhauseffektes**" werden bereits registriert. Diese nachweislich klimabelastende Energiewandlung ist durch entsprechende Alternativlösungen schrittweise zu ersetzen.

Seit langem gibt es bereits Versuche, die regenerativen Energiequellen

- **solare Strahlung**
- **Isotopenzerfall** im Erdinnern (Quelle der geothermischen Energie)
- **Massenanziehung** der Planeten (Quelle der Gezeitenenergie)

zu erschließen. Aber nur bei der Nutzung der Wasserkraft und der Windenergie ist dies bisher in nennenswertem Umfang zur Energiebedarfsdeckung gelungen /4/.

Als **regenerative Energiequellen** bezeichnet man Energiequellen, die sich kontinuierlich auf natürliche Weise erneuern. Der größte Anteil ist auf die **Einstrahlung der Sonne** zurückzuführen. Deren Energie steht entweder direkt als kurzweilige Einstrahlung oder indirekt als **Umgebungswärme, Biomasse, Wind und Wasserkraft** zur Verfügung. Ein wesentlich geringerer Anteil der regenerativen Energien stammt aus der **Geothermie** und der **Gezeitenenergie**. Die Abbildung 1-1 zur **Energiebilanz der Erde** spiegelt die gegebenen Verhältnisse entsprechend wieder.

Die Abbildung 1-2 gibt eine Übersicht über die verschiedenen regenerativen Energiequellen sowie die möglichen **Umwandlungssysteme zur Erzeugung von Strom, Wärme und Brennstoff**. Im Gegensatz zum Einsatz von Brennstoffen besteht bei der Nutzung von regenerativen Energien meist eine zeitliche Kopplung zwischen Energieangebot und -erzeugung. Deshalb sind neben den Erzeugungsanlagen Systeme erforderlich, die die Unterschiede zwischen Energieangebot und -bedarf ausgleichen, um ausreichende **Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit** zu gewährleisten und eine optimale Ausnutzung der Energieerzeugungssysteme zu ermöglichen. Speichersysteme sind sehr aufwendig.

regenerative Energiequellen

Energiebilanz der Erde

Umwandlungssysteme

Soll der Einsatz von regenerativen Energien forciert werden, ist unbedingt auch auf dem Gebiet der Speichersysteme die Entwicklung voranzutreiben.

Heute erfolgt der Einsatz regenerativer Energien in der Regel parallel zu konventionellen Systemen, wo wegen des ungesicherten Leistungsangebots kaum konventionelle Erzeugungskapazität eingespart werden kann. Die Nutzung von regenerativer Energie ist somit **keine substitutive**, sondern - abgesehen von der Wasserkraft und der Bioenergie - z. Z. noch eine **additive Technik** /2/.

### 1.2 Nutzbare Potentiale regenerativer Energien /2/

Bevor auf technische Lösungen und deren Realisierung in Maschinen und Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien eingegangen wird, erfolgt zunächst eine Zusammenstellung der technischen und wirtschaftlichen Potentiale.

#### 1.2.1 Zusammenstellung der erwartbaren Potentiale

Unterschieden werden kann in drei Potenzialbegriffe:

##### - **Theoretisches Potenzial**

Unter dem theoretischen Potenzial versteht man das **gesamte physikalische Angebot** eines regenerativen Energieträgers. Im Falle der Solarenergie ist das beispielsweise die gesamte innerhalb eines Jahres auf einer genau definierten Fläche einfallende solare Strahlung. Ein solches theoretisches Potenzial kann nur der Abschätzung der absoluten Obergrenze der Energieerzeugung dienen. Verglichen mit den möglichen Beiträgen regenerativer Energiequellen zur Energieversorgung ist es jedoch viel zu hoch und unrealistisch, da

- der **zeitliche Verlauf** und die **räumliche Verteilung von Energieangebot und Energiebedarf**
- die **Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen** wie geeignete Freiflächen und die
- **ökologischen Grenzen**

nicht in Betracht gezogen werden.

Theoretisches  
Potenzial

Dennoch wird häufig mit diesem Begriff gearbeitet.

- **Technisches Potenzial**

Das technische Potenzial ergibt sich aus dem **theoretischen Potenzial**, wenn man die o.g. **systembedingten Einschränkungen** und die **erreichbaren Umwandlungswirkungsgrade** berücksichtigt. Es beschreibt die unter rein technischen **Gesichtspunkten maximal realisierbare Energieerzeugung** aus einer regenerativen Energiequelle.

technisches Potenzial

- **Wirtschaftliches Potenzial**

Im Gegensatz zum technischen Potenzial werden beim wirtschaftlichen Potential auch die **Anschaffungs- und Betriebskosten** für die **Energie-wandler** berücksichtigt. Wirtschaftlich sind nur solche Systeme, deren Kosten maximal gleich hoch sind wie die konventioneller Konkurrenzsysteme. Die Höhe des wirtschaftlichen Potentials hängt also von einer Reihe verschiedener Parameter ab, insbesondere von den Preisen anderer Energieträger.

wirtschaftliches Potenzial

Tab. 1-1 zeigt die Potenziale regenerativer Energieträger in der Bundesrepublik Deutschland.

### 1.2.2 Sonnenenergie

Der über alle Wellenlängen integrierte Wert der Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre bei mittlerem Abstand zwischen Sonne und Erde beträgt  $1,37 \text{ kW/m}^2$ . Das Verhältnis der gesamten kurzwelligen Reflexion der Erde (31 % an der Atmosphäre und 4,2 % an der Erdoberfläche) zur gesamten Einstrahlung wird Albedo der Erde genannt. Die Albedo ergibt also das Bild, unter dem die Erde vom Weltraum aus erscheint.

**Lediglich 0,1 %** der **eingestrahnten Energie** wird über **Photosynthese** in **organische Substanz** umgewandelt und gespeichert. Somit wird fast die gesamte von der Erde (einschließlich der Atmosphäre) empfangene **Strahlungsenergie** zwar kurzfristig in Form von **thermischer und kinetischer Energie** in der **Luft**, im **Wasser** und im **Erdboden** gespeichert, jedoch innerhalb des Jahreszyklus durch Abstrahlung auch wieder in den Weltraum zurückgestrahlt.

Strahlungsenergie

Die an der **Erdoberfläche nutzbare Strahlungsenergie verringert** sich durch

- **Absorption** in der **Ozonschicht**,
- **Absorption** in den **unteren Schichten** der Troposphäre überwiegend durch Wasserdampf und CO<sub>2</sub>,
- **Streuung und Vielfachreflexion** in den tiefen Schichten der Atmosphäre an den Wassertröpfchen der Wolken,
- **optische Weglänge** der Strahlung durch die Atmosphäre in Abhängigkeit vom Höhenwinkel der Sonne,

so dass von einer **tatsächlichen Einstrahlungsleistung** von 1,0 kW/m<sup>2</sup> ausgegangen werden kann. Über das Jahr gemittelt ergeben sich jedoch deutlich geringere Werte. Bei der laut Globalstrahlungskarte der Erde für die BRD ablesbaren mittleren jährlichen Einstrahlung von 1000 kWh/m<sup>2</sup> ergibt sich eine **jährliche Strahlungsleistung** von:

$$1000 \text{ kWh/m}^2 : 8760 \text{ h/a} = 114 \text{ W/m}^2$$

bzw. ein **Ausnutzungsgrad** von 0,114.

Dies entspricht etwa 40 % der Einstrahlung in den sonnenreichen Gebieten nördlich und südlich des Äquators, woraus zu ersehen ist, dass die mitteleuropäischen Breiten keine bevorzugten Bedingungen für eine Nutzung der Sonnenenergie aufweisen.

Die auf der Erdoberfläche auftreffende Strahlung kann in **direkte und diffuse Strahlung** unterteilt werden. Die Summe beider Strahlungsarten auf die Horizontalfläche ergibt die **Globalstrahlung** (Abb. 1-3). Dies ist entsprechend bei der Auswahl und Dimensionierung der Solaranlagen zu berücksichtigen.

### 1.2.3 Windenergie

Etwa **2 % der von der Sonne** eingestrahnten Leistung wird ständig in **Luftströmungen** umgesetzt. Dies entspricht weltweit einer Leistung von etwa  $3,5 \cdot 10^{12}$  kWh über das Jahr.

Verringerung der nutzbaren Strahlungsenergie

Praxisrelevante Aussagen zur Nutzung der Windenergie ermöglichen Windkarten, in die die Windgeschwindigkeiten in der Standardmesshöhe von 10m über Grund eingetragen sind. Wegen der geringen Luftreibung über den Wasserflächen der Meere sind die küstennahen Bereiche besonders geeignet für die Nutzung der Windenergie. Infolge der zunehmenden Oberflächenrauigkeit nehmen die mittleren Windgeschwindigkeiten landeinwärts stark ab. Für einen **wirtschaftlichen Einsatz** von Windkraftanlagen unter den z. Z. gegebenen Rahmenbedingungen sollten ca. **4m/s mittlere Jahreswindgeschwindigkeit** nicht unterschritten werden. Dies ermöglicht das Errichten und Betreiben von Windenergieanlagen zunehmend auch in Binnenlandbereichen unserer Republik. Dies war vor einigen Jahren noch nicht so. So konzentrierten sich die Anlagen vor ca. 10 Jahren ausschließlich im Küstenbereich. Mit der technischen Entwicklung und der durch die Politik gegebenen Rahmenbedingungen (Energieeinspeisegesetz, Fördermittel) besteht heute die Möglichkeit, bis weit ins Binnenland hinein Windkraftanlagen wirtschaftlich zu betreiben.

Neben den meteorologischen Merkmalen des Standortes und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen spielt auch eine Reihe von anderen Kriterien eine wesentliche Rolle bei der erfolgten Auswahl eines Standortes zur Windkraftnutzung. Es handelt sich um

- die Möglichkeit der **Verkehrsanbindung** und die Einbindung in das bestehende **Energieverbundnetz**,
- **wirtschaftliche Faktoren**, wie z.B. Bodenpreis und Erschließungsaufwendungen,
- **gesetzliche Vorschriften**, wie Naturschutz und Sicherheitsbestimmungen für Flug, Siedlungen und die unmittelbar betroffene Bevölkerung (Landwirte),
- **Umweltbeeinträchtigungen** durch Lärm, Zerstörung des Landschaftsbildes,
- **Störung** des Fernseh- und Rundfunkempfangs und der Telekommunikation,
- Vogelbrutgebiete von internationaler Bedeutung,
- **Fremdenverkehrsgebiete**,
- **geschlossene Siedlungen**,

Kriterien für Standortwahl

- **Abschattung** der Hauptwindrichtung durch Hindernisse und andere Anlagen (im Windpark),
- **Kleinbiotope**,
- **Naturdenkmale** /5/.

Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Windkraftanlagen ist die Akzeptanz dieser Technik.

Unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten und der territorialen und meteorologischen Bedingungen ist eine Energiebedarfsdeckung von etwa 10 % in den Küstenländern möglich.

#### 1.2.4 Bioenergie

Bei der Bioenergie handelt es sich um eine **weitere sekundäre Form der Sonnenenergie**. Es ist die über die Photosynthese in organischen Substanzen **gespeicherte Energie**. Etwa 0,1 % der einfallenden Sonnenenergie wird in Biomasse umgewandelt.

Der Bestand an Biomasse auf allen Landflächen der Erde beträgt ca.  $2 \cdot 10^{12}$  t, was einem Energiegehalt von rund 1000 Mrd. t SKE entspricht. Nur etwa 10 % dieser Menge wächst jährlich nach und kann damit als regenerativ bezeichnet werden /1/.

Unter **Biomasse** werden **Substanzen und Abfallstoffe von Pflanzen und Lebewesen** verstanden. Durch Verarbeitung oder Verwendung dieser primären Biomasse entsteht als **sekundäre Biomasse**, z. B. Altpapier, Holzabfall, Müll oder Klärschlamm. Damit kann Biomasse eingeteilt werden in:

- **Rückstands-Biomasse**, also den Teil der Biomasse, der bei der nicht-energetischen Nutzung am Ort der Entstehung verbleibt;
- **Abfall-Biomasse**, Reststoffe, die bei einer Umwandlung, Verarbeitung oder Nutzung am Ort des Verbrauchers anfallen;
- **Biomasse** aus so genannten **Energieplantagen**, d. h. Produktionsflächen für Biomasse zu rein energetischen Zwecken. Solche Pflanzungen sind auf längere Sicht, zumindest in der Bundesrepublik, nicht zu erwarten.

Bioenergie

Biomasse

Einteilung der  
Biomasse



Die Potenziale zur Brennstoffherzeugung aus Biomasse zeigt Tabelle 1-2. Zu erkennen ist, dass sich insbesondere die Technologien zur Nutzung fester Brennstoffe und zur Biogaserzeugung anbieten. Der Einsatz von Anlagen hängt in erster Linie vom regionalen Anfall (Verfügbarkeit) der energetisch verwertbaren Biomassen und der Wirtschaftlichkeit (Förderung) ab.

### 1.2.5 Geothermische Energie

Die Temperatur im Erdinnern liegt nach heutiger Schätzung im Bereich von 3000 bis 10000 °C. Zudem entsteht in der Erdkruste **Wärme** durch den **Zerfall** natürlicher **radioaktiver Isotope**. Das Temperaturgefälle zur Erdoberfläche bewirkt einen **Wärmestrom** von im Mittel etwa 0,063 W/m<sup>2</sup>. Infolge dieses Wärmestroms steigt die Temperatur mit zunehmender Tiefe mit dem sog. **geothermischen Temperaturgradienten** von etwa 3 K/100 m an. An einigen Stellen der Erde, den **geothermischen Anomalien**, wird dieser Wert um bis zum vielfachen überschritten. Diese sind insbesondere zur Nutzung der geothermischen Energie geeignet.

Auch die BRD verfügt über solche Anomalien. Diese können nach bisherigen Erkenntnissen aber ausschließlich zu Heizzwecken verwendet werden. Festzustellen ist aber auch, dass mit der Nutzung dieser Energie **keine merklichen Beiträge zur Energieversorgung der BRD** realisiert werden können.

### 1.2.6 Wasserkraft

Die Wasserkraft wird bereits seit ca. 100 Jahren zur **Erzeugung elektrischen Stroms** genutzt. Sie stellt eine **erprobte und bewährte Art der Nutzung** regenerativer Energie dar. Dies trifft insbesondere auf die Nutzung der potentiellen und kinetischen Energie der Binnengewässer zu. In den Industrieländern ist die Wasserkraft in der Regel ausgenutzt.

In den Entwicklungsländern gibt es aber noch große Einsatzpotenziale. Das **weltweite Potenzial** der Wasserkraft liegt in etwa bei 44000 TWh/a (5,5 Mrd. t SKE/a). Etwa ¼ davon sind technisch nutzbar. Zur Zeit werden nur etwa 3210 TWh/a (395 Mio. t SKE/a) weltweit genutzt /1/.

Ursachen

geothermischen  
Temperaturgra-  
dient

Nutzung bei geo-  
thermischen Ano-  
malien

Wasserkraftwerke lassen sich der Bauart nach in

- Kraftwerke zur Nutzung des natürlichen Wasserabzugs
- **Laufwasserkraftwerke**
- **Speicherkraftwerke (Pump-)**
  
- Kraftwerke zur Nutzung der Meeresenergie
- **Gezeitenkraftwerke**
- **Wellenkraftwerke**

Bauarten

einteilen.

Für die BRD stehen auf Grund der gegebenen natürlichen Bedingungen (relativ geringer Tidenhub) Gezeitenkraftwerke nicht zur Diskussion. Die **Entwicklung von Wellenkraftwerken** steckt momentan noch im **Versuchsstadium**, so dass **nur Kraftwerke** zur Nutzung des **natürlichen Abzugs** eingesetzt und betrieben werden können. Dieses Potenzial ist aber bereits fast vollständig ausgeschöpft (ca. 80 %). Eine mögliche Erweiterung ist neben der Wirtschaftlichkeit auch von anderen Randbedingungen abhängig. Umweltschutzgründe spielen dabei eine immer größere Rolle.

### 1.2.7 Umgebungswärme

In der **Außenluft, dem Erdreich und den Gewässern**, aber auch in der **Fortluft** aus Gebäuden und in **Abwässern** aller Art befinden sich **große Mengen fühlbare Wärme** bei allerdings niedrigem und wie Abb. 1-4 zeigt auch stark schwankendem Temperaturniveau. Die Umwandlung dieser Umgebungswärme, die in der Regel von der Sonneneinstrahlung stammt, in höherwertige thermische Energie kann mittels Wärmepumpen erfolgen.

Wärmepumpen

Folgende Medien bieten sich für dieses Energiewandlungsverfahren an:

- **Außenluft**
- **Grundwasser**
- **Erdreich**
- **Oberflächengewässer**
- **künstliche Wärmequellen** (Fortluft, Kühlwasser, Abwasser).

nutzbare Medien

Das Entwicklungspotential der Erschließungstechnik für o.g. Wärmeträger ist groß. Wenn die technischen Systeme weiter verbessert werden, kann die Bedeutung dieser Energiequelle rasch zunehmen.

### 1.2.8 Hybridanlagen

Unter Hybridanlagen versteht man die **sinnvolle Verknüpfung mehrerer Nutzungssysteme** regenerativer Energien mit dem Ziel, die gegebenen Potentiale so zu nutzen, dass abgeschlossene Energieverbraucherstrukturen (Klärwerk) ein Minimum an konventionell erzeugter Energie aus dem Netz beziehen. Verknüpfen lassen sich insbesondere solche Systeme, die durch dasselbe Endprodukt (z. B. Elektrizität) unproblematisch untereinander und mit den vorhandenen Verbrauchern gekoppelt werden können. Eine Hybridanlage ist auf Grund des erforderlichen Energiemanagements nur dann sinnvoll, wenn durch den Einsatz von nur einer regenerativen Energiequelle eine kontinuierliche Versorgung der Verbraucher nicht gewährleistet (z. B. Sonne, Wind), aber durch die Kombination mehrerer durch die nicht zeitgleiche Verfügbarkeit der Einzelquellen eine bessere Kontinuität der Energiebereitstellung erzielt werden kann. Von Vorteil dabei ist der Einsatz von wenigstens einer speicherbaren und dadurch jederzeit abrufbaren Energieform in dem Hybridsystem (wie z. B. Biogas), damit Versorgungsengpässe durch witterungs- und tagesablaufabhängige Energiequellen ausgeglichen werden können.

Hybridanlagen  
Einsatzziel



TEIL 2 (READER):  
WASSERVERSORGUNG / WASSERBESCHAF-  
FUNG / TRINKWASSERAUFBEREITUNG  
TECHNIK DER SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG  
NEUARTIGE SANITÄRSYSTEME -  
ECOLOGICAL SANITATION

Paul Engelke

## Weiterbildendes Fernstudium Master Umweltschutz

### Modul 3: Technischer und Integrativer Umweltschutz (12 Leistungspunkte)

#### Fach: Maschinen und Anlagen in der Umwelttechnik

Für das Fach „Maschinen und Anlagen in der Umwelttechnik“ sind zwei Dozenten verantwortlich:

Dr.-Ing. Roland Matzmohr  
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik/Biotechnologie  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik (MSF)  
Universität Rostock  
Tel.: 0381/498-9435  
Fax: 0381/498-9432  
e-Mail: [roland.matzmohr@uni-rostock.de](mailto:roland.matzmohr@uni-rostock.de)

Dipl.-Ing. Paul Engelke  
Lehrstuhl für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft  
Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Universität Rostock  
Tel.: 0381/498-3467  
Fax: 0381/498-3462  
e-Mail: [paul.engelke@uni-rostock.de](mailto:paul.engelke@uni-rostock.de)

Dabei ist das Fach in fünf Teilgebiete untergliedert:

- 1) Maschinen und Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung (25%) [Matzmohr]
- 2) Maschinen und Anlagen zur Reinigung kontaminierter Böden (25%) [Matzmohr]
- 3) Wasserversorgung / Wasserbeschaffung / Trinkwasseraufbereitung (20%) [Engelke]
- 4) Technik der Siedlungsentwässerung (15%) [Engelke]
- 5) Neuartige Sanitärsysteme – Ecological Sanitation (15%) [Engelke]

Das Fachwissen zu den Teilgebieten von Herrn Matzmohr enthält das Skript „Maschinen und Anlagen der Umwelttechnik“. Das Fachwissen der Teilgebiete „Wasserversorgung / Wasserbeschaffung / Trinkwasseraufbereitung“ und „Technik der Siedlungsentwässerung“ wird anhand von Auszügen aus dem Lehrbuch „Siedlungswasserwirtschaft“ von WILLI GUJER, 3. Auflage, 2007 vermittelt. Die Inhalte zum Teilgebiet „Neuartige Sanitärsysteme – Ecological Sanitation“ sind drei Textdokumenten und einer Powerpointpräsentation zu entnehmen:

- 1) Auszug aus dem Lehrbuch „Siedlungswasserwirtschaft“ von WILLI GUJER, 3. Auflage, 2007: 23 Kleinkläranlagen und alternative Konzepte
- 2) Auszug aus der Diplomarbeit „Ecosan – Eine nachhaltige Lösung für die Sanitärprobleme der Marginalsiedlungen Limas (Peru)?“ von Patrick Oswald, 2007
- 3) Auszug aus DWA-Themen: Neuartige Sanitärsysteme, 2008
- 4) Powerpoint-Präsentation: „NASS – ein anderer Weg in der Abwasserbehandlung“

Eine kurze Einführung in das Gebiet der „Neuartigen Sanitärsysteme“ finden Sie nachfolgend.

# Einführung zu den Neuartigen Sanitärsystemen (NASS)

**Dipl.-Ing. Paul Engelke, Universität Rostock**

Unter dem Begriff „Neuartige Sanitärsysteme“ – kurz: NASS - werden ökologische, kreislauforientierte Systeme zur Abwasserbewirtschaftung und Sanitärversorgung zusammengefasst. Als weitere Synonyme werden in Deutschland die Bezeichnungen „Alternative Sanitärkonzepte“ oder auch „Nachhaltige Sanitärsysteme“ verwendet. Im internationalen Sprachgebrauch findet i.d.R. die Bezeichnung Ecological Sanitation – kurz: Ecosan – Anwendung.

Beim Einsatz von NASS werden Fäkalien und häusliches Abwasser als Wertstoffe betrachtet, welche zurückgewonnen (soweit nötig: aufbereitet) und verwertet werden können. Sie bieten Alternativen zu konventionellen Systemen der Abwasserentsorgung. Damit orientieren sich diese Systeme an einer konsequenten Umsetzung einer Stoffstrom-orientierten Kreislaufwirtschaft.

Daher wird von einer Differenzierung der unterschiedlichen Abwasserteilströme ausgegangen, die aufgrund ihrer Inhaltsstoffe auch jeweils einer anderen Behandlung zugeführt werden. Die übliche Unterscheidung der Teilströme ist wie folgt:

Grauwasser: Häusliches Abwasser aus Küche, Bad, Dusche, Waschmaschine usw.  
(ohne Fäkalien und Urin)

Gelbwasser: Urin aus Urinseparationstoiletten und Urinalen, mit oder ohne Spülwasser

Braunwasser: Fäkalien ohne Urin bzw. Gelbwasser, mit Spülwasser

Schwarzwasser: Fäkalien mit Urin und Spülwasser

Der Grauwasseranteil am gesamten Abwasserstrom stellt volumenmäßig den größten Anteil dar; jedoch sind die meisten Inhaltsstoffe im Grauwasser dem Kohlenstoff zuzurechnen. Dies ermöglicht bei entsprechender Trennung eine relativ einfache Reinigung des größten Abwasseranteils. Im Gegensatz dazu stellt in der konventionellen Abwasserbehandlung die Elimination von Stickstoff und Phosphat aus dem Gesamtabwasser den höchsten Aufwand dar. Wird v.a. das Gelbwasser, was die größten Anteile an Stickstoff und Phosphat beinhaltet, vom restlichen Abwasserstrom herausgehalten, vereinfacht sich die weitergehende Behandlung.

Prämisse ist daher eine möglichst geringe Durchmischung dieser Abwasserteilströme untereinander und eine möglichst geringe Vermischung mit (Spül-)Wasser. Regenwasser sollte soweit wie möglich dezentral genutzt oder versickert werden. Oft ist es sinnvoll, die gemeinsame Verwertung mit Bioabfällen in Erwägung zu ziehen.

NASS ermöglichen eine vollständige oder teilweise Rückführung der in Fäkalien, im Urin und im Grauwasser enthaltenen Nährstoffe als Düngemittel in die Landwirtschaft, einen sparsamen Umgang mit Wasser unter größtmöglicher Wiederverwendung, beispielsweise zur landwirtschaftlichen Bewässerung, und eine Rückgewinnung von Energie, beispielsweise durch Anaerobtechnologie. Eine häufig vorteilhafte Stoffstromtrennung und -konzentration lässt sich durch Urinseparation oder die Trennung von Schwarz- und Grauwasser erreichen. Letztlich führt der Einsatz entsprechender Systeme, wie Komposttoiletten und Pflanzenkläranlagen, zu einer Minimierung der umwelthygienischen Belastung der Gewässer und damit zu einem Rückgang entsprechender wasserbedingter Erkrankungen.

Die drei wesentlichen Wirkungsweisen von NASS- Systemen lassen sich in drei Punkten zusammenfassen:

- 1) Vorsorge statt Nachsorge durch Unterbindung von Vermischungen sowie nachfolgender Verschmutzung der Umwelt (z.B. Reinhaltung von Trinkwasserressourcen)
- 2) Hygienisierung von Urin, Fäkalien und Grauwasser
- 3) Wiederverwendung der (sicheren) Ressourcen (z.B. in der Landwirtschaft, auch anstelle von Mineraldünger)

NASS stellen für viele Entwicklungsländer aufgrund deren spezifisch ökonomischen und ökologischen Bedingungen sowie deren Gesundheitssituation oft die einzigen alternativen Lösungen dar, um Abwasser bzw. Fäkalien effektiv zu behandeln. Zudem ist die stoffliche Verwertung der im Abwasser enthaltenen Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium) und Spurenelemente in der Landwirtschaft insbesondere in den Entwicklungsländern sinnvoll, wo der Einsatz von Mineraldünger unerschwinglich ist. Bei einem bestimmten Grad bestehender oder zu planender Infrastruktur kann der Einsatz einer Biogasanlage durch zusätzliche energetische Nutzung sinnvoll und rentabel sein.

Die Variabilität von NASS und den daraus sich ergebenden modularen Systemkomponenten und -kombinationen bieten ein breites Spektrum an Lösungsmöglichkeiten. Dabei sind High-Tech Lösungen (z.B. Schwarzwasserkreisläufe für aride entwickelte Gebiete) bis zu Low-Tech und Low-Cost Lösungen (z.B. Latrinen mit Trocknung der Fäkalien und Biogasanlagen, die bei einem warmen Klima nicht beheizt werden müssen) möglich.

Durch die Vielzahl der technischen Lösungsmöglichkeiten können nachhaltige Sanitärsysteme sowohl in ländlichen als auch in städtischen Siedlungen wie in Neubaugebieten Anwendung finden. Sie stellen schnell umsetzbare Lösungen bei akutem Handlungsbedarf, einem Wiederaufbau nach



Umweltkatastrophen oder kriegerischen Auseinandersetzungen dar. Hygienische Probleme, die u.a. durch die Verunreinigung von Trinkwasser mit Fäkalien herrühren, können abgestellt werden.

NASS können kostengünstige Lösungen für Entwicklungs- und Schwellenländer sein; hier sind sie zur Reinhaltung der Trinkwasserquellen bzw. zu deren Wiedernutzbarmachung unverzichtbarer Bestandteil einer verantwortungsvollen und effektiven Entwicklungspolitik. In ariden Regionen entwickelter Länder stellen NASS eine sinnvolle Maßnahme zur Wassereinsparung dar.

Über NASS existiert kaum deutschsprachige Literatur, weitergehende Informationen – meist in Englisch – sind unter folgenden Internetadressen zu finden:

<http://www.gtz.de/en/themen/8524.htm>

<http://www.gtz.de/de/themen/umwelt-infrastruktur/wasser/8524.htm>

<http://www.ecosan.org/>

<http://www.susana.org/>

<http://www.tu-harburg.de/aww/>

<http://www.ecosan.at/projects>

<http://www.ecosan.at/de/frameset.htm>

<http://www.ecosanres.org/index.htm>

<http://www.crs.org/ethiopia/ecological-sanitation/>

## Beispielfragen „Neuartige Sanitärsysteme – Ecological Sanitation“

1. Was sind Kleinkläranlagen? Wo kommen diese zum Einsatz?
2. Was ist unter dezentralen Entsorgungskonzepten zu verstehen?
3. Nennen Sie klassische Abwasserbehandlungsanlagen für einen Einsatz im ländlichen Raum!
4. Was sind Neuartige Sanitärsysteme?
5. Warum stoßen konventionelle Abwassertechniken in Schwellen- und Entwicklungsländern an ihre Grenzen?
6. Was sind die Nachteile von konventionellen Abwassersystemen – v.a. in Schwellen- und Entwicklungsländern?
7. Welcher Zusammenhang besteht zwischen gesichertem Trinkwasserzugang sowie Abwassererfassung und -behandlung – v.a. in Schwellen- und Entwicklungsländern?
8. Wie funktioniert eine Trockentoilette? Welche Varianten/Ausführungen gibt es?
9. Welche Möglichkeiten bestehen zur Behandlung von Schwarz- und Braunwasser?
10. Erläutern Sie die Abwasserteilströme / Stoffströme sowie deren Anteile und Inhalte!
11. Was sind die Grundprinzipien der NASS?
12. Wie kann Gelbwasser behandelt und verwendet werden?
13. Was sind die drei wesentlichen Wirkungsweisen von NASS?
14. Wann kommen Vakuumtoiletten zum Einsatz?
15. Was ist unter Teilstromerfassung zu verstehen?
16. Wie können die unterschiedlichen Abwasserteilströme erfasst werden?
17. Welche Behandlung von Grauwasser ist am sinnvollsten?
18. Erklären Sie den Schwarzwasserkreislauf!
19. Was ist ein Grauwasserkreislauf?
20. Wann sind Schwarz- und Grauwasserkreislauf sinnvoll?
21. Was sind Trockensysteme mit Urinsortierung?
22. In welchen Gebieten sind NASS besonders wirkungsvoll?
23. Welche Verfahren der NASS sind in unterentwickelten Ländern/Gebieten sinnvoll?

24. Was ist unter „Arbor loos“ zu verstehen?
25. Wie erfolgt die stoffliche Nutzung von Produkten aus NASS?
26. Was ist ein Grauwassergarten?
27. Wieso kommen Doppelkammerlatrinen zum Einsatz?
28. Was sind die Vorteile von NASS gegenüber konventionellen Systemen in Schwellen- und Entwicklungsländern?
29. Wieso ist für einen erfolgreichen Einsatz von NASS in Schwellen- und Entwicklungsländern Aufklärungsarbeit so bedeutend? Was muss diese berücksichtigen?
30. Welche Faktoren sind für eine erfolgreiche Umsetzung von NASS-Projekten in Schwellen- und Entwicklungsländern wichtig?

# 7 Wasserversorgung

*Die Versorgung mit dem Lebensmittel Trinkwasser spielt in der Entwicklung unserer Gesellschaft eine zentrale Rolle: Möglichkeiten zu Hygiene, Komfort und Arbeitserleichterung sind Grundlagen der urbanen Gesellschaft. Obwohl die Wasserversorgung eine lange und erfolgreiche Tradition hat, müssen wir ihre weitere Entwicklung sorgfältig pflegen.*

## 7.1 Ziele der Wasserversorgung

Ziel der Wasserversorgung ist, den angeschlossenen Verbrauchern wirtschaftlich genügend Wasser mit einwandfreier hygienischer, chemischer und physikalischer Qualität und mit einem genügenden Druck langfristig gesichert zur Verfügung zu stellen. Eventuell muss die Wasserversorgung der Feuerwehr zusätzlich eine genügende Reserve von Wasser zu Löschzwecken bereitstellen und bei Bedarf anliefern können.

*Genügend Wasser* heisst nicht beliebig viel Wasser, sondern es ist durch geeignete, nicht nur bauliche und technische Massnahmen, sondern auch Tarifgestaltung und Information dafür zu sorgen, dass sich die Entwicklung des Bedarfs von Wasser mit dem Angebot von Wasser befriedigen lässt. Zudem soll die Wasserversorgung sorgfältig mit den eingesetzten Ressourcen umgehen: Personal, Grundwasser, Quellen, Baumaterialien, Energie, Betriebsmittel, Finanzen etc.

Ein Problem der Wasserversorgung ist, dass sie den momentanen Wasserverbrauch nicht über eine verringerte Einspeisung von Wasser ins Netz beschränken kann: Bei übermässigem Verbrauch fällt der Druck im Netz ab; das kann dazu führen, dass in den Verteilleitungen Unterdruck entsteht, mit der Gefahr, dass hygienisch nicht einwandfreies Wasser von aussen ins Netz zurückgesaugt wird. Im täglichen Betrieb muss daher die Wasserversorgung immer versuchen, den Bedarf abzudecken – längerfristig kann sie aber den Verbrauch durch Information, Beratung und Tarife beeinflussen. Notfalls sind auch kurzfristige Verbote von einzelnen Wassernutzungen (Garten, Swimmingpools etc.) möglich.

---

### Beispiel 7.1. Extremer Wasserbedarf

Der Ausbau vieler Wasserversorgungen in der Schweiz beruft sich auf den einmaligen, extremen Wasserverbrauch an wenigen Tagen im Juni 1976. Damals hat eine lange und heisse Trockenperiode den Verbrauch stark gefördert (Abb. 5.2).

Ist es sinnvoll, Anlagen zur Verfügung zu stellen, die einmal alle 20 Jahre voll beansprucht werden? Was sind die Grenzkosten des zusätzlichen Wasserbedarfes an diesen Tagen? Wären die Verbraucher bereit diese Grenzkosten zu bezahlen, wenn sie

explizit verrechnet würden? Gibt es Möglichkeiten den maximalen Bedarf zu beschränken?

### **Beispiel 7.2.** Auftrag an die Wasserversorgung

Eine Grossstadt hat den politischen Auftrag an den Direktor der Wasserversorgung wie folgt formuliert: Die Wasserversorgung soll jederzeit genügend Trinkwasser von guter Qualität und mit genügendem Druck liefern.

*Ist diese Formulierung sinnvoll?*

*Jederzeit:* Was soll in Krisensituationen, bei extremer Trockenheit, bei stark verunreinigter Wasserquelle etc. geschehen?

*Wieviel Wasser ist genügend?* Im Normalfall, bei langer Trockenheit (z.B. für die Bewässerung von Gärten?), im Notfall für die ersten 48 h, 2 Wochen, ...? Darf ein Bewässerungsverbot ausgesprochen werden? Werden die Politiker die Wasserversorgung unterstützen, wenn es gilt, unpopuläre Einschränkungen durchzusetzen?

*Gute Qualität* heisst Trinkwasser- oder Lebensmittelqualität. Nur in Ausnahmefällen, wenn die Bevölkerung informiert ist, genügt für kurze Zeit „trinkbares Wasser“, das wohl hygienisch einwandfrei ist, aber nicht über längere Zeit genossen werden soll. In Anbetracht der Gefahren, die hygienisch belastetes Wasser für die Bevölkerung darstellt, ist diese Forderung in Grossstädten sicher gerechtfertigt. In ländlichen Verhältnissen kommt es immer wieder vor, dass in extremen Ausnahmesituationen die Bevölkerung über beschränkte Dauer aufgefordert wird, das Wasser abzukochen.

Der oben formulierte Auftrag muss relativiert und interpretiert werden – das ist auch eine politische Aufgabe.

---

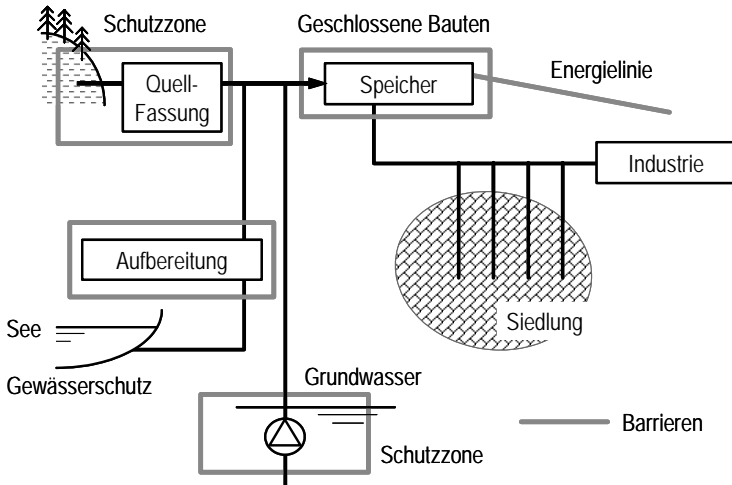
## **7.2 Mittel der Wasserversorgung**

*Hier wird vorerst ein Überblick über die Mittel der Wasserversorgung gegeben, die anschliessend umfassender diskutiert werden.*

In Industrienationen hat die Wasserversorgung das primäre Ziel, den angeschlossenen Verbrauchern genügend Wasser mit einwandfreier *hygienischer, chemischer und physikalischer Qualität* zur Verfügung zu stellen. Während die chemische und die physikalische (z.B. Temperatur, Farbe, Trübung) Qualität des Wassers weitgehend durch die Wasserressource (Quelle, Grundwasser, See) und die Art der Aufbereitung bestimmt werden, bedingt die Sicherung der hygienischen Qualität zusätzlich, dass zwischen dem Wasser und der Umwelt eine *dauernde und dichte Barriere* errichtet wird: Schon geringe Mengen von pathogenen Keimen können mit dem Wasser als Transportmittel Krankheiten und Seuchen verbreiten.

In den Industrienationen mit modernen, zentralen, öffentlichen Wasserversorgungen wird das *Konzept der Barrieren* zwischen dem einwandfreien Trinkwasser und der möglicherweise kontaminierten Umwelt nahezu perfektioniert (Abb. 7.1). Dadurch wird eine hohe Sicherheit erreicht, dass pathogene Keime nicht ins Trinkwasser eindringen und es hygienisch beeinträchtigen können. Das Konzept der Barrieren beinhaltet die folgenden Elemente:

- Die Wasserressource (Quellen, Grundwasser, Seen) wird durch *Schutzzonen* weitestgehend vor Kontamination geschützt, sodass das beschaffte Wasser von bestmöglicher Qualität ist. Die *Barriere* wird hier errichtet, indem dem Wasser



**Abb. 7.1.** Schematische Darstellung der Anlagen einer Wasserversorgung und Identifikation der Barrieren gegen das Eindringen von pathogenen Keimen

im Boden genügend Zeit zur Verfügung gestellt wird, sodass natürliche Selbstreinigungsprozesse das Wasser schützen können.

- Die *Aufbereitung* von Trinkwasser wird dort erforderlich, wo die Wasserressource nicht genügend von Umwelteinflüssen geschützt werden kann. Sie hat zur Aufgabe, die erforderliche hygienische, chemische und physikalische Qualität des Wassers herzustellen. Die Trinkwasseraufbereitung stellt die *Barriere* zwischen Rohwasser (Umwelt) und Trinkwasser dar.
- Bauwerke wie Wasserspeicher, Aufbereitungsanlagen, Pumpwerke etc. werden so gestaltet, dass keine hygienischen Probleme entstehen sollten.
- Die letzte *Barriere* ist ein positiver *Druckunterschied* (oder Energiegradient) zwischen dem einwandfreien Wasser und der möglicherweise kontaminierten Umwelt. Die Tatsache, dass zwischen Trinkwasser und Umwelt ein Druckunterschied herrscht, bestätigt uns einerseits, dass die physikalische Barriere (die Wände der Verteilungen) dicht ist. Andererseits stellt dieser Druckunterschied sicher, dass keine (unbeabsichtigten) Kontaminationen des Wassers möglich sind.

Die Aufgabe, ein weit verzweigtes Netz von Wasserversorgungsleitungen dauernd und sicher von der Umwelt abzutrennen, ist mit der modernen Wasserversorgung mit Druckleitungen technisch überzeugend und vermutlich optimal gelöst worden. Ob wir auch in Zukunft diesen hohen Standard aufrechterhalten können, muss sich zeigen. Kritisches Element in diesem System sind die Hausinstallationen (Beispiel 7.4).

### Beispiel 7.3. Alternative Barrieren in der Wasserversorgung

Im Laufe der Geschichte sind unterschiedliche Systeme entwickelt worden, die dem Ziel unserer Wasserversorgung mindestens teilweise gerecht werden:

Die Römer haben offene Aquädukte erstellt, die sie z.T. militärisch schützen mussten: *Soldaten als Barriere*.

Im Mittelalter wurde Wasser weitgehend aus Brunnen geschöpft. Die *Barriere* bestand darin, dass „Brunnenvergifter“ mit dem Tode bestraft wurden.

In den USA wird in Landstrichen mit geringer Bevölkerungsdichte das Grundwasser einzeln, für jedes Haus gefördert. Die *Barriere* besteht in lokalen Schutzabständen zwischen Abwasserversickerung und Trinkwasserförderung (also kleinen lokalen Schutz-zonen), die sicherstellen, dass keine Kontamination des Trinkwassers erfolgt. Dieses System ist offensichtlich nur bei geringer Bevölkerungsdichte möglich.

In den südlichen Ländern Europas wird Trinkwasser häufig aus gekauften, hygienisch einwandfreien Flaschen getrunken. Die Wasserversorgung gewährleistet hier nicht, dass das angelieferte Wasser hygienisch einwandfrei ist. Das Wasser kann aber zum Kochen, für die persönliche Hygiene etc. Verwendung finden. Die *Barriere* ist hier Teil der Kultur und besteht im Bewusstsein der Bevölkerung, dass Leitungswasser kein Trinkwasser ist.

#### **Beispiel 7.4.** Hausinstallationen, eine Anekdote

Die Dame im obersten Stock eines Dreifamilienhauses genoss öfter zwischen 22 und 24 Uhr ein Vollbad. Um die Geräusentwicklung zu vermindern, legte sie zum Füllen die Duschebrause in die Wanne. Doch die Badegeräusche übertrugen sich in der altertümlichen Installation auf die beiden darunterliegenden Wohnungen und verärgerten die übrigen Bewohner.

Um der Frau eine Lektion zu erteilen, stellten diese eines Nachts, als sie wiederum ihr Bad füllte, kurzerhand den Haupthahn ab. Die Frau badete mit dem vorhandenen Wasser. Um die Mitbewohner nicht zu stören, liess sie die Wanne nicht auslaufen.

Dass mit dem Wasser etwas nicht in Ordnung war, merkten die Mitbewohner erst, als sie in ihrem Morgenkaffee einen merkwürdig seifigen Geschmack feststellten. Die Untersuchung ergab, dass sie nach ihrer nächtlichen Aktion vergessen hatten, den Haupthahn wieder zu öffnen. Für ihre Morgentoilette und den Kaffee hatten sie trotzdem genügend Wasser, denn dieses floss durch die im Bad liegende Duschebrause in das Hausnetz zurück.

*Anonymus*

---

Eine moderne Wasserversorgung setzt sich aus den nachfolgend aufgeführten technischen Elementen zusammen, wobei diese immer wieder in Beziehung zur Barriere zwischen der Umwelt und dem Trinkwasser stehen. Es sind unterschiedliche Ingenieurdisziplinen, die sich mit den Konzepten und der Realisierung der verschiedenen Elemente befassen. Damit der Dialog zwischen diesen Disziplinen fruchtbar wird, müssen alle einen Überblick über das Ganze und ein Verständnis für die Bedeutung und Funktion der Einzelteile erarbeiten.

### **7.2.1 Wasserbeschaffung**

Trinkwasser wird in Westeuropa v.a. aus Quell-, Grund- und Seewasser zu Trinkwasser aufbereitet. Flusswasser wird meist über künstliche Grundwasseranreicherung aufbereitet.

Eine zuverlässige Wasserbeschaffung bedingt ein Verständnis einerseits für die Eigenheiten und den Schutz der Wasserressource (Hydrologie, Hydrogeologie bei Grundwasser und Quellen, Limnologie bei Seen und Fließgewässern) und andererseits für die technische Gestaltung der Wasserfassung.

Die meisten Wasserversorgungen beruhen nicht nur auf einer einzigen Wasserressource, sondern es stehen mehrere Wasserquellen zur Verfügung (z.B. Quell- und Grundwasser). Zudem sind viele Wasserversorgungen in Verbundnetzen zusammengeschlossen, sodass nach Ausfallen einer Bezugsquelle schnell Ersatz geschaffen werden kann.

### **7.2.2 Schutzzonen**

Um die Beschaffung von Trinkwasser dauerhaft zu gewährleisten, werden in der Umgebung von Wasserfassungen Schutzzonen ausgedehnt, in denen je nach Situation gewisse Aktivitäten (Bauen, Landwirtschaft, Industrie, Verkehr...) verboten oder eingeschränkt sind (Hydrogeologie). Zudem müssen die Rechte an der Ressource (Quelle, Grundwasser) und der Schutzzone gesichert werden (Grundbuch).

### **7.2.3 Wasseraufbereitung**

Häufig hat das Rohwasser nach der Fassung keine einwandfreie Trinkwasserqualität und muss vorerst aufbereitet werden. Die Aufbereitung reicht von einer einfachen Desinfektion zur Erreichung einer genügenden hygienischen Qualität bis zur anspruchsvollen, mehrstufigen Trinkwasseraufbereitung, die auch die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wassers verändert (Verfahrenstechnik).

### **7.2.4 Pumpwerke**

Es gibt in der Wasserversorgung unterschiedlichste Arten von Pumpwerken, z.B. zur Förderung von Wasser in Grundwasserbrunnen, in Aufbereitungsanlagen etc. Von besonderer Bedeutung sind die Pumpwerke, die den Betriebsdruck im Verteilnetz herstellen und aufrechterhalten – sie sind häufig die grössten Verbraucher von Energie (Maschinenbau). Pumpwerke liefern die potentielle Energie ins Wasser, die nachher in Form von Wasserdruck zur Verfügung steht und die Energiebarriere gewährleistet.

### **7.2.5 Wasserspeicherung**

Aus verschiedensten Gründen ergeben sich Unterschiede zwischen dem momentanen Wasserangebot (Input) und dem Wasserbedarf (Output). Da die Verteilnetze immer voll sind, muss zum Ausgleich dieser Unterschiede ein Element mit variablem Volumen zur Verfügung stehen: Trinkwasserspeicher, Reservoirs (Bauingenieure).

Trinkwasserspeicher stellen einwandfreies Trinkwasser mit potentieller Energie zur Verfügung, sodass das Wasser ohne zusätzliches Pumpen ins Verteilnetz geliefert werden kann.

### **7.2.6 Wasserverteilung**

Die Verteilung von Wasser im Versorgungsgebiet mit Hilfe von Druckleitungen ist das anfälligste Element der Wasserversorgung: Das weit verzweigte, komplexe



Netzwerk von Leitungen muss so gestaltet werden, dass es hohen Ansprüchen in Bezug auf Sicherheit und Verfügbarkeit genügt (Bauingenieure).

### **Druck- und Energieverluste**

Druck oder potentielle Energie hält die wichtigste Barriere zwischen Trinkwasser und Umwelt aufrecht. Der Verlust dieser Energie, z.B. im Zusammenhang mit dem Transport von Trinkwasser oder als Folge von Havarien, ist daher von grösster Bedeutung: Die Abschätzung von Energieverlusten unter verschiedensten Betriebszuständen der Verteilnetze ist eine der wichtigen Aufgaben der Ingenieurin (Hydraulik).

### **Vermaschte Netze**

Lineare oder verästelte Netze sind anfällig auf Störungen: Jeder Unterbruch einer wichtigen Leitung führt dazu, dass die Versorgung eines ganzen Quartiers unterbrochen wird. Mit Hilfe von vermaschten Netzen (Ringleitungen) kann gewährleistet werden, dass Unterbrüche in der Versorgung auf kleine Gebiete begrenzt werden können. Vermaschte Netze weisen eine hohe Versorgungssicherheit auf.

---

#### **Beispiel 7.5.** Hydraulisch unbestimmte Systeme

Nicht vermaschte Systeme sind analog zu einem statisch bestimmten System in der Baustatik: Das Versagen eines Leitungsstrangs oder Tragwerkteils führt notgedrungen zum Versagen mindestens eines Teils des Systems.

Vermaschte Systeme sind analog einem statisch unbestimmten System: Der Ausfall eines Leitungsstrangs (oder Tragwerkteils) muss nicht notgedrungen zum Versagen des Systems führen.

Die Iterationsmethode von Hardy Cross wurde entsprechend sowohl in der Statik als auch in der Wasserversorgung zur Berechnung von statisch unbestimmten oder hydraulisch vermaschten Systemen verwendet.

---

## **7.2.7 Hausinstallationen**

Die Hausinstallationen stellen das „offene“ Ende der Wasserverteilung und einen neuralgischen Punkt der Wasserversorgung dar. Ohne spezielle Vorkehrungen kann der Rückfluss von Wasser über Hausinstallationen in die Versorgungsleitungen kaum vermieden werden (Beispiel 7.4). Die Wasserwerke verlangen daher die Installation von Armaturen, die den Rückfluss aus Hausinstallationen ins Netz verhindern (Sanitärinstallateure).

## **7.2.8 Überwachung**

Wasserressourcen und Wasserversorgungen müssen überwacht werden. Dabei kommen biologische, mikrobiologische, chemische und physikalische Analysemethoden zur Anwendung. Insbesondere die chemische Analytik von Spurenstoffen ist anspruchsvoll und bedingt entsprechende Fachkompetenz (Analytiker, Chemiker, Mikrobiologen, Biologen, Limnologen).

## **7.2.9 Administration, Finanzplanung**

Entsprechend der langen Lebenserwartung vieler Anlagen in den Wasserversorgungen sind diese sehr kapitalintensiv. Die Kosten werden grösstenteils über den gemessenen Verbrauch verrechnet. Ohne geeignete Finanzplanung ist die Entwicklung einer Wasserversorgung gefährdet (Management, Betriebswirtschaft).

### **7.2.10 Planung**

Die Anlagen einer Wasserversorgung haben eine grosse Lebenserwartung (bis 80 und mehr Jahre), ihre einzelnen Elemente (Beschaffung, Aufbereitung, Speicherung, Förderung, Verteilung, etc.) werden aber verteilt über viele Jahrzehnte als Einzelbauwerke erstellt. Damit ein funktionierendes und effizientes Ganzes entsteht, müssen diese Anlagen langfristig geplant und aufeinander abgestimmt werden. Das entsprechende Werkzeug sind generelle Wasserversorgungspläne, die auch die Siedlungsplanung mit berücksichtigen (Siedlungswasserwirtschaftler).



# UNIVERSITÄT ROSTOCK

---

Weiterbildendes Fernstudium Umweltschutz

Bioenergie

Michael Nelles  
Nils Engler  
Andrea Schüch

---

Zentrum für Qualitätssicherung in Studium und Weiterbildung

---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	7
1.1 Klimawandel	7
1.2 Reichweite fossiler Energieträger	8
1.3 Nachhaltigkeit	11
1.4 Begriffsbestimmung Bioenergie und Biomasse	12
1.4.1 Bioenergie	12
1.4.2 Biomasse	13
1.4.3 Anbaubiomasse / Nachwachsende Rohstoffe	13
1.4.4 Abfallbiomasse / organische Abfälle und Reststoffe	13
2 Klimaschutzziele	15
3 Gesetze, Verordnungen zur Thematik Bioenergie	17
3.1 Nachhaltigkeitsrichtlinien/Verordnungen (EU und Deutschland)	17
3.2 Emissionshandels-Versteigerungsverordnung	18
3.3 Gesetz über den Vorang erneuerbarer Energien (EEG)	19
3.4 Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG)	23
4 Stand der energetischen Nutzung von Biomasse	25
5 Energetisches Potenzial von Biomasse	29
5.1 Potenzial biogener Reststoffe	29
5.2 Potenzial nachwachsender Rohstoffe	31
6 Optionen der Bereitstellung von Energie aus Biomasse	35
7 Feste Bioenergieträger	39
7.1 Stand der Wärmebereitstellung aus festen Bioenergieträger in Deutschland	39
7.2 Aufbereitungsverfahren für feste Biomasse zur Bereitstellung von Festbrennstoffen sowie Brennstoffeigenschaften; Brennwert und Heizwert	41

7.3	Energetische Verwertung von Altholz .....	42
7.4	Anlagentechnik zur thermischen Nutzung fester Bioenergieträger .....	44
8	Flüssige Bioenergieträger .....	47
9	Gasförmige Bioenergieträger .....	55
9.1	Anteil der Energiebereitstellung durch gasförmige Bioenergieträger ....	55
9.2	Erzeugung von gasförmigen Bioenergieträgern .....	55
9.2.1	Grundlagen der Biogasbildung - Methangärung .....	56
9.2.2	Charakterisierung von Biogasausgangssubstraten .....	62
9.2.3	Substrataufbereitung .....	65
9.2.4	Eigenschaften von Biogas .....	66
9.2.5	Biogasaufbereitung .....	67
9.2.6	Biogasanlagensteuerung, -betrieb und –technik .....	70
9.3	Nutzung gasförmiger Bioenergieträger .....	83
10	Bioenergiekonzepte und Möglichkeiten des regionalen Stoffstrommanagements .....	85
11	Perspektiven der energetischen Nutzung von Biomasse .....	91
12	Aktuelle Entwicklungen .....	93
13	Literaturangaben .....	97
14	Anhang .....	103
15	Abbildungsverzeichnis .....	105
16	Tabellenverzeichnis .....	107

---

## Vorwort

Eine der wichtigsten globalen Zukunftsaufgaben ist die Sicherstellung einer nachhaltigen, d.h. ökonomisch, ökologisch und sozial tragfähigen Energieversorgung. Die aktuelle Energieversorgung weltweit und in Deutschland stützt sich zu rund 90 % auf fossile Energieträger und dies muss sich möglichst schnell ändern. Das von der Europäischen Kommission im Januar 2008 verabschiedete Paket soll bis 2020 die Treibhausgasemissionen um mindestens 20 % reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Gesamtenergieverbrauch auf 20 % erhöhen.

Die von der Bundesregierung angestrebten 25 bis 30 % erneuerbarer Energien am Primärenergiebedarf (PEV) bis zum Jahr 2020 lassen sich nur durch die Summe aller Maßnahmen zur Energieeinsparung, Effizienzsteigerung bei der Energiebereitstellung und dem Ausbau der erneuerbaren Energien erreichen. Der Anteil der Bioenergie an der Energieerzeugung aus EE liegt derzeit bei rund 70 %. Die energetische Nutzung von Biomasse ist somit der wichtigste EE-Träger und unter Beachtung von Nachhaltigkeitskriterien ein wesentliches Element zur Erreichung der genannten Ziele.

Die Bioenergie bietet von den erneuerbaren Energien die vielseitigsten Optionen der Energiebereitstellung. Für die energetische Nutzung von Biomasse stehen diverse Aufbereitungs- und Umwandlungsverfahren zur Verfügung, wodurch feste, flüssige oder gasförmige Energieträger gewonnen werden können. Die energetische Nutzung von Biomasse entwickelt sich derzeit sowohl in Deutschland als auch weltweit sehr dynamisch. Dies ist neben den klimapolitischen Vorgaben auf die zu erwartende Verteuerung von Ressourcen und Energieträgern zurückzuführen und darüber können auch die derzeit günstigen Marktpreise aufgrund der aktuellen Wirtschaftskrise nicht hinweg täuschen.

Mittelfristig, d.h. bis 2020 bzw. 2030 kann man von einem realisierbaren Bioenergieanteil von etwa 15 % am PEV in Deutschland ausgehen, wobei ca. 1/3 über die energetische Verwertung von organischen Abfällen und Reststoffen sichergestellt werden kann. Der große ökologische Vorteil liegt darin, dass diese nicht wie die Substrate für die NaWaRo-Bioenergieanlagen auf landwirtschaftlichen Flächen „zusätzlich“ angebaut werden müssen.

Eine große Gruppe der Biomasse-Energieträger bilden biogene Reststoffe wie Altholz, Industrierestholz, Waldrestholz, biogene Abfall- und Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie, Zoomasse-Reststoffe (Tiermehl, Tierfett), biogener Anteil des Restmülls (Anteil bei Verbrennung, Deponiegas oder Biogas bei gezielter Vergärung), getrennt ge-

sammelte Bioabfälle und auch Klärschlämme, sofern sie für eine weitergehende energetische Nutzung geeignet sind. Meist wird auch Stroh, das nicht im landwirtschaftlichen Prozess verwendet wird, in diese Gruppe eingeordnet. In dem Gutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen der Bundesregierung aus dem Jahr 2007 wird von ca. 100 Mio. Mg Abfallbiomasse ausgegangen, von der ca. 70 Mio. Mg technisch und ökologisch sinnvoll nutzbar sind. Durch diese Abfallbiomasse könnten 4 bis 5 % des Primärenergiebedarfs gedeckt werden.

Dieses Potenzial ist aber bisher erst zu etwa 50 % erschlossen, so dass hier noch erheblicher Handlungsbedarf besteht. Die Steigerung der energetischen Nutzung von Abfallbiomasse durch die Erhöhung der Effizienz vorhandener Anlagen (z.B. KWK), der Ergänzung vorhandener Anlagen (z.B. Ergänzung von Kompostwerken und MBA durch Vergärungsstufen) und der Steigerung des Erfassungsgrades für biogene Abfall- und Reststoffe (z.B. getrennt gesammelte Bioabfälle, Grünschnitt) sind nur beispielhafte Maßnahmen, die bereits bundesweit geplant und umgesetzt werden.

Die Optimierung der energetischen Verwertung von organischen Abfällen und Reststoffen setzt aber voraus, dass die bisher weitgehend getrennt agierenden Bereiche Landwirtschaft, Energiewirtschaft und Abfallwirtschaft viel enger zusammenarbeiten. Hierzu gibt es bereits erste gute Ansätze aber es liegt noch ein weiter Weg vor uns. Forschungs- und Optimierungsbedarf besteht fast auf allen Ebenen der jeweiligen Bioenergie-Wertschöpfungsketten, so dass hier neben den Anlagenbauern und –betreibern insbesondere die F&E-Institutionen gefragt sind.

Die künftige Energieversorgung ist eine der wichtigsten globalen und damit auch regionalen Zukunftsaufgaben. Insbesondere im Bereich „Bioenergie – energetische und stoffliche Verwertung von Biomasse“ besteht eine langfristige nationale und internationale Forschungsrelevanz und die Zeitgemäßheit ist weit über das Jahr 2019 hinaus gegeben.

Der vorliegende Lehrbrief bietet einen Einstieg in die breitgefächerte Thematik Bioenergie. Es sollen Grundlagen vermittelt werden und so zu einem besseren Grundverständnis zur energetischen Nutzung von Anbau- und Abfallbiomasse beigetragen werden.

Prof. Michael Nelles und Dr. Andrea Schüch

Lehrstuhl Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Rostock im März 2010

# 1 Einleitung

Die energetische Nutzung von Biomasse entwickelt sich derzeit sowohl in Deutschland als auch weltweit sehr dynamisch. Dies ist zum einen auf die Verteuerung und der begrenzten Reichweite von Ressourcen und Energieträgern zurückzuführen, aber auch auf die in der EU beschlossenen verbindlichen Vorgaben zum Klima- und Ressourcenschutz.

Der Anteil der Biomasse an der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien (EE) beträgt derzeit rund 70 %. Das technische Bioenergiepotenzial bis zum Jahr 2030 wird auf ca. 10 bis 15 % des Primärenergieverbrauchs geschätzt. Die umfassende energetische Nutzung der biogenen Abfälle und Reststoffe kann einen wichtigen Beitrag leisten, dieses Potenzial zu erschließen.

*Bioenergieanteil an EE 70% in Deutschland*

## 1.1 Klimawandel

Kernaussagen der IPCC-Studie von 2007: Der Klimawandel ist eindeutig. Die globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen sind im Zeitraum von 1970 bis 2004 um 70%, die CO<sub>2</sub>-Emissionen sogar um 80% gestiegen, wobei sich die Zunahme in den letzten zehn Jahren beschleunigt hat. Die Kohlendioxidintensität in der weltweiten Energieversorgung nimmt wieder zu – der langfristig abnehmende Trend kehrte sich nach dem Jahr 2000 um. Die globalen Treibhausgas(THG)-Konzentrationen haben seit 1750 deutlich zugenommen und übersteigen heute bei weitem die jahrtausendlang aufgetretenen vorindustriellen Werte. Menschliche Aktivitäten führten seit 1750 im Nettoeffekt im globalen Mittel zur Erwärmung, wobei der größte Anteil des seit Mitte des 20. Jahrhunderts beobachteten Anstieges der globalen Durchschnittstemperaturen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die beobachtete Zunahme der anthropogenen THG-Konzentrationen zurückzuführen ist. Menschliche Aktivitäten können heute dabei für alle größeren Kontinente als Ursache nachgewiesen werden.

*Klimawandel ist eindeutig*

Die Folgen sind bereits nachweisbar und weit verbreitet, in vielen Fällen können sie auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt werden. Laut der IPCC-Studie von 2007 steht zu befürchten, daß wenn die globale Durchschnittstemperatur um 2 - 3 °C gegenüber vorindustriellen Werten ansteigt:

- 20 - 30% der Pflanzen- und Tierarten vom Aussterben bedroht sind, (z.B. durch weitere Ansäuerung der Meere, geringere Sauerstoffbindung im wärmerem Wasser, Änderung des Salzgehaltes...)

*mögliche Folgen des Klimawandel*



- das Risiko extremer Wetterereignisse weiter zunimmt

Risiken grossskaliger, irreversibler Klimafolgen sind laut dieser Studie:

- Mit hoher Sicherheit ein Anstieg des Meeresspiegels allein durch thermische Expansion, der weit über den im 20. Jahrhundert beobachteten hinaus geht
- Das Risiko des Meeresspiegelanstiegs durch Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes ist wahrscheinlich höher als bisherige Modelle voraussagen

Bereits im Jahr 1992 wurden folgende Ziele der Klimarahmenkonvention (Artikel 2) formuliert:

- „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird.“
- „Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise anpassen können, die Nahrungsmittelproduktion nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung **auf nachhaltige Weise** fortgeführt werden kann.“

Wissenschaftler gehen davon aus, dass die kommenden Klimaänderungen noch beherrschbar sind bzw. dass es noch möglich ist sich daran anzupassen, wenn der globale Temperaturanstieg auf 2°C gegenüber vorindustrieller Zeit begrenzt wird. Zwischen 1906 und 2005 stieg die globale bodennahe Mitteltemperatur um 0,74 °C an, was bedeutet, dass die globale Mitteltemperatur zukünftig nicht mehr als 1,2 °C ansteigen darf.

*Begrenzung des  
Temperaturanstiegs  
notwendig*

Um diese Grenze mit 75 % Wahrscheinlichkeit einzuhalten, muss sich die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre auf 400 ppmv CO<sub>2</sub>-Äquivalenten stabilisieren. Dazu muss der Zuwachs der globalen Treibhausgas-Emissionen bis 2020 gestoppt werden und anschließend bis zum Jahr 2050 um 50 % gegenüber 1990 sinken, d.h. um 60 % der heutigen Werte (IPCC 2007).

## 1.2 Reichweite fossiler Energieträger

Ein weiterer Grund sich mit erneuerbaren Energien auseinanderzusetzen, ist die Reichweite fossiler Energieträger. Auf der einen Seite steigt der Energieverbrauch durch Bevölkerungswachstum und der fortschrei-

tenden Industrialisierung immer weiter an. Auf der anderen Seite ist die Reichteite konventioneller fossiler Energieträger begrenzt. Zwar entwickeln sich Fördertechnologien weiter und es werden auch neue Vorkommen erkundet, die Bereitstellung wird aber immer aufwendiger und kostenintensiver. So wird für Erdöl eine Reichweite von ca. 40 Jahren prognostiziert (mit konventionellen Methoden gefördert). Ebenso sind die Energieträger Erdgas und Natururan in absehbarer Zeit erschöpft. Lediglich für die Vorkommen an Braun- und Steinkohle wird eine Reichweite von 200 Jahre prognostiziert (Abb. 2).

Die aktuelle Energieversorgung weltweit und in Deutschland stützt sich derzeit zu ca. 90 % auf fossile Energieträger (Welt 2003: 87 %, Deutschland 2006: 94 %), was aufgrund der Ressourcenendlichkeit und des durch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß verursachten Klimawandels nicht aufrechterhalten werden kann. Die Energieversorgungsstruktur unterliegt derzeit aber auch aufgrund der Liberalisierung des Energiemarktes und der Verfügbarkeit neuer Technologien einem raschen Wandel.

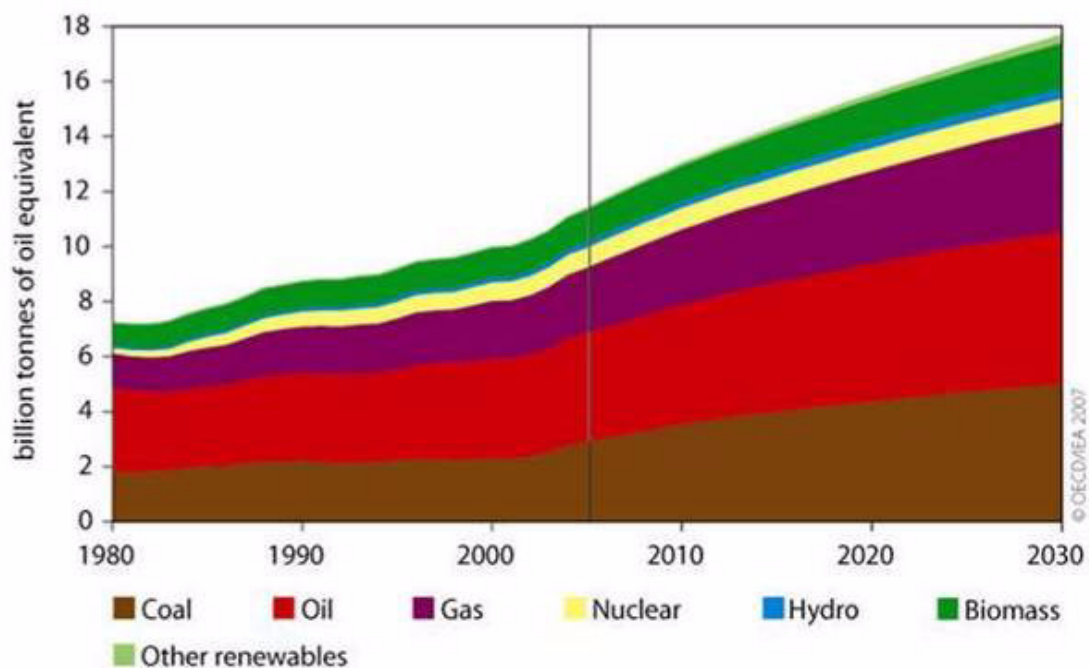


Abb. 1: Entwicklung und Projektion des Weltenergieverbrauchs (World Energy Outlook 2007, Reference scenario)

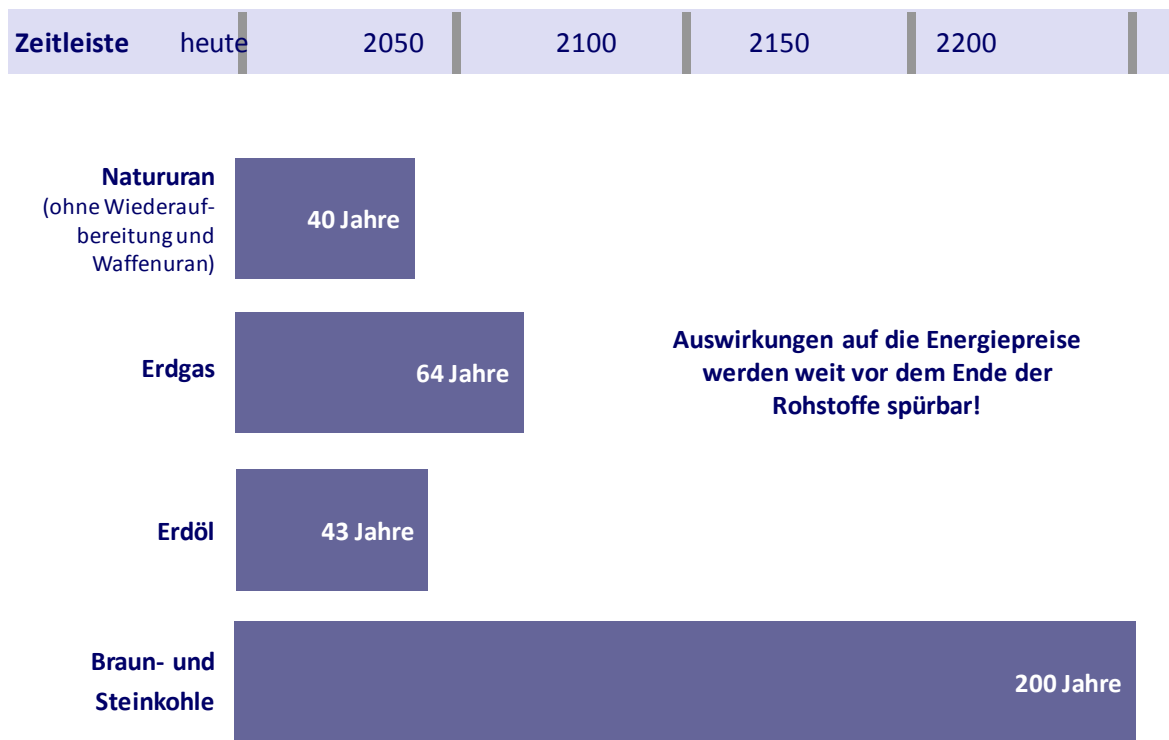


Abb. 2: Reichweite fossiler Ressourcen (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2005)

Eine **nachhaltige Energieversorgung** muss sich an dem Ziel orientieren, Endenergie mit den geringst möglichen Kohlendioxidemissionen zu erzeugen und mit möglichst hohem Wirkungsgrad zu nutzen. Dabei ist die gesamte Prozesskette von der (Energieträger)-Bereitstellung – Transport – Nutzung - Entsorgung in die Betrachtung einzubeziehen. Regionale Wertschöpfung, Stoffkreisläufe und Arbeitsplätze sind weitere wichtige Aspekte, die bei der zukünftigen Energieversorgung eine immer größere Rolle spielen werden.

Die zurzeit in Deutschland extrem dynamische Entwicklung der energetischen Nutzung von Biomasse wird zum einen durch die weltweite Verteuerung von Ressourcen und Energieträgern induziert. Gleichzeitig existieren seitens der EU konkrete und für die einzelnen Mitgliedsstaaten verbindliche Vorgaben zum Klima- und Ressourcenschutz.

Das von der Europäischen Kommission am 23. Januar 2008 verabschiedete Paket von Vorschlägen soll die EU in die Lage versetzen, bis 2020 die Treibhausgasemissionen um mindestens 20 % zu reduzieren und den Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch auf 20 % zu erhöhen. Durch die Novelle der Gasnetzzugangsverordnung soll

Biogas verstärkt in das Erdgasnetz eingespeist werden können, so dass bis 2030 ein Anteil von 10 % Biogas möglich sein könnte.

Über die Bedeutung der energetischen Nutzung von Biomasse für den Klimaschutz herrscht allgemeiner Konsens. Sie stellt eine tragende Säule im Gesamtkonzept zur Erreichung der gesteckten Ziele dar.

### 1.3 Nachhaltigkeit

Zur Erreichung der energiepolitischen Ziele ist neben massiven Energieeinsparungen, der Energieeffizienzsteigerung der Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) notwendig. Die Bioenergie spielt dabei mit einem derzeitigem Anteil von ca. 70 % an den Erneuerbaren Energien (bezogen auf den Endenergieverbrauch) eine sehr wichtige Rolle. Aber dieser Ausbau darf nicht auf Kosten anderer Bereiche geschehen. Um einen nachhaltigen Ausbau der Bioenergie abzu sichern wurden Nachhaltigkeitskriterien an die Erzeugung von Bioenergieträgern geknüpft (→ Kap. 3.1 Nachhaltigkeitsrichtlinien).

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ wird im deutschsprachigen Raum oft missverständlich verwendet. Oftmals ist damit (nur) „langanhaltend“ oder „dauerhaft“ gemeint. Der im Zusammenhang mit der Bioenergie verwendete Begriff „Nachhaltigkeit“ ist wesentlich umfassender.

Der Begriff „Nachhaltige Entwicklung“ stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft. Ziel ist es dabei den Waldbestand als natürliche Ressource auf Dauer zu sichern. Eine „Nachhaltige Entwicklung“ bezeichnet aus heutiger Sicht eine Entwicklung „die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen“. Im Sinne der Agenda 21 stützt sich ein nachhaltiger d.h. zukunftsfähiger Umgang mit den Ressourcen, sich auf dem **Drei-Säulen-Konzept von ökonomischer, ökologischer und sozialer Entwicklung**. Ein ökologisches Gleichgewicht kann nur erreicht werden, wenn parallel ökonomische Sicherheit und soziale Gerechtigkeit gleichrangig angestrebt werden.

*Definition  
Nachhaltigkeit*

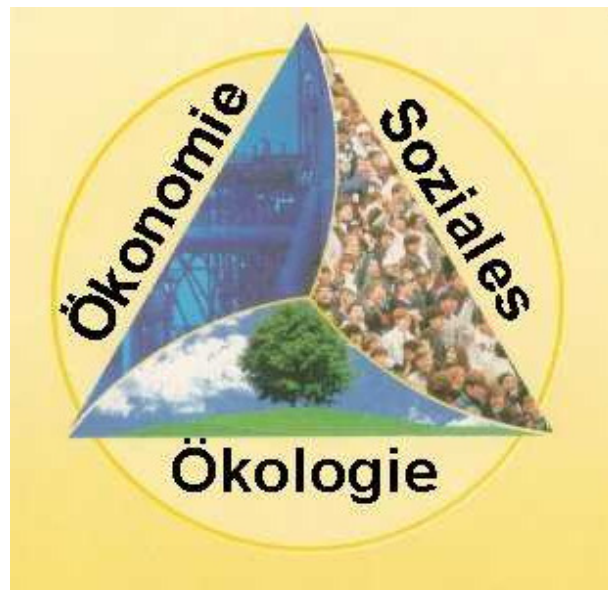


Abb. 3: „Drei-Säulen-Konzept“ der nachhaltigen Entwicklung

## 1.4 Begriffsbestimmung Bioenergie und Biomasse

### 1.4.1 Bioenergie

#### *Definition Bioenergie*

Als Bioenergie bezeichnet man Energie, die aus Biomasse gewonnen wird. Dabei werden verschiedene Energieformen wie Wärme, elektrische Energie oder auch Kraftstoff für Verbrennungsmotoren eingeschlossen. Meist wird auch Biomasse, in der die Energie chemisch gespeichert ist, als Bioenergie bezeichnet. Bisher hat Holz als Festbrennstoff die größte Bedeutung, aber auch landwirtschaftliche Produkte (Agrarrohstoffe) und organische Reststoffe aus unterschiedlichen Bereichen spielen eine zunehmende Rolle. Der Unterschied von Biomasse zu anderen Nutzungsarten der Sonnenenergie ist deren Unabhängigkeit von den Zeiten der Sonneneinstrahlung. Biomasse lässt sich in vielen unterschiedlichen Arten nutzen, z. B. durch:

- die direkte Verbrennung von Holz und anderer Biomasse (die älteste Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung),
- Umwandlung durch Mikroorganismen in Biogas, das für Kraftwerke, als Treibstoff, oder zum Heizen verwendet werden kann sowie
- Umwandlung durch chemische Prozesse, z. B. in Biodiesel oder Alkohole.

## 1.4.2 Biomasse

Als Biomasse wird die gesamte organische Substanz bezeichnet. Basis für die Bildung von Biomasse ist die vor allem von Pflanzen betriebene Photosynthese, bei der Sonnenenergie absorbiert und durch Bildung von Biomasse gespeichert wird. Zur Biomasse werden sowohl lebende Pflanzen, als auch die von ihnen abgeleitete organische Substanz, wie Tiere und Mikroorganismen, als auch tote organische Substanz wie Totholz, Laub, Stroh und anderes gezählt. Die aus Biomasse entstandenen fossilen Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas) werden ihr nicht zugeordnet. Die Natur produziert jährlich große Mengen an Biomasse, von der ein kleiner Teil als Nahrung, Futtermittel oder nachwachsender Rohstoff (Nawaro) zur stofflichen Nutzung oder zur Energiebereitstellung (Bioenergie) genutzt wird.

Maßgeblich für die die Anerkennung von Biomasse zur Erzeugung von Strom ist die Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV). Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung sind Energieträger aus Phyto- und Zoomasse. Hierzu gehören auch aus Phyto- und Zoomasse resultierende Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle, deren Energiegehalt aus Phyto- und Zoomasse stammt. Im Anhang sind die einzelnen Biomassearten der Biomasseverordnung aufgeführt.

*Definition Biomasse*

*Biomasseverordnung regelt Anerkennung der Bioenergie*

## 1.4.3 Anbaubiomasse / Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe werden neben der werk-/wertstofflichen Nutzung zum Zwecke der Energiebereitstellung angebaut. Die Zuordnung landwirtschaftlicher Produkte bzw. Fruchtarten zu den nachwachsenden Rohstoffen ist hierbei nicht immer eindeutig, da sie variabel als Lebens- oder Futtermittel oder auch als Rohstoff für Bioenergie eingesetzt werden können (z.B. Raps, Getreide, z.T. Silomais). So ist auch die Bezeichnung „Energiepflanze“ nicht immer eindeutig. Speziell zu Energiezwecken gezüchtete Fruchtarten sind beispielsweise der Energiemais, dessen Eigenschaften sich deutlich vom üblichen Silomais unterscheidet. Kurzumtriebsplantagen oder auch Holz aus Wäldern gehören ebenfalls zur Anbaubiomasse.

## 1.4.4 Abfallbiomasse / organische Abfälle und Reststoffe

Als Abfallbiomasse oder organische Abfälle und Reststoffe wird hier Biomasse bezeichnet, welche als Abfall vorliegt (z.B. Bioabfall, Schadgetreide, Altholz) und/oder als Reststoff keiner anderen Nutzung unterliegt (z.B. überschüssiges Stroh).

Die Abgrenzung zur Anbaubiomasse resultiert aus dem Abfallbegriff (→ Abfallwirtschaft) und ist hauptsächlich wichtig, damit die Sorgfaltspflicht für Abfälle gesichert bleibt. So werden beispielsweise Biomasseheiz(kraft)werke, welche (auch) organische Abfälle wie Altholz verwenden, als thermische Behandlungsanlagen bezeichnet. Diese Anlagen haben besondere Auflagen z.B. für die Rauchgasreinigung und Nachweispflichten zu erfüllen. Die Zuordnung als Abfall schließt die Anerkennung als Biomasse zur energetischen Nutzung aber nicht aus.

### *Definition Bioabfall*

Unter **Bioabfall** versteht man alle organischen Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft, die in einem Haushalt oder Betrieb anfallen und durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können. Dazu zählen zum Beispiel Essensreste und Rasenschnitt. Bioabfälle werden in der Regel über die sogenannte Biotonne separat erfasst und gesondert durch Kompostierung und Gärung behandelt. Die Zuordnung der Abfallarten und die speziellen hygienische Anforderungen des bei der Behandlung von Bioabfällen entstandenen Gärgutes und/oder Kompostes wird in Deutschland seit dem 21. September 1998 in der Bioabfallverordnung – BioAbV geregelt.

### Kontrollfragen

1. Nennen Sie mögliche Folgen des Klimawandels.
2. Welcher fossile Energieträger hat die größte und welcher die geringste Reichweite?
3. Was soll mit den Klimaschutzzielen erreicht werden?
4. Erläutern Sie den Begriff Nachhaltigkeit.
5. Was unter Bioenergie zu verstehen?
6. Erläutern Sie die Begriffe "Anbaubiomasse" und "Abfallbiomasse" und ordnen Sie entsprechend zu: Holzhackschnitzel aus Schnellwuchsplantagen, Altholz, Rapskorn, Bioabfall (Biotonneninhalt), Stroh, Getreidekorn!
7. Nennen Sie die Klimaschutzziele der Bundesrepublik Deutschland in den Bereichen Energieeinsparung, erneuerbare Energien, Anteil EE im Wärme- bzw. Strombereich sowie im Transport bzw. Mobilitätssektor.

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

# UMWELTGERECHTE ENERGIENUTZUNG

10. aktualisierte Auflage 2013

Ulf Hansen



## **Vorwort**

Jeder industrielle Prozess ist mit Eingriffen in die Umwelt verbunden - ja das Gleiche gilt für jede menschliche Tätigkeit wie Landwirtschaft und Siedlungsbau. Warum gilt dann ein besonderes Interesse der Energie?

Die Energienutzung weltweit hat das Niveau einer äquivalenten Menge von mehr als 10.000 Millionen Tonnen Erdöl erreicht. Die dabei umgesetzten Stoffmengen sind sehr groß, und die im Umwandlungsprozess freigesetzten Schadstoffe können sowohl lokal und regional als auch global schwere Umweltschäden zufolge haben. Die Energieumwandlung ist für 85 % der Luftschadstoffe verantwortlich. Bei der Energieumwandlung entsteht Abwärme, die punktuell und lokal einen Einfluss haben kann und zum Teil das Stadtklima beeinflusst. Im globalen Maßstab wird eine Energiefreisetzung von der Größenordnung der Photosynthese, entsprechend einem Promille der Sonneneinstrahlung, für unbedenklich gehalten. Der Weltenergieverbrauch erreicht noch kein Zehntel von diesem Niveau. Wenn auch Abwärme keine Bedrohung für das Klima darstellt, so wird die Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen mit großer Sorge verfolgt. Der vierte Bericht des UNO-Klimarats, IPCC, zeigt unmissverständlich, dass eine globale Erwärmung bereits vorliegt und diese fortschreiten wird. Die heutigen Emissionen von Treibhausgasen werden zu zwei Drittel von der Energienutzung bestimmt. Im Rahmen internationaler Abkommen wie des Kyoto-Protokolls hat sich Deutschland verpflichtet, die Freisetzung von Treibhausgasen bis 2012 um 21 % zu verringern und mit „*Die Energiewende in Deutschland*“ (2012) eine Verringerung um 40 % bis 2020 beschlossen. Bis Mitte des Jahrhunderts müssten die Emissionen weltweit auf die Hälfte reduziert werden. Dies erfordert einen radikalen Umbau der Energieversorgung.

Wir wollen uns hier mit der umweltgerechten Energienutzung auseinandersetzen, insbesondere da „umweltgerecht“ Eingang in das neue Energie Wirtschaftsgesetz, EnWG, gefunden hat. Eine Handlungsdevise enthält das Gesetz nicht und zunächst wäre wohl zu klären, was umweltgerecht bedeutet. Eine Null-Emission oder ein Null-Eingriff in die Umwelt ist nicht denkbar. Es muss vielmehr darum gehen, die Belastung mit Folgeprodukten unterhalb einer Grenze zu halten, die vom ökologischen System verarbeitet werden kann. Diese Grenze ist schwer zu definieren, so dass es nur darum gehen kann, eine Minimierung aller Belastungen anzustreben.

Die Minimierung der Umweltbelastung durch Energienutzung kann prinzipiell über drei Wege erreicht werden:

1. Weniger Energie für einen gewünschten Nutzen aufwenden, Beispiel Wärmedämmung statt Zusatzheizung;
2. Effizientere Energieumwandlung zur Deckung eines vorhandenen Endenergiebedarfs, Beispiel hoher Wirkungsgrad im Kraftwerk,
3. Schadstoffarme Energieträger, Beispiel Erdgas, Kernenergie und Erneuerbare Energien.

Der erste Weg erfordert Einsparmaßnahmen bei den Endverbrauchern. Auch wenn technische Lösungen vorliegen, ist die Umsetzung ein komplizierter Vorgang, der von Motivation und Verhaltensmuster abhängt und durch energiepolitische Rahmenbedingungen beeinflusst, wenn gar nicht gesteuert, wird. Im Folgenden sollen reine Energiesparmaßnahmen ausgeklammert werden. Der Energieverbrauch für den Verkehr hat einen großen Anteil am gesamten Energieverbrauch und steigt weltweit. Der Energiebedarf für den Transport von Personen und Güter ist nur teilweise ein technisches Problem. Lösungen können nur ganze Verkehrssysteme sein, die jedoch weit über den Rahmen dieser Vorlesung gehen würden.

Vielmehr wollen wir das Hauptgewicht auf effiziente Energieumwandlungstechniken, die mit Schadstoffminderung verbunden sind, legen. Im Vordergrund steht dabei die Versorgung mit Strom und Wärme. Für die Elektroenergieerzeugung wird weltweit ein Drittel der Primärenergie verwendet. Wärme deckt einen großen Bedarf sowohl für Raumklimatisierung als auch für Prozesse in der Industrie. Angesichts der vorherrschenden Rolle fossiler Energieträger, sind es vorrangig konventionelle Techniken, die es zu verbessern gilt. Dabei bildet die Verbrennung, und zukünftig die Vergasung, eine primäre Umwandlungsstufe, und der anschließende Wärmekraftprozess bestimmt den Wirkungsgrad. Das nötige theoretische Rüstzeug finden wir in der Thermodynamik.

Die Nutzung Erneuerbarer Energien ist primär eine Alternative zu den erschöpfbaren Energierohstoffen. Sie stellt eine umweltschonende Alternative dar, und insbesondere in Bezug auf die Klimaeinwirkung trägt sie zum Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung bei.

Es gibt eine Vielzahl von Technologien zur Nutzung der solaren und geophysikalischen Energieströme, die Anwendung auf dezentraler, lokaler Ebene aber auch im zentralen, großtechnischen Maßstab finden. Diese Technologien sind Inhalt des Lehrbriefs „Maschinen und Anlagen der Umwelttechnik I“. Wärmepumpe und Brennstoffzelle nehmen eine Zwi-

schenstellung ein, da sie sowohl konventionelle als auch erneuerbare Energien nutzen und folglich werden sie hier besprochen. Biogene Energieträger nutzen vielfach die gleichen thermischen Umwandlungstechnologien wie fossile Brennstoffe und folglich werden sie mitbehandelt. Das gleiche gilt für die solare Strahlungsenergie zur Stromerzeugung mit Hilfe thermischer Kreisprozesse.

Die Nutzung der Kernenergie in Spaltungsreaktoren verursacht keine Freisetzung der klassischen Luftschadstoffe wie Schwefel- und Stickstoffoxide oder von klimarelevanten Treibhausgasen. Die Kernenergie stellt jedoch neue Fragen in Bezug auf radioaktive Belastung bei Unfällen und bei der Entsorgung ausgedienter Brennstoffe. Sie bietet aber das Potential einer umweltgerechten Energienutzung.

Die Nachhaltigkeit als Leitbild der zukünftigen Entwicklung fordert eine Minimierung des Ressourcenverbrauchs und der Belastung der Umwelt mit Schadstoffen. Das Life Cycle Assessment, LCA, als international anerkanntes Bezugssystem ermittelt aus den Stoffströmen der Prozessketten ein Gesamtbild des Energieverbrauchs und der Umweltauswirkungen, Life Cycle Impact Assessment, LCI. Einzelne Technologien können so mit ihrem kumulierten Energieaufwand bewertet werden. Auch Kapital ist eine knappe Ressource, und eine nachhaltige Energieversorgung muss auch eine kosteneffiziente sein. Daher gehören Kostenrechnungen und Wirtschaftlichkeitsanalysen zum Inhalt des Lehrbriefes.

Das Ziel der Vorlesung „Umweltgerechte Energienutzung“ ist zum einen die Darstellung der technischen Möglichkeiten und Alternativen und zum anderen das Aufzeigen ihres Beitrages zur Umweltentlastung. Die einzelnen Technologien können nicht isoliert gesehen werden, sie müssen vielmehr im Zusammenhang mit den bestehenden Energieversorgungsstrukturen betrachtet werden. Wir wollen daher einleitend den Rahmen der globalen Energieversorgung vorstellen und dann etwas genauer die Energiesituation in Deutschland beschreiben. Dies ist der Hintergrund, vor dem sich jede zukünftige Entwicklung abspielen muss. Wenn Sie ein Verständnis für die Möglichkeiten des technisch Machbaren und ein Gefühl für Größenordnungen und Zeitabläufe in diesen Energiesystemen entwickelt haben, ist das Ziel erreicht.

Für die vielen wertvollen Anregungen möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Rolf Strenziok bedanken.

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Einheiten der Energie**

#### **1 Energienutzung im globalen Zusammenhang**

- 1.1 Energie und Entwicklung
- 1.2 Energiefluss und Energiebilanz
- 1.3 Energiebilanzen in Natur und Nahrungsproduktion
- 1.4 Weltenergieverbrauch
- 1.5 Probleme und Ausblick
- 1.6 Energievorräte
  - 1.6.1 Einteilung der Primärenergieträger
  - 1.6.2 Kohle
  - 1.6.3 Erdöl
  - 1.6.4 Erdgas
  - 1.6.5 Uran
  - 1.6.6 Erneuerbare Energien
- 1.7 Energiepreise
- 1.8 Kontrollfragen

#### **2 Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland**

- 2.1 Darstellung
- 2.2 Entwicklung des Energieverbrauchs
- 2.3 Energieumwandlung
  - 2.3.1 Brenn- und Kraftstoffe
  - 2.3.2 Elektroenergie
  - 2.3.3 Fernwärme
- 2.4 Endenergie und Verwendung
  - 2.4.1 Verbrauchssektoren und Nutzfunktionen
  - 2.4.2 Industrie
  - 2.4.3 Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (G.H.D.)
  - 2.4.4 Verkehr
  - 2.4.5 Nutzungsgrade
- 2.5 Umweltbelastung
- 2.6 Kontrollfragen

#### **3 Thermodynamik der Energieumwandlung**

- 3.1 Zustand der Systeme
- 3.2 Erhaltungssätze
- 3.3 Zustandsänderung und Zustandsgrößen
  - 3.3.1 Die innere Energie
  - 3.3.2 Die Enthalpie
  - 3.3.3 Reversibilität und Entropie
- 3.4 Kreisprozesse
- 3.5 Exergie und Anergie
- 3.6 Technisch wichtige Kreisprozesse
- 3.7 Kontrollfragen

**4 Verbrennung, Vergasung und Schadstoffminderung**

- 4.1 Einführung
- 4.2 Chemie der Verbrennung
- 4.3 Technische Verbrennung
- 4.4 Vergasung
  - 4.4.1 Thermische Verfahren
  - 4.4.2 Anaerobe Verfahren
- 4.5 Schadstoffentstehung und –minderung
- 4.6 Feuerungen
  - 4.6.1 Übersicht
  - 4.6.2 Staubfeuerungen
  - 4.6.3 Wirbelschichtfeuerung
  - 4.6.4 Biomasse
  - 4.6.5 CO<sub>2</sub> Abtrennung
- 4.7 Kontrollfragen

**5 Stromerzeugung**

- 5.1 Elektrizitätsbedarf und –versorgung
- 5.2 Kraftwerkstechnologien und Energieträger
- 5.3 Dampfkraftwerke
  - 5.3.1 Der Dampfkraftprozess
  - 5.3.2 Prinzipieller Aufbau
  - 5.3.3 Möglichkeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades
- 5.4 Gasturbinenkraftwerk
  - 5.4.1 Arbeitsprozess
  - 5.4.2 Technischer Aufbau der Gasturbine und Prozessverbesserung
- 5.5 Kombiprozesse: Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
  - 5.5.1 Theoretische Behandlung
  - 5.5.2 Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
- 5.6 Ausblick
- 5.7 Kontrollfragen

**6 Kraft-Wärme-Kopplung**

- 6.1 Nutzung der Abwärme
- 6.2 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung
  - 6.2.1 Möglichkeiten der Wärmeauskopplung
  - 6.2.2 Kennzahlen der Kraft-Wärme-Kopplung
- 6.3 Blockheizkraftwerke
  - 6.3.1 Einsatzgebiete und Technologien
  - 6.3.2 Gesamtaufbau und Betriebsweise
  - 6.3.3 Energetische und wirtschaftliche Bewertung
  - 6.3.4 Umweltbelastung
- 6.4 Wärmeversorgung und Kraft-Wärme-Kopplung
- 6.5 Kontrollfragen

- 7 Kernenergie**
  - 7.1 Prinzip der Kernspaltung
    - 7.1.1 Atomaufbau
    - 7.1.2 Kernspaltung
    - 7.1.3 Kettenreaktion
  - 7.2 Konzept und Aufbau von Kernkraftwerken
  - 7.3 Sicherheitstechnik
  - 7.4 Strahlenbelastung und Risiko
  - 7.5 Brennstoffkreislauf und Stilllegung
  - 7.6 Kontrollfragen
  
- 8 Rationelle Energienutzung**
  - 8.1 Einleitung
  - 8.2 Energiebedarf
  - 8.3 Technologien
    - 8.3.1 Übersicht
    - 8.3.2 Wärmerückgewinnung
    - 8.3.3 Wärmepumpe
    - 8.3.4 Brennstoffzelle
    - 8.3.5 Herstellung von Wasserstoff
  - 8.4 Kontrollfragen
  
- 9 Ökonomie und Ökologie**
  - 9.1 Nachhaltigkeit
  - 9.2 Kostenrechnung
    - 9.2.1 Statische Methoden
    - 9.2.2 Barwert und Diskontierung
    - 9.2.3 Dynamische Kostenmethoden
  - 9.3 Produktionskosten
    - 9.3.1 Stromerzeugung
    - 9.3.2 Kraft-Wärme-Kopplung
    - 9.3.3 Einspeisevergütung
  - 9.4 Energie und Ressourcenverbrauch
  - 9.5 CO<sub>2</sub> Minderungsmaßnahmen
    - 9.5.1 Der Treibhauseffekt
    - 9.5.2 Klimaänderung und Minderungsstrategien
    - 9.5.3 CO<sub>2</sub> Zertifikate
  - 9.6 Kontrollfragen
  
- 10 Glossar**
  
- 11 Literaturverzeichnis**
  
- 12 Heizwerte der Energieträger**
  
- 13 Sinnbilder für Schaltpläne von Wärmekraftanlagen**

## Einheiten der Energie

Die Grundeinheit der Energie ist Joule und die der Energieleistung Watt. Da Energie, Arbeit, gleich Leistung mal Zeit ist, gilt  $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt} \times \text{Sekunde}$  oder  $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Watt} \times \text{Stunde}$ . Die gesetzlich nicht mehr zugelassene Einheit Kalorie, die für die Erwärmung von 1 g Wasser um  $1^\circ\text{C}$  erforderliche Energie, wird noch verwendet, wobei  $1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$ . In der Energietechnik sind weitere Einheiten gebräuchlich, die aus Tradition und Anschaulichkeit sich auf den Energieinhalt eines Energieträgers wie eine Tonne Steinkohle, tSKE, oder eine Tonne Öl, toe, beziehen. Das Volumenmaß Barrel, bbl, mit 159 Liter wird häufig in Verbindung mit Rohöl verwendet und energetisch entspricht  $1 \text{ toe} = 7,33 \text{ bbl}$ .

Joule und Wattsekunden sind kleine Energiemengen, und sie werden daher meist in vielfachen von Zehnerpotenzen davon benutzt, die mit Vorsilben gekennzeichnet sind, wie

kilo	k	$10^3$
Mega	M	$10^6$
Giga	G	$10^9$
Tera	T	$10^{12}$
Peta	P	$10^{15}$
Exa	E	$10^{18}$

**Tab. 0:** Umrechnung von Energieeinheiten

	<b>kJ</b>	<b>kcal</b>	<b>kWh</b>	<b>tSKE</b>	<b>toe</b>
<b>kJ</b>	1	0,239	$0,278 \cdot 10^{-3}$	$0,341 \cdot 10^{-7}$	$0,239 \cdot 10^{-7}$
<b>kcal</b>	4,19	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$0,143 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$
<b>kWh</b>	$3,6 \cdot 10^3$	860	1	$0,123 \cdot 10^{-3}$	$0,086 \cdot 10^{-3}$
<b>tSKE</b>	$29,3 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$8,14 \cdot 10^3$	1	0,7
<b>toe</b>	$41,9 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	$11,6 \cdot 10^3$	1,43	1

## **1 Energienutzung im globalen Zusammenhang**

### **1.1 Energie und Entwicklung**

Energie ist ein untrennbarer Bestandteil jeder Lebensfunktion. In allen Pflanzen und Lebewesen wird Energie produziert und verbraucht, d.h. im streng physikalischen Sinn von einer Energieform in eine andere umgewandelt. Die in der Natur ablaufenden chemischen Prozesse sind nicht energetisch neutral, sie sind entweder exotherm (Energie wird freigesetzt) oder endotherm (Energie wird aufgenommen). Der Energiebedarf wird gedeckt durch die Nahrungsaufnahme, die bei der chemischen Umwandlung („Verbrennung“) Wärme freisetzt oder durch die Strahlungsenergie der Sonne.

Wie in der Evolutionsgeschichte die verfügbare Energie in Form von Temperatur, Strahlungsintensität und Nahrung bestimmte Spezies hervorgerufen hat, so hat sich die menschliche Gesellschaft entsprechend dem Energieangebot entwickelt. Die Beherrschung des Feuers ist erstmals vor etwa 40.000 Jahren in China belegt. Um das Feuer ständig zu nutzen, bedarf es einer beständigen sozialen Struktur, wie einer Familie oder Gruppe. Aus den nomadisierenden Jägern und Sammlern entstand eine sesshafte, agrarisch ausgerichtete Gesellschaft. Holz als fast alleiniger Energieträger ermöglichte in der Antike und dann im Mittelalter zusammen mit Windmühlen und Wasserrädern eine Wirtschaftsform mit einer bescheidenen, handwerklichen Güterproduktion. Der Energiebedarf der Städte wurde z. T. aus dem eigenen Stadtforst gedeckt. In Verbindung mit Wasserkraft entstanden im 17. und 18. Jahrhundert erste industrielle Produktionsstrukturen.

Mit der Nutzung der Kohle in der Dampfmaschine wurde eine großtechnische Fertigung möglich, auf deren Basis neue Wirtschaftsstrukturen wachsen konnten, die Industrialisierung. Die damit einhergehenden sozialen Umwälzungen waren gewaltig. Das Erdöl war die Voraussetzung für den Verbrennungsmotor, der unsere modernen Verkehrsmittel hervorgerufen hat. Die heutigen Städte- und Siedlungsstrukturen sind das Ergebnis der dichten Verkehrsnetze mit individueller Mobilität. Die elektrische Energie ist die Voraussetzung für moderne Kommunikationstechnologien, die eine gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderung in Richtung Dienstleistungsgesellschaft eingeleitet hat.

Die Industrialisierung im Zusammenhang mit der Umstellung auf eine intensive Landwirtschaft mit chemischer Düngung und Pflanzenschutz hat die Grundlage für eine wesentlich höhere Siedlungsdichte als in pri-

*Energie und Leben*

*Energie und Gesellschaftsform*



## 1 Energienutzung im globalen Zusammenhang

mitiven Gesellschaften geschaffen. Diese Entwicklung ist in Tabelle 1.1 mit der Siedlungsdichte und dem Energiebedarf für die einzelnen Kulturstufen grob charakterisiert. Die Industriegesellschaft kann 1000-mal mehr Menschen ernähren als eine auf der Stufe der Jäger und Sammler. Dabei ist der Energiebedarf um das 100-fache gestiegen.

**Tab. 1.1:** Siedlungsdichte und Energiebedarf einzelner Kulturstufen

Kulturstufe	Siedlungsdichte Menschen/km <sup>2</sup>	Energiebedarf kW/Kopf *
Jäger und Sammler	0,25	0,1
Agrargesellschaften	25	1,0
Industriegesellschaften	250	10,0
10 kW/a entspricht 2 toe/a		* kW/a Kopf

Das Ziel einer umweltgerechten Energienutzung setzt nicht nur das Vorhandensein von energieeffizienten Technologien voraus. Die Verwendung der technischen Möglichkeiten muss auch wirtschaftlich sinnvoll sein, d.h. ökonomische Anreize bieten. Die Wirtschaftlichkeit wiederum ist ein Ergebnis der Randbedingungen, die im starken Maße auch von der Energiepolitik beeinflusst werden. Energiepolitik ist das Bestreben des Staates, die Energiewirtschaft zum Nutzen der Volkswirtschaft in bestimmte Richtungen zu lenken. Dazu bedient er sich Gesetze und Verordnungen (Ordnungspolitik) sowie Steuern und Abgaben (Fiskalpolitik).

### 1.2 Energiefluss und Energiebilanz

Energie ist ein physikalischer Begriff. Energie geht nicht verloren und kann von einer Form in eine andere überführt werden, wie potentielle Energie in Bewegungsenergie und weiter in Wärme. Die Energiemengen sind z. T. abstrakt wie potentielle Energie, oder konkret an eine Technologie geknüpft, wie der Benzinverbrauch eines PKW. In den VDI-Empfehlungen sind Begriffe für verschiedene Umwandlungsstufen definiert (Tab. 1.2).

Der Begriff Energie umfasst viele Energieformen, wovon technische Arbeit und Wärme die wichtigsten sind. Energie ist grundsätzlich von dem Begriff Leistung zu unterscheiden, die Arbeit pro Zeit beschreibt. So verbraucht beispielsweise eine Glühbirne mit der Leistung 60 W in 3 Stunden 180 Wh Elektroenergie oder ein 50 kW Motor leistet in 1 h eine Arbeit von 50 kWh.

*Siedlungsdichte  
und Energiebedarf*

*Energiewirtschaft  
und Energiepolitik*

*Energiebegriffe  
und Definitionen*

**Tab. 1.2:** Grundbegriffe der Energiewirtschaft [VDI-Lexikon Energie]

<b>Primärenergie:</b>	Energieinhalt von Energieträgern, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden
<b>Sekundärenergie:</b>	Energieinhalt von Energieträgern, die aus der Umwandlung von Primärenergieträgern oder anderen Sekundärenergieträgern gewonnen wurden
<b>Endenergie:</b>	Energieinhalt von Energieträgern, die vom Endverbraucher für die Umwandlung in Nutzenergie bezogen wurden
<b>Nutzenergie:</b>	Energie in gewünschter Form zur Deckung eines Bedarfs an Energiedienstleistung
<b>Wirkungsgrad:</b>	Quotient aus der nutzbaren Leistung und der zugeführten Leistung
<b>Nutzungsgrad:</b>	Quotient aus der in einem bestimmten Zeitraum nutzbar abgegebenen Energie und der gesamten zugeführten Energie
<b>Energiebilanz:</b>	Gegenüberstellung der in ein System eintretenden bzw. austretenden Energieströme
<b>Energiebedarf:</b>	Der zur Erfüllung einer Energiedienstleistung unter Nutzung einer bestimmten Technologie erforderliche Energieeinsatz in der jeweiligen Form
<b>Energieverbrauch:</b>	Die für die Deckung von Energiebedarf verbrauchte Menge an Energie in der jeweils erforderlichen Form.

Der Energiefluss stellt die Umwandlungskette von Primärenergie in Nutzenergie dar. Zwischen zugeführter Energie und Nutzenergie bestimmen Nutzungsgrade die Güte des Umwandlungsprozesses. Eine Energiebilanz kann für verschiedene Systemgrenzen erstellt werden. In der Technik wird sie für einen bestimmten Prozess wie einen Verbrennungsmotor oder ein Kraftwerk berechnet und z. B. als Energiefluss-Diagramm dargestellt. Analog zu dieser „technischen“ Betrachtung kann eine „energiewirtschaftliche“ Energiebilanz für einen Wirtschaftszweig oder eine ganze Volkswirtschaft durchgeführt werden (vgl. Kapitel 2).

*Energiebilanz*

### 1.3 Energiebilanzen in Natur und Nahrungsproduktion

Neben der Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen wird Energie als mechanische Energie der Muskeln genutzt. Die Muskelkraft oder animalische Energie wird für die Nahrungssuche und andere Aktivitäten wie

## 1 Energienutzung im globalen Zusammenhang

Nestbau, Fortpflanzung, Verteidigung, aber auch für harmloseren Zeitvertrieb, wie Spielen, aufgewandt.

Um uns ein wenig mit den Größenordnungen vertraut zu machen, wollen wir die Leistungsfähigkeit des Menschen zu den üblichen Größen in der Energietechnik in Relation setzen. Die maximale Leistung eines Menschen liegt bei etwa 0,5 kW. Bei den meisten Aktivitäten im täglichen Leben liegt die Leistung weit unter 0,1 kW. In einer aus dem letzten Jahrhundert stammenden Erfassung der Arbeitskraft wird die mittlere Leistung eines Arbeiters in einem Zehnstudentag mit 35 Watt beziffert [Hütte, 1905]. Zum Vergleich beträgt die Leistung eines Zugtieres (Pferd, Ochse) 450 W.

Die meisten von uns genutzten, technischen Geräte haben eine wesentlich höhere Leistungsaufnahme.

- Küchenmixer 0,2 - 0,4 kW
- Staubsauger 0,3 - 0,8 kW
- Handbohrmaschine 0,5 - 1,0 kW
- Moped 2 - 5 kW
- Auto 50 - 100 kW.

Wir wollen ein wenig mit den Zahlen des heutigen Energieverbrauchs spielen: Der Endenergieverbrauch in Deutschland beträgt rd. 9.000 Petajoule ( $10^{15}$  J) und davon 3.600 PJ als mechanische Energie. Bei einer Bevölkerungszahl von 82 Millionen ergibt sich ein Pro-Kopf-Verbrauch von 12.000 kWh, die wir für die Verrichtung verschiedener Arbeiten nutzen können. Unterstellen wir einen Nutzungsgrad von 30% bei der Umwandlung, so steht uns das ganze Jahr eine Nutzleistung von  $0,4 \text{ kW}^1$  zur Verfügung. Wenn die Leistung in äquivalente menschliche Leistungseinheiten (35 W) umgerechnet wird, so finden wir, dass ständig 10 „Energiesklaven“ rund um die Uhr für uns arbeiten. Humaner wäre die Einteilung in Schichten von z. B. 8 h, so dass in der Tat 30 Sklaven uns mit allen Bequemlichkeiten versorgen. Die Arbeit von 1 kWh entspricht einer menschlichen Arbeitsleistung von 35 W über 28 Stunden, und ein fiktiver Vergleich von Arbeitskosten und dem Preis einer Kilowattstunde zeigt wie die moderne Technik uns eine tausendfache Verbesserung der Kosteneffizienz von Arbeit beschert. Trotz einer vielleicht fragwürdigen Gleichsetzung von mechanischer und menschlicher Arbeit zeigt diese Relation etwas von der Bedeutung der Energie in einer modernen Industriegesellschaft.

*Energieleistung  
menschlicher  
Arbeitskraft*

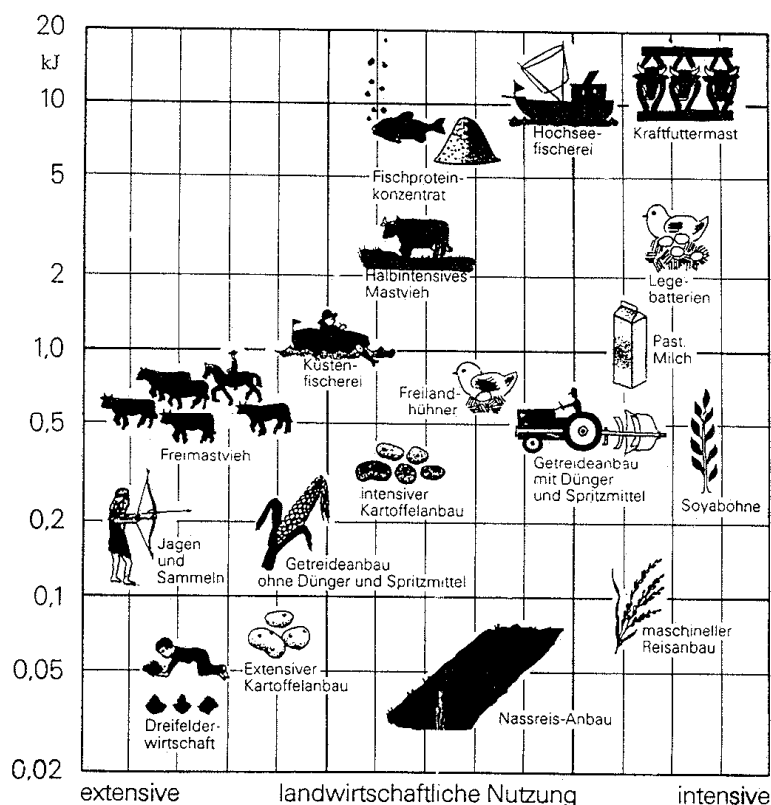
*Leistung üblicher  
Gebrauchs-  
Gegenstände*

*Energiesklaven*

<sup>1</sup>  $12.000 \text{ kWh/a} \times 0,3 : 8760 \text{ h/a} = 0,41 \text{ kW}$

Nur ein Bruchteil der von uns verbrauchten Energie wird für die Nahrungsbeschaffung verwendet. In der Natur sind die Verhältnisse anders, und auch der Mensch hat früher einen viel größeren Anteil seiner Zeit für die tägliche Ernährung aufbringen müssen. Wie es Chapman [Open University] ausdrückt: „Der Schlüssel zum Erfolg in der Tierwelt liegt darin, weniger Energie für die Nahrungssuche aufzuwenden, als die in der Nahrung enthaltene Energie“, also eine positive Energiebilanz.

*Energieaufwand für die Nahrungsbeschaffung*



**Abb. 1.1:** Erforderlicher Energieinput für die Bereitstellung von einem Output von 1 kJ Nahrungsmittel

In einer Input-Output-Analyse wollen wir das Verhältnis von Aufwand und Nutzen für die Nahrungsbeschaffung betrachten. Der Nutzen oder der Output ist der Energieinhalt der gewonnenen Nahrung und der Aufwand oder der Input ist die Muskelenergie für das Sammeln, Jagen etc. Dieses Energieverhältnis ist für jede Tierart sehr unterschiedlich. Säugetiere haben typischerweise ein Input : Output-Verhältnis von 1:10. Der Mensch, im Kulturstadium der Jäger und Sammler, hat ebenfalls ein Verhältnis von 0,1. Dabei kommen ihm einfache Techniken wie Speer oder Steinkeule zu Hilfe. Der Übergang zu einfachster Landwirtschaft bringt neben einer Sicherung der Versorgung auch eine Verbesserung der

*Input-Output-Analyse*

Energiebilanz. Die Analyse der Produktionsmethoden einer solchen Dreifelder-Wirtschaft zeigt, dass das Energieverhältnis sich auf die Hälfte, auf 0,05 verringert hat (Abb.1.1). Der Sprung zu den heutigen, intensiven landwirtschaftlichen Methoden ist sehr groß. Die Muskelarbeit des Menschen spielt nur eine verschwindend kleine Rolle. Beispielsweise setzt sich der Energieinput beim modernen Getreideanbau zusammen aus:

- 40 % mechanischer Arbeit (Treibstoff, Elektrizität, Transport)
- 60 % Vorleistung für Geräte, Düngemittel etc.

Wenn alle Inputströme mitgezählt werden, so ergeben sich Verhältnisse von 0,5. Bei einigen Nahrungsmitteln ist der Aufwand sogar größer als der gewonnene Nährwert.

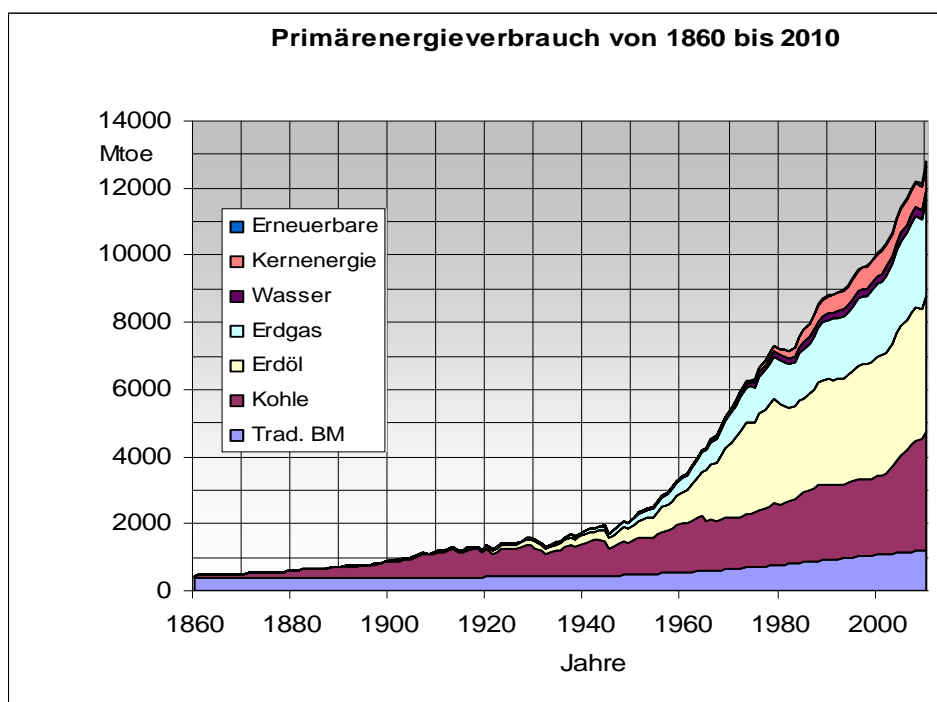
Unter Zuhilfenahme nicht-animalischer Energie ist es möglich geworden, den Menschen von der Bürde der reinen Nahrungsproduktion zu befreien. Der größte Teil der Bevölkerung hat seine Nahrungssuche in den „Supermarkt“ verlegt. Heute sind in Deutschland weniger als 3 % der arbeitenden Bevölkerung in der Landwirtschaft beschäftigt, und jeder Landwirt ernährt im Mittel 143 Personen (2008). Auf der anderen Seite ist der Energieeinsatz in der Landwirtschaft stark gestiegen und von menschlicher Energie auf Öl, Gas und elektrische Energie verlagert worden.

### **1.4 Weltenergieverbrauch**

Historisch ist der Energiebedarf durch menschliche und tierische Muskelarbeit, pflanzliche Rohstoffe und Abfälle gedeckt worden. Auch die Wasserkraft und der Wind sind lokal genutzt worden. Erst mit der Nutzung der fossilen Brennstoffe, zuerst der Kohle, wurde es möglich, die Produktion auf eine neue Basis zu stellen. Der Zugang zu einer nahezu „unbegrenzten“ Energiequelle ermöglichte einen wirtschaftlichen Aufschwung (industrielle Revolution), der allein mit animalischer Energie und Brennholz nie hätte realisiert werden können.

Energie ist eine Voraussetzung für den erreichten Wohlstand in den industrialisierten Ländern, und auch die Entwicklungsländer streben eine Verbesserung ihres Lebensstandards durch Industrialisierung und vermehrten Energieeinsatz an. Dabei werden die Technologien und Verbrauchsmuster der Industrieländer übernommen.

Seit dem Beginn der Industrialisierung ist der Weltenergieverbrauch um ein Vielfaches gestiegen (Abb. 1.2), allein im letzten Jahrhundert um den Faktor zehn. Gleichzeitig vollzog sich der Übergang von Holz, zu Kohle und zu Erdöl und Erdgas.



**Abb. 1.2:** Entwicklung des Weltenergieverbrauchs von 1860 bis 2010, Bewertung von Kernenergie, Wasser und Erneuerbaren nach Wirkungsgrad-Methode

*Vervielfachung des  
Energieverbrauchs*

Der Energieverbrauch an kommerziellen Energieträgern betrug 2010 weltweit 12 Milliarden Tonnen Öleinheiten (toe) oder 500 PJ (Tab. 1.3). Neben den kommerziell gehandelten Energien wie Kohle, Öl und Gase sowie Elektroenergie werden traditionelle Energieträger wie Holz und brennbare Abfälle genutzt. In der hier benutzten BP-Statistik wird die elektrische Energie aus erneuerbaren Energien und aus Kernenergie mit dem Primärenergieäquivalent einer fiktiven fossilen Stromerzeugung umgerechnet.

Erdöl ist immer noch der wichtigste kommerzielle Energieträger, jedoch mit einem seit den 1970er Jahren abnehmenden Anteil und Erdgas hat an Bedeutung gewonnen. Der Beitrag der Kohle ist über Jahrzehnte rückläufig gewesen, der Trend ist aber mit der forcierten Industrialisierung in Indien und China umgekehrt worden. Weltweit liegt der Beitrag bei fast 30 %. Die Kernenergie ist als wichtiger neuer Energieträger hinzugekommen und hat heute einen Anteil von 5 %. Die Wasserkraft erfährt einen kontinuierlichen Ausbau in den Entwicklungsländern und erreicht einen Anteil von über 6 %. Die übrigen erneuerbaren Energien Wind, Sonne und Biomasse liefern etwa 166 Mtoe oder 1,4 % des weltweit kommerziell erfassten Primärenergieverbrauchs (nicht in der Tabelle 1.3 aufgeführt).

*kommerzielle  
Energieträger*

**Tab. 1.3:** Weltverbrauch an kommerziellen Primärenergieträgern in Mtoe [BP Statistik 2012]<sup>2</sup>

Jahr	Total	Öl	Kohle	Gas	Wasser <sup>1</sup>	Kern <sup>1</sup>
1950	1750	495	1030	170	165	-
1960	2860	995	1385	415	195	2
1970	4855	2255	1555	925	310	20
1980	6435	2980	1820	1305	435	185
1990	7875	3140	2245	1785	575	515
2000	9095	3520	2215	2160	615	585
2010	11978	4032	3532	2843	779	626
2010	100%	34%	29%	24%	6,5%	5,2%

1: Bewertung nach der Substitutionsmethode im thermischen Kraftwerk  
1950-1990: Wirkungsgrad 0,33 und ab 2000: 0,38

Nicht-kommerzielle Energieträger wie Brennholz, landwirtschaftliche und tierische Abfälle werden nicht systematisch erfasst und ihr Beitrag zur Energieversorgung lässt sich nur abschätzen. Diese „Traditionelle Biomasse“ ist für 1,6 Milliarden Menschen der wichtigste Energieträger und 2,5 Milliarden in den Entwicklungsländern kochen fast ausschließlich damit. Die primitive Verbrennung von Biomasse in geschlossenen Räumen führt zu einer sehr hohen Schadstoffbelastung der Atemluft, und die WHO schätzt, dass jährlich 1,3 Millionen Menschen, meist Kinder, durch Erkrankung der Atemwege sterben.

Den Beitrag von Holz und biogenen Abfällen zur weltweiten Bedarfsdeckung schätzt IEA auf 1.280 Mtoe/a [IEA, 2012]. Alles im allen betrug 2010 der gesamte Weltenergieverbrauch bestehend aus „kommerziellen“ und „traditionellen“ Energieträgern nach der IEA-Methode 12,7 Milliarden Tonnen Öleinheiten. Seit der Ölkrise 1973- die als Ende des Energiewachstums vorhergesagt wurde- hat sich der Verbrauch verdoppelt. Trotz vieler Verschiebungen im Energiemix ist Öl der wichtigste Energieträger geblieben.

Der Energieverbrauch verteilt sich sehr unterschiedlich auf die Wirtschaftsregionen und die einzelnen Länder. In der Vergangenheit wurde der Verbrauch von den industrialisierten Staaten dominiert. Erstmals 2009 fiel der Anteil der Industrieländer (OECD<sup>3</sup> und ehem. Sowjetunion)

<sup>2</sup> Die Statistiken von BP und IEA unterscheiden sich in der Bewertung der Elektroenergie: BP nach der Substitutionsmethode und IEA nach der Wirkungsgradmethode mit Strom aus Wasser, Wind und Sonne gleich dem Wärmeäquivalent also 1 kWh-el gleich 1 kWh-th und Kernenergie mit dem Wirkungsgrad 0,33.

<sup>3</sup> EU, Island, Norwegen, Schweiz, Türkei, Nordamerika, Australien, Japan, Korea, Mexiko, Neuseeland,

*Brennholz wichtiger Energieträger*

auf 50 %, und in Zukunft werden die Entwicklungs- und Schwellenländer den Energieverbrauch bestimmen. Der Primärenergieverbrauch pro Kopf wird häufig als Vergleich herangezogen, Tabelle 1.4.

**Tab. 1.4:** Pro-Kopf-Verbrauch an Energie in toe 2010 [IEA 2012]

Welt	USA	Deutschland	China	Indien
1,86	7,1	4,0	1,8	0,6

In den vergangenen Jahren hat der Energieverbrauch in China rasant mit über 10 % pro Jahr zugenommen, und inzwischen hat China die USA als größten Energieverbraucher abgelöst. Auch in Indien und in anderen Schwellenländern steigt der Energieverbrauch als Folge der Industrialisierung und der motorisierten Mobilität. Längst hat China (7,2 Gt) die USA (5,4 Gt) als größten Verursacher von CO<sub>2</sub> Emissionen überholt.

## 1.5 Probleme und Ausblick

Die Deckung eines zukünftig steigenden Weltenergiebedarfs ist mit sehr vielen Problemen verbunden. Zum einen besteht, wie eben gezeigt, ein großes Ungleichgewicht im Pro-Kopf-Verbrauch, woraus sich ein kräftiger Nachholbedarf ableiten lässt, der aber gerade in den ärmsten Ländern mit dem stärksten Bevölkerungswachstum auftritt. Zum anderen ist die Deckungsmöglichkeit an die Verfügbarkeit von kostengünstigen Energieträgern geknüpft. Darüber hinaus soll die Energieversorgung umweltfreundlich gestaltet werden, um eine nachhaltige, globale Entwicklung zu ermöglichen.

Die Weltbevölkerung ist von etwa 200-300 Millionen zur Zeit Christi Geburt auf 7.000 Millionen im Jahr 2011 gewachsen. Die Prognosen der Vereinten Nationen sagen eine Weltbevölkerung von 8 Milliarden 2025 und über 9 Milliarden 2050 voraus [UNO 2007]. Die Fähigkeit der Erde, mehr Menschen zu ernähren, ist auch eine Folge der technischen Entwicklung. Die sich im globalen Maßstab einstellende Bevölkerungsgrenze wird weniger durch die Bereitstellung von Nahrungsmitteln als durch Eingriffe in den natürlichen Haushalt bestimmt.

Auf der ganzen Welt findet eine Bevölkerungswanderung mit zunehmender Urbanisierung statt. In den Industrieländern leben bereits 75 % der Bevölkerung in Städten, in den Entwicklungsländern sind es 45 %. Im Laufe der nächsten 50 Jahre, so schätzt die UNO, werden drei von vier Menschen in Städten leben.

*ungleiche Verteilung der Energie*

*Energie für die Zukunft*

*Entwicklung der Weltbevölkerung*

*Landflucht und Verstädterung*



Bereits heute liegen die weltgrößten Städte in den Entwicklungsländern. Die Versorgung dieser Mega-Citys von 10 und mehr Millionen Menschen mit adäquaten Energien stellt ein schwieriges Problem dar. Die Energieträger müssen eine hohe Energiedichte aufweisen, wie z.B. Elektroenergie, und müssen mit geringer Schadstofffreisetzung genutzt werden können. In der Tendenz ist eine Zunahme der Nutzung von sauberen, leicht transportierbaren Energieträgern zu erwarten, während beispielsweise die Nutzung von Brennholz zurückgehen wird.

Wie hoch könnte nun der Energiebedarf ausfallen? Für die Entwicklung sind viele Faktoren entscheidend:

- Bevölkerungswachstum
- Wirtschaftsentwicklung
- Verfügbarkeit und Preise von Energieträgern
- Technologische Entwicklung und Energieeffizienz
- Umweltaforderungen

Die wichtigste Triebkraft für den Energieverbrauch ist die Wirtschaftsentwicklung. Es besteht eine enge Korrelation zwischen dem Bruttoinlandsprodukt, *BIP*, und dem Primärenergieverbrauch, *PEV*, ausgedrückt mit der *Energieintensität, I*,

$$I = PEV/BIP,$$

Und wächst die Wirtschaft um  $\Delta BIP$ , so steigt der Energieverbrauch um  $\Delta PEV$

$$\Delta PEV [\text{toe/a}] = I [\text{toe}/\$BIP] \times \Delta BIP [\$BIP/a]$$

Die Energieintensität ist eine Schlüsselgröße und spiegelt einerseits die technologische Entwicklung und andererseits die Struktur der Wirtschaft wider. Über die Zeit hat sich die Technik der Energieumwandlung und –anwendung ständig verbessert, der Wirkungsgrad in den Kraftwerken ist erhöht, die Prozessenergie besser genutzt und Energieverluste in der Gebäudeklimatisierung sind verringert worden. Auch die Wirtschaftsstruktur ändert sich über die Zeit. Zu Anfang der Industrialisierung steht die energieintensive Grundstoffindustrie mit Eisen- und Stahl- sowie Zementproduktion im Vordergrund. Mit dem Übergang zu einer Verarbeitenden Industrie und zu Dienstleistung sinkt der Energiebedarf je erwirtschaftete Einheit BIP. Die beiden Entwicklungen laufen z. T. parallel.

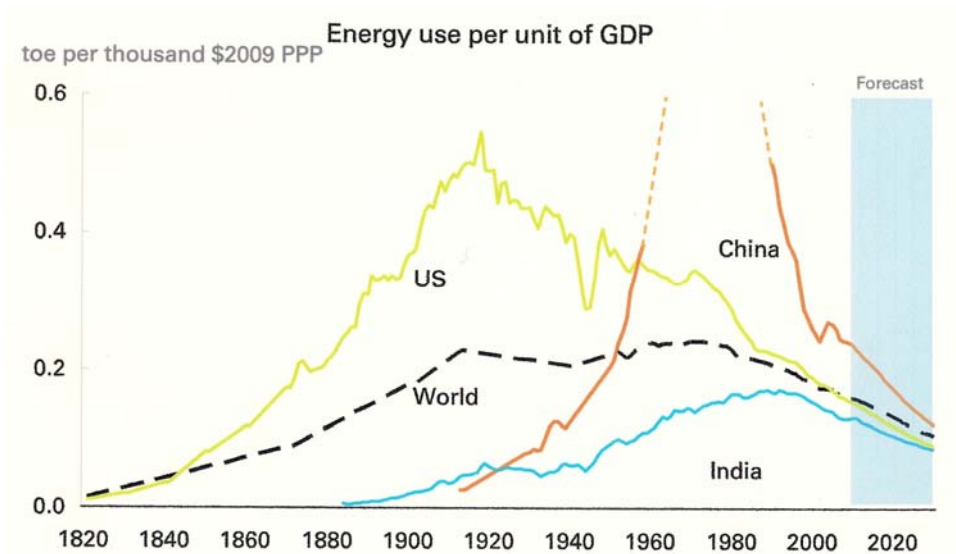
Ein Vergleich der Energieintensität über die Zeit und zwischen Nationen zeigt, dass die Intensität ein Maximum durchläuft. Das Maximum tritt für die einzelnen Nationen zu verschiedenen Zeitpunkten auf und mit der Zeit fällt es geringer aus, Abb. 1.3. In einem Vergleich zwischen Ländern auf verschiedenen Entwicklungsstufen ist es aussagekräftiger die Wirtschafts-

*Szenarien für Weltenergiebedarf*

*Energieintensität*

## 1 Energienutzung im globalen Zusammenhang

leistung in der Kaufkraft des jeweiligen Landes zu messen, *purchase power parity, ppp*, und über die Zeit im konstanten Geldwert, hier \$2009.



**Abb. 1.3:** Entwicklung der Energieintensität in Tonnen Öleinheiten je 1000 US\$ [BP Energy Outlook, 2011]

Die Tabelle 1.5 vergleicht die Energieintensität ausgewählter Länder und zwar für das BIP gemessen in nominalen Dollar als auch in Kaufkraft (US\$ppp). Auf dieser Basis verringert sich die zunächst auffällig hohe Energieintensität der Entwicklungsländer und Indien erwirtschaftet eine Einheit BIP ebenso energieeffizient wie die USA.

**Tab. 1.5:** Energieverbrauch je Einheit BIP in toe/1000US\$2005 bzw. (BIP in Kaufkraftäquivalent, ppp) Stand 2010 [IEA 2012]

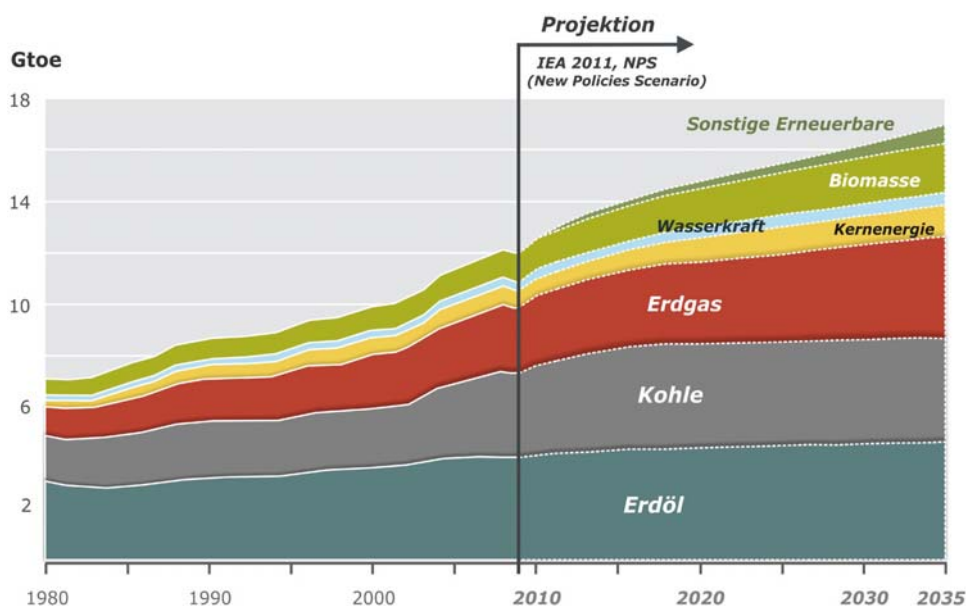
Welt	USA	Deutschland	China	Indien
0,25 (0,19)	0,17 (0,17)	0,11 (0,12)	0,60 (0,26)	0,56 (0,18)

In unserer globalisierten Welt stehen technologische Entwicklungen allen Nationen zur Verfügung. Gerade Länder, die am Anfang ihrer industriellen Entwicklung stehen, sind bestrebt die neueste Technologie zu kaufen, so stehen z. B. in keinem anderen Land so viele moderne überkritische Dampfkraftwerke wie in China, wo 2009/2010 auch die höchsten Zuwächse an Wind- und Solarenergieanlagen zu verzeichnen waren. Global ist die Energieintensität im langjährigen Mittel um etwa 1 %/a gefallen. Für die zukünftige Entwicklung werden Modellrechnungen durchgeführt, die von den heutigen Strukturen ausgehen und Annahmen über Bevölkerungswachstum, Wirtschaftsentwicklung und die technisch bedingte

*Energieintensität  
international*

Energieintensität zugrunde legen. Das künftige Angebot an Energieträger wird mit Preisszenarien abgebildet. Umweltauflagen können mit Emissionsbegrenzungen und/oder Zusatzkosten dargestellt werden. Ein Beispiel zeigt Abb. 1.4 mit einer Modellrechnung der Internationalen Energie Agentur von 2011. Dabei sind neu angekündigte und geplante energiepolitische Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen umgesetzt worden. Das „*New Policies Scenario*“ stellt also ein eher optimistisches Bild dar.

Energieszenarien



**Abb. 1.4:** Weltenergieverbrauch im Szenario „Neue Politik“ der IEA 2011

Von 2010 bis 2035 steigt der Energieverbrauch von rd. 12,7 Mrd.toe um ein Drittel auf knapp 17 Mrd.toe. Die CO<sub>2</sub> Emissionen nehmen um 20 % zu und liegen auf einer Trendlinie, die zu einer globalen Temperaturzunahme um 3,5 °C führen würde. Geht man dagegen davon aus, dass neue Maßnahmen unterbleiben und der gegenwärtige Trend als *Business-as-usual* bestehe, so würde der Energieverbrauch noch stärker, nämlich um 45 % steigen. Regional verschiebt sich die Energienachfrage zu den Entwicklungs- und Schwellenländern, allein auf China und Indien fällt die Hälfte des Mehrverbrauchs. Auch in dem *Neue Politik*-Szenario wird der Bedarf 2035 zu drei Viertel von fossilen Brennstoffen gedeckt. Die in der Vergangenheit expandierende Nutzung der Kohle wird durch Erdgas eingedämmt. Ohne weitere nachhaltige energiepolitische Eingriffe über die derzeit geplanten hinaus wird es zu einer kaum tolerierbaren Belastung mit Treibhausgasen kommen. Alternative Entwicklungen sind erforderlich, auf die wir später eingehen wollen, Kapitel 9.

Der Anstieg von CO<sub>2</sub> und anderen klimarelevanten Gasen in der Atmosphäre stellt eine Klimabedrohung dar. Ein internationales Abkommen wurde 1997 in Kyoto verabschiedet und hiernach verpflichten sich die Industrieländer ihre Emissionen von Treibhausgasen bis 2008-2012 um mindestens 5 % bezogen auf 1990 zu reduzieren. Deutschland hat sich freiwillig zu einer Minderung um 21 % bis 2010 verpflichtet und das Ziel bereits 2009 erreicht.

*Kyoto-Abkommen  
und IPCC*

Der Klimarat der UNO, *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), hat 2007 unmissverständlich eine bereits eingetretene globale Erwärmung um 0,7 Grad festgestellt und vor den Folgen einer weiteren Zunahme von Treibhausgasen in der Atmosphäre gewarnt. IPCC fordert bis 2050 eine Reduktion der weltweiten Emissionen auf 50 % des Wertes im Jahr 2000.

Der kumulierte Weltenergieverbrauch vom Anfang der Zeitrechnung zur Jahrtausendwende wird auf 400 Mrd. t Öleinheiten geschätzt [WEC1992, BP Statistik 2007]. Für die Periode von 2000 bis 2030 wird ein kumulierter Verbrauch von ebenfalls 400 Mrd. toe berechnet. In unserer Generation wird demnach die Welt genauso viel Energie verbrauchen wie in allen vergangenen Jahrhunderten davor. Eine Perspektive, die unsere Verantwortung für die künftige Entwicklung unterstreicht.

*Unsere Generation verbraucht so viel wie alle frühere Generationen*

## 1.6 Energievorräte

### 1.6.1 Einteilung der Primärenergieträger

Die uns zur Verfügung stehenden Energiequellen unterscheiden sich prinzipiell in der Art wie sie vorkommen und wie sie genutzt werden können. Grundsätzlich sind sie alle erschöpfbar, jedoch sind die Zeiträume (Reichweite) sehr unterschiedlich und liegen zwischen Hunderten und Milliarden von Jahren. Auch die Solarenergie und die Erdwärme sind endlich und hängen von Kernumwandlungen der Materie ab. In jeglicher praktischer Hinsicht sind sie aber unerschöpflich. Die verschiedenen Formen der Solarenergie wie Strahlungsenergie, Energien der Luft- und Wasserströmungen sowie die in der Vegetation gespeicherte Energie werden auch „erneuerbar“ genannt. Im jährlichen Rhythmus und in sich wiederholenden Wachstumszyklen stehen die von der Kernfusion der Sonne gespeisten Energien erneut zur Verfügung.

*erschöpfbare und  
nicht erschöpfbare  
Energien*

Die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas sind auch praktisch erschöpfbar, da der Verbrauch um Größenordnungen höher als die Entstehungsrate ist. Durch Umwandlung von biologischem Material aus der

*Genesis fossiler  
Energieträger*



# ABFALL- UND STOFFSTROMWIRTSCHAFT

GERT MORSCHECK  
ABDALLAH NASSOUR

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Einführung in das Abfallrecht .....	5
2	Abfallarten, Abfallzusammensetzung, Mengenentwicklung .....	9
2.1	Abfallarten .....	9
2.2	Gliederung der Abfallarten .....	12
2.3	Abfallzusammensetzung und Mengenentwicklung .....	15
3	Entsorgungslogistik .....	19
3.1	Grundlagen der Entsorgungslogistik .....	19
3.2	Entsorgungslogistische Prozesse .....	19
3.3	Die Abfallsammlung .....	20
3.3.1	Systemlose Sammlung .....	20
3.3.2	Systemmüllsammlung .....	21
3.3.2.1	Umleersysteme .....	21
3.3.2.2	Das Wechselsystem .....	22
3.3.2.3	Das Einwegsystem .....	22
3.3.3	Getrenntsammelsysteme .....	24
3.3.4	Abfallbehälter .....	26
3.3.5	Müllpresscontainer .....	27
3.4	Abfalltransport und -umschlag .....	29
3.4.1	Rechtliche Aspekte der Sammlung mit Fahrzeugen .....	29
3.4.2	Aufbau und Größe von Sammelfahrzeugen .....	30
3.4.2.1	Schüttvorrichtungen der Sammelfahrzeuge .....	31
3.4.2.2	Verdichtungsanordnungen der Sammelfahrzeuge .....	33
3.4.3	Ferntransport auf der Straße .....	36
3.5	Lagerung von Abfällen für die Entsorgung .....	38
3.5.1	Einführung .....	38
3.5.2	Begriffsbestimmungen .....	38
3.5.3	Sammelbehälter für brennbare, flüssige Abfälle .....	39
3.5.4	Anforderung an die Aufstellung von Abfallbehältern im Freien ..	40
3.5.5	Sammelbehälter zur Benutzung für die Allgemeinheit .....	41
3.5.6	Lagertypen der Sonderabfälle .....	41
3.5.7	Sicherheitsausstattung für die Abfalllagerung .....	42
3.5.8	Stationäre Schadstoff-Sammelstation für Gefahrstoffe .....	44

4	Abfalltechnologien/Aufbereitungstechnik .....	47
4.1	Zerkleinerung .....	47
4.1.1	Grundlage der Zerkleinerung /1/ .....	48
4.1.2	Beanspruchungsart und verfügbare Maschinen /2/ .....	51
4.1.3	Abfallzerkleinerungsverfahren /3/ .....	52
4.1.4	Auswahlkriterien für Zerkleinerungsaggregate zur Optimierung des Inputs in die nachfolgende biologische Stufe /4/ .....	56
4.1.4.1	Rotorscheren .....	57
4.2	Trennen /2/ /3/ .....	59
4.2.1	Klassier- und Sortierverfahren .....	59
4.2.2	Siebe/Roste .....	60
4.2.3	Elektroscheider .....	64
4.2.4	Dichtesortierer .....	66
4.2.5	Magnetscheider .....	68
4.2.6	Optische Scheider .....	70
4.2.7	Sichter .....	71
4.3	Kompaktierung .....	73
5	Biologische Abfallbehandlung .....	77
5.1	Begriffsbestimmungen .....	79
5.2	Prozessstufen der Hausbioabfallentsorgung .....	80
6	Recycling von Baureststoffen .....	123
7	Altlasten .....	133
	Abbildungsverzeichnis .....	177
	Tabellenverzeichnis .....	179

# 1 Kurze Einführung in das Abfallrecht

Das **Abfallrecht** enthält Vorschriften zur umweltgerechten Entsorgung von Abfällen. Das Abfallrecht stellt ein Zentralgebiet des Umweltrechtes dar und hat Bezüge zu fast allen anderen Gebieten des Umweltschutzes wie z.B. zum Naturschutz, zum Gewässerschutz und zum Immissionsschutz.

Wichtigstes Instrument des Abfallrechts ist das Abfallgesetz/Kreislaufwirtschaftsgesetz, dieses wird u.a. ergänzt durch entsprechende Verordnungen. Sonderbereiche des Abfallrechts werden z. B. im Tierkörperbeseitigungsgesetz sowie zur Beseitigung von Abfällen beim Aufsuchen von Bodenschätzen im Bergrecht geregelt.

Das Abfallrecht des Bundes wird ergänzt durch Ausführungsgesetze und Verordnungen der Bundesländer. Im Rahmen des Abfallgesetzes aus dem Jahre 1986 wurden die Grundprinzipien des Abfallwirtschaftsprogrammes auch durch gesetzliche Regelungen, wie z.B. einem Gebot zur Abfallverwertung, abgesichert. 1993 hat die Bundesregierung beschlossen, das Abfallgesetz in ein neues Kreislaufwirtschaftsgesetz zu überführen, das am 7. Oktober 1996 in Kraft getreten ist (UBA, 1999).

Rechtliche Grundlagen für die Abfallwirtschaft können allgemein als Abfallrecht bezeichnet werden. Innerhalb des Abfallrechts existieren folgende vier Hierarchieebenen.

Tabelle : Hierarchie des Abfallrechts

<i>Hierarchieebenen</i>	<i>Beispiele für Rechtsvorschriften / Richtlinien</i>	
Europäische Union Rechtsverordnungen der EU		Deponierichtlinie AbfallRahmenRichtlinie
		Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung
	MACROBUTTON HtmlResAnchor 259/93/ EWG	Verordnung zur Überwachung und Kontrolle der Verbringung von Abfällen in der, in die und aus der Europäischen Gemeinschaft
	MACROBUTTON HtmlResAnchor 75/442/ EWG	Richtlinie über Abfälle (75/442/EWG)
	MACROBUTTON HtmlResAnchor Begleitschein	Entscheidung der EG-Kommission über den einheitlichen Begleitschein zur Überwachung und Kontrolle der Verbringung von Abfällen in der, in die und aus der Europäischen Gemeinschaft
Bund	MACROBUTTON HtmlResAnchor KrW-/ AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
	BioAbfV	Verordnung über die Verwertung von unbehandelten und behandelten Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung)
	MACROBUTTON HtmlResAnchor AbfBetrbVO	Verordnung über Betriebsbeauftragte für Abfall
	MACROBUTTON HtmlResAnchor AbfKlärV	Klärschlammverordnung
	MACROBUTTON HtmlResAnchor AltöIV	Altölverordnung



	MACROBUTTON HtmlResAnchor "FCKW- VerbotsVO"	Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen
	MACROBUTTON HtmlResAnchor "VerpackVO"	Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen
	MACROBUTTON HtmlResAnchor AltautoVO (E)	Verordnung über die Überlassung und umweltverträgliche Entsorgung von Altautos
	MACROBUTTON HtmlResAnchor AbfVerBrG	Gesetz über die Überwachung und Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung von Abfällen
	DepV	Deponieverordnung
	MACROBUTTON HtmlResAnchor LAGA	z.B. Merkblatt zu Schlacken aus HMV, M10 Kompost
Land		Landesabfallgesetze
	MACROBUTTON HtmlResAnchor Pflanzen- Abfall-VO einiger Bundesländer	Verordnung über die Beseitigung pflanzlicher Abfälle außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen
entsorgungspflichtige Körperschaften		Abfallsatzungen der Kommunen

Es gilt der Grundsatz: Die rückstandsarme Kreislaufwirtschaft hat Vorrang vor der Abfallentsorgung.

Unter Kreislaufwirtschaft ist zu verstehen, dass möglichst alle Rückstände in einem Kreislauf geführt werden sollen, d.h. Stoffflüsse gelangen zu ihrem Ursprung zurück. Mit der Kreislaufwirtschaft verbindet sich der Gedanke: Grundsätzlich Rückstände vermeiden oder vermindern, anfallende Abfälle verwerten und als letzte Möglichkeit sollte die Entsorgung von Abfällen, d.h. die Nichtrückführung von Rückständen, in Erwägung gezogen werden.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz setzt folgende Prämissen:

1. Vermeidung
2. Verwertung
3. Beseitigung

Mit dem KrW-/AbfG wird ein neuer, vorsorgeorientierter Abfallbegriff geschaffen. Danach sind Abfälle nicht länger nur Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will, sondern auch solche Stoffe, Rückstände oder Reststoffe, die weder zielgerichtet produziert noch zweckentsprechend eingesetzt werden. Hierzu zählen beispielsweise Metallspäne oder Schadstoffe aus der Industrie ebenso wie Altautos oder Altpapier. Der aus dem europäischen Recht übernommene neue Abfallbegriff kommt nunmehr auch national zur Anwendung, nachdem er vorher allerdings bereits für die grenzüberschreitende Abfallverbringungen aufgrund des Abfallverbringungsgesetzes galt.

---

Vorrangiges Ziel des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes ist es, das Abfallrecht und die Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln.

Eckpunkte der neuen Gesetzgebung sind:

- die konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips,
- die Schaffung einer vermeidungsorientierten Pflichtenhierarchie (Vermeidung vor stofflicher und energetischer Verwertung),
- die Gleichrangigkeit von stofflicher und energetischer Verwertung mit der Möglichkeit den Vorrang per
- Rechtsverordnung für einzelne Abfallarten festzulegen,
- die Produktverantwortung für die Produzenten (diese ist jeweils durch Rechtsverordnung zu konkretisieren) und
- erweiterte Möglichkeiten zur Privatisierung der Entsorgung.

Durch integrierte Kreislaufführung von Einsatz- und Hilfsstoffen, wie zum Beispiel Lösemittel oder Öle, sollen Abfälle einerseits bereits in den Produktionsverfahren soweit wie möglich vermieden werden; andererseits sollen durch die im Gesetz verankerte Produktverantwortung die Produkte so gestaltet werden, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch Abfälle vermindert werden und nach ihrem Gebrauch eine umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung sichergestellt ist. Produkte sollen daher mehrfach verwendbar, langlebig, reparaturfreundlich und schadstoffarm sein. Auf diese Weise sollen ökologisch sinnvolle, abfallarme Produkte entwickelt werden. Diese Produktverantwortung muss allerdings auch künftig durch Verordnung konkretisiert werden, da es nicht möglich war, die Anforderungen an die Produktverantwortung pauschal festzulegen.

Weiterhin müssen nicht vermeidbare Abfälle umweltverträglich verwertet werden. Dabei sind stoffliche Verwertung (Recycling) und energetische Verwertung gleichermaßen zulässig. Vorrang hat immer im Einzelfall die umweltverträglichste Verwertungsart. Die Bundesregierung ist ermächtigt, die umweltverträglichste Verwertungsart für einzelne Abfallarten durch Rechtsverordnungen zu bestimmen. Die energetische Verwertung ist allerdings nur dann zulässig, wenn

- die Abfälle einen Heizwert von mindestens 11.000 kJ / kg aufweisen,

- die Feuerungsanlage einen Feuerungswirkungsgrad von 75% erzielt und
- die gewonnene Wärme selbst genutzt oder an Dritte abgegeben wird.

Dies bedeutet einerseits, dass die energetische Verwertung nur zur hoch effizienten Energiegewinnung erfolgen darf und andererseits, dass die Abfallverbrennung nicht als energetische Verwertung gelten kann.

Es dürfen nur noch solche Abfälle beseitigt werden, die nicht verwertet werden können. Das Gesetz legt durch seine strengen Anforderungen in Verbindung mit der Deponieverordnung und der 17. und 30. BImSchV einen sehr hohen Standard für die umweltverträgliche Behandlung und Ablagerung der zu beseitigenden Abfälle fest.

Wichtige Rechtsvorschriften werden in den jeweiligen Abschnitten erläutert.

## 2 Abfallarten, Abfallzusammensetzung, Mengenerwicklung

In der Abfallwirtschaft werden viele verschiedene Abfallarten unterschieden. Innerhalb einer Abfallart ähneln sich die Eigenschaften. Benannt werden die Abfallarten i.d.R. nach der Herkunft.

Die Art der Abfälle gliedert sich in zwei „Hauptfraktionen“, in „gefährliche“ und „nicht gefährliche“ Abfälle. Eine Gliederung erfolgt nach der Herkunft und wird mit Schlüsselnummern des European Waste Catalogue – EWC“ versehen. In Deutschland wird diese Gliederung in der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) umgesetzt. Europa hat somit eine einheitliche Bezeichnung für die Abfallarten gefunden. Deutschland war hier in der Vergangenheit Vorreiter gewesen und hat schon vor Jahrzehnten seine Abfälle systematisiert<sup>1</sup>.

Die Hauptherkünfte der Abfälle sind Haushalte, Kommunen oder Betriebe. Ziel dieser Gliederung sind die Gewinnung statistischer Daten und die Kontrolle.

Haushalte werden als Abfallerzeuger weiter untergliedert (Bundesländer, Gemeinden, Einwohner). Betriebe werden als Abfallerzeuger entsprechend Größe, Tätigkeitsbereich und Branche erfasst.

Die Menge der Abfälle muss als Grundlage für Planung und Kontrolle und natürlich die Kosten- und Gebührenabrechnung erfasst werden. Besonders mengenrelevant sind Bauabfälle (z.B. Bodenaushub).

### 2.1 Abfallarten

Abfälle fallen fast überall in der Gesellschaft an. Je nach Herkunftsbe-  
reich werden feste, flüssige oder pastöse Materialien und Stoffe produ-  
ziert. Hierbei lassen sich Hauptgruppen unterscheiden.

Einige der Abfallarten sollen kurz erklärt werden:

#### Siedlungsabfälle

Oberbegriff für in Siedlungsgebieten anfallende Abfälle, wie Hausmüll, Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Garten- und Parkabfälle, Marktabfälle, Straßenkehricht, Bauabfälle, Klärschlamm, Fäkalien, Fä-

1. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: LAGA - Informationsschrift Abfallarten. Erich Schmidt Verlag, Berlin (1992).

kalschlamm, Rückstände aus Abwasseranlagen und Wasserreinigungsschlämme.

### Hausmüll

Hausmüll sind die festen Abfälle, die in einem Entsorgungsgebiet, in vorgegebenen Abfallbehältern, regelmäßig von der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaft oder von einem beauftragten Dritten gesammelt und zu einer Abfallbehandlungs- bzw. -entsorgungsanlage transportiert werden. Sie setzen sich aus Nahrungs- und Küchenabfällen, Papier, Textilien, Altglas, Verpackungen, kleineren Metallteilen, Kehricht und Heizrückständen zusammen.

### Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle

Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sind feste Stoffe, die in Gewerbebetrieben, Geschäften und der Industrie anfallen. Sie sind keine produkionspezifischen Abfälle und werden aufgrund ihres Umfangs und ihrer Beschaffenheit zusammen mit dem Hausmüll entsorgt. Zum hausmüllähnlichen Gewerbeabfall zählen nicht produkionspezifische Abfälle, wie u. a. Garten-, Kantinen- und Büroabfälle.

### Sperrmüll

Sperrmüll ist fester Abfall aus dem Haushalt, welcher aufgrund seiner Größe und Sperrigkeit nicht mit den ortsüblichen Behältnissen gesammelt werden kann. Der Sperrmüll setzt sich vor allem aus großen Haushaltsgeräten, Möbeln, Teppichen und Matratzen zusammen.

### Bauabfälle

Bauabfälle sind Bodenaushub, Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfälle. Bodenaushub umfasst sowohl natürlich gewachsenes als auch bereits verwendetes Erd- und Felsmaterial. Bauschutt ist Betonmasse mit i.d.R. Metallteilen, Mörtel- und Papierreste sowie Holz, aber auch Schlämmen aus der Beton- und Zementherstellung. Man unterscheidet beim Straßenaufbruch zwischen mineralischem Straßenaufbruch und bitumenhaltigem Straßenaufbruch. Mineralischer Straßenaufbruch ist ungebundenes oder hydraulisch gebundenes, mineralisches Straßenbaumaterial, das nicht mit Fremdstoffen verunreinigt ist. Dazu gehören unter anderem Aufbruch aus Betonstraßen, Natur- und Betonwerksteine wie z.B. Pflaster, Bordsteine, Platten aus Natursteinen usw.. Bitumenhaltiger Straßenaufbruch (Ausbauasphalt) ist für Deck-, Binder- oder Tragschichten verwendetes Material, das bitumenhaltig, jedoch kein teerhaltiges Bindemittel enthält.

## Bioabfälle

Bioabfall ist die Kurzform von "biogener Abfall". Er umfasst Grünabfälle und Grünschnitte aus dem Garten oder Nahrungsmittelabfälle, wie Kartoffelschalen, Kaffeefilter und Eierschalen (keine Fleisch- und Fischreste). Beides kann aus Haushalt oder Gewerbe stammen. Bioabfälle sind ihrer Natur nach durch Mikroorganismen abbaubar. Pro Einwohner und Jahr fallen in Deutschland 50 - 100 kg Bioabfall an. Menge und Zusammensetzung sind stark abhängig von der Siedlungsstruktur.

## Straßenkehricht

Zum Straßenkehricht gehören die Abfälle, die durch die kommunalen Kehrmaschinen gesammelt werden. Sie setzen sich aus Laub, kleinerem Geäst, Kleinmüll oder Abrieb von Straßenoberflächen und Autoreifen zusammen.

## Produktionsspezifische Abfälle

Produktionsspezifische Abfälle sind Stoffe und Materialien, die im Herstellungsprozess anfallen und zurückgeführt werden können. Hierzu zählen verdorbene Rohware, Säuren, Laugen, Lösungsmittel, Farben und Lacke etc.

## Sonderabfälle – Gefährliche Abfälle

Sonderabfälle sind gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetzes sog. gefährliche Abfälle, da sie gesundheits- und umweltgefährdend sind. Vorbehandlung, Deponierung und Verbrennung von Sonderabfällen unterliegen besonderen gesetzlichen Bestimmungen. Einer u.U. notwendigen Deponierung von Sonderabfall muss eine Behandlung vorausgehen, mit dem Ziel der auslaugsicheren Einbindung von Schadstoffen (Inertisierung) und der Volumenreduktion. Strenge Anforderungen werden hinsichtlich der Sicherheit und Überwachungsmöglichkeit von Sonderabfalldeponien gestellt. Der Begriff „Sonderabfall“ ist nur umgangssprachlich in Gebrauch!

## Klärschlämme, Rechen- und Sandfanggut

Klärschlämme, Rechen- und Sandfanggut fallen in Wasser- und Abwasserbehandlungsanlagen an. Sie kommen in flüssiger, entwässerter und getrockneter Form vor.

## Krankenhausabfälle

Umfassen die im gesamten medizinischen Bereich (Krankenhäuser, Arztpraxen, Laboratorien etc.) anfallenden Abfälle, wie z.B. infektiöse Abfälle, Körperteile, Wund- und Gipsverbände sowie Spritzen. Auch bei den Krankenhausabfällen handelt es sich vielfach um Sonderabfälle.

## 2.2 Gliederung der Abfallarten

Die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis<sup>2</sup> wird in Deutschland in der Abfallverzeichnis-Verordnung<sup>3</sup> umgesetzt. Die Bezeichnung von Abfallarten ist damit europäeinheitlich geregelt. Die Einstufung von Abfällen erfolgt nach der Herkunft und nach der Überwachungsbedürftigkeit. Die jeweilige Abfallart erhält eine sechsstellige Schlüsselnummer:

Von den 838 Abfallarten gelten 403 als „gefährliche“ Abfälle.

01	Obergruppe
01 01	Gruppe
01 01 01	Abfallart
01 01 99	Abfallart a.n.g. (anders nicht genannt (Auffangposition))

- 
2. 94/3/EG: Entscheidung der Kommission vom 20. Dezember 1993 über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle *Amtsblatt Nr. L 005 vom 07/01/1994 S. 0015 - 0033*
  3. AVV vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I Nr. 65 vom 12.12.2001 S. 3379; 25.4.2002 S. 1488; 24.7.2002 S. 2833, 15.7.2006 S. 1619 Inkrafttreten) Gl.-Nr.: 2129-27-2-14

Tabelle 1: Obergruppen des Abfallkatalogs

<b>EWC-Code</b> Obergruppe	<b>EWC-Bezeichnung</b> (Herkunft)
01	Abfälle aus der Exploration der Gewinnung und der Nach- bzw. Weiterverarbeitung von Mineralien sowie Steinen und Erden
02	Abfälle aus der Landwirtschaft, dem Gartenbau, der Jagd, Fischerei und Teichwirtschaft, Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln
03	Abfälle aus der Holzverarbeitung und der Herstellung von Zellstoffen, Papier, Pappe, Platten und Möbeln
04	Abfälle aus der Leder- und Textilindustrie
05	Abfälle aus der Ö raffination, Erdgasreinigung und Kohlepyrolyse
06	Abfälle aus anorganischen chemischen Prozessen
07	Abfälle aus organischen chemischen Prozessen
08	Abfälle aus Herstellung; Zubereitung, Vertrieb und Anwendung (HZVA) von Überzügen (Farben; Lacken; Email), Dichtungsmassen und Druckfarben
09	Abfälle aus der photographischen Industrie
10	Anorganische Abfälle aus thermischen Prozessen
11	Anorganische metallhaltige Abfälle aus der Metallverarbeitung und -beschichtung sowie aus der Nichteisen-Hydrometallurgie
12	Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung und Oberflächenbearbeitung von Metallen, Keramik, Glas und Kunststoffen
13	Ölabfälle (außer Speiseöle und 0500 00 und 1200 00)
14	Abfälle von als Lösemittel verwendeten organischen Stoffen (außer 0700 00 und 0800 00)
15	Verpackungen, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterial und Schutzkleidung (a.n.g.)
16	Abfälle, die nicht anderswo im Katalog aufgeführt sind
17	Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Straßenaufbruch)
18	Abfälle aus der ärztlichen oder tierärztlichen Versorgung und Forschung (ohne Küchen- und Restaurantabfälle, die nicht aus der unmittelbaren Krankenpflege stammen)
19	Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen und der öffentlichen Wasserversorgung
20	Siedlungsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen, einschließlich getrennt gesammelte Fraktionen

Da besonders die Gruppe 20 „Siedlungsabfälle“ täglich für Jeden sichtbar ist, soll für diese Gruppe die weitere Unterteilung beispielhaft vorgestellt werden.

Tabelle 2: Abfallarten der Gruppe 20 „Siedlungsabfälle“ (folgende Seiten)



## 2 Abfallarten, Abfallzusammensetzung, Mengenentwicklung

<b>20 01</b>	<b>Getrennt gesammelte Fraktionen (außer 15 01)</b>
20 01 01	Papier und Pappe
20 01 02	Glas
20 01 08	biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle
20 01 10	Bekleidung
20 01 11	Textilien
20 01 13*	Lösemittel
20 01 14*	Säuren
20 01 15*	Laugen
20 01 17*	Fotochemikalien
20 01 19*	Pestizide
20 01 21*	Leuchtstoffröhren und andere quecksilberhaltige Abfälle
20 01 23*	gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten
20 01 25	Speiseöle und -fette
20 01 26*	Öle und Fette mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 25 fallen
20 01 27*	Farben, Druckfarben, Klebstoffe und Kunstharze, die gefährliche Stoffe enthalten
20 01 28	Farben, Druckfarben, Klebstoffe und Kunstharze mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 27 fallen
20 01 29*	Reinigungsmittel, die gefährliche Stoffe enthalten
20 01 30	Reinigungsmittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 29 fallen
20 01 31*	zytotoxische und zytostatische Arzneimittel
20 01 32	Arzneimittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 31 fallen
20 01 33*	Batterien und Akkumulatoren, die unter 16 06 01, 16 06 02 oder 16 06 03 fallen, sowie gemischte Batterien und Akkumulatoren, die solche Batterien enthalten
20 01 34	Batterien und Akkumulatoren mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 33 fallen
2 001 35*	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte, die gefährliche Bauteile 6 enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21 und 20 01 23 fallen
20 01 36	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21, 20 01 23 und 20 01 35 fallen
20 01 37*	Holz, das gefährliche Stoffe enthält
20 01 38	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 20 01 37 fällt
20 01 39	Kunststoffe
20 01 40	Metalle
20 01 41	Abfälle aus der Reinigung von Schornsteinen
20 01 99	sonstige Fraktionen a. n. g.
<b>20 02</b>	<b>Garten- und Parkabfälle (einschließlich Friedhofsabfälle)</b>
20 02 01	biologisch abbaubare Abfälle
20 02 02	Boden und Steine
20 02 03	andere nicht biologisch abbaubare Abfälle
<b>20 03</b>	<b>Andere Siedlungsabfälle</b>
20 03 01	gemischte Siedlungsabfälle
20 03 02	Marktabfälle
20 03 03	Straßenkehricht
20 03 04	Fäkalschlamm
20 03 06	Abfälle aus der Kanalreinigung
20 03 07	Spermüll
20 03 99	Siedlungsabfälle a. n. g.

## 2.3 Abfallzusammensetzung und Mengenentwicklung

### Abfallaufkommen nach Abfallarten und Verwertung/Beseitigung in Deutschland

Das Abfallaufkommen blieb in den letzten Jahren in gewissen Grenzen stabil. Verändert hat sich der Anteil der Abfälle, die einer Verwertung zugeführt werden. Deutlich wird, dass das Aufkommen an Siedlungsabfällen relativ gering ist (1).

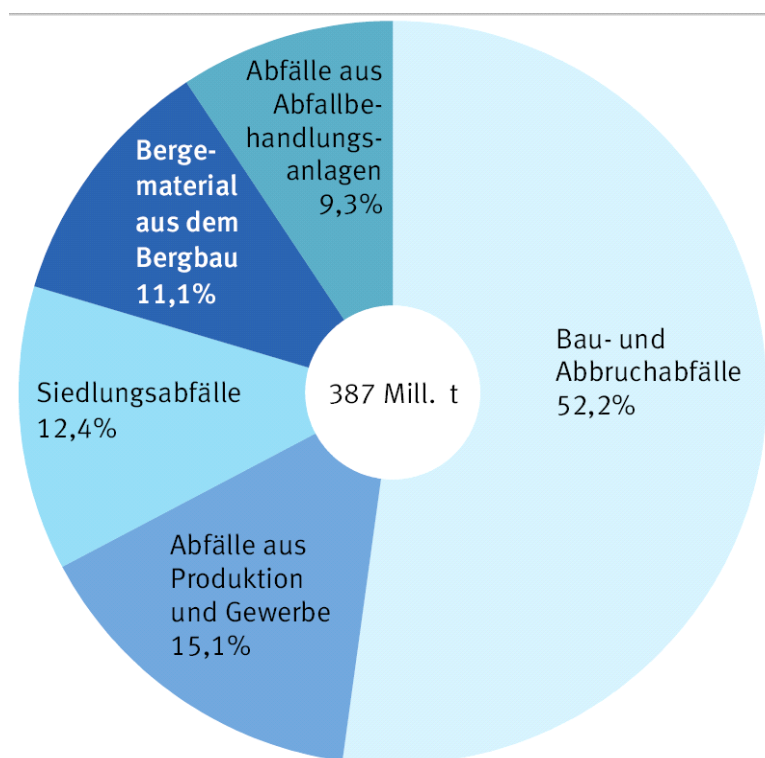


Abb. 2.1: Zusammensetzung des Abfallaufkommens 2007<sup>4</sup>

Siedlungsabfälle beinhalten natürlich die aus Haushalten stammenden „Haushaltsabfälle“, diese dann den Hausmüll (Restmüll, in der „grauen“ Tonne gesammelt) und viele getrennt gesammelte Fraktionen (3).

4. DeStatis, 2007: Nachhaltige Abfallwirtschaft in Deutschland; Statistisches Bundesamt

Tabelle 3: Siedlungsabfallaufkommen<sup>4</sup>

	2002	2003	2004	2005
<b>Siedlungsabfälle</b>	52 772	49 622	48 434	46 555
darunter:				
nicht gefährliche <b>Haushaltsabfälle</b>	46 420	43 668	42 878	41 092
davon:				
<b>Hausmüll</b> , hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die örtliche Müllabfuhr eingesammelt	17 090	15 824	15 558	13 912
Spermüll	2 933	2 608	2 589	2 167
Abfälle aus der Biotonne	3 465	3 447	3 661	3 776
Garten- und Parkabfälle biologisch abbaubar	4 163	3 845	4 172	3 924
Andere getrennt gesammelte Fraktionen	18 769	17 944	16 899	17 313
davon:				
Glas	3 106	3 289	3 100	3 572
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	8 590	8 419	7 740	7 895
Leichtverpackungen/Kunststoffe	5 654	4 929	4 734	4 601
Elektronische Geräte	105	104	52	49
Sonstiges (Verbunde, Metalle, Textilien...)	1 313	1 204	1 273	1 196

Zu erkennen ist, dass in Deutschland heute mehr verwertet als beseitigt wird. Das zeigt sich nicht nur bei den Zahlen für die einzelnen Abfallarten, sondern auch bei den „Anlagenzahlen“ (4). Die Angaben spiegeln nicht die derzeitige Situation wider. Seit dem 1. Juni 2005 gilt in Deutschland eine Vorbehandlungspflicht für Siedlungsabfälle. Die auf Deponien abgelagerte Abfallmenge geht also stark zurück.

Tabelle 4: Input ausgewählter Abfallentsorgungsanlagen<sup>4</sup>

Jahr	Ins- gesamt	Deponien	Thermische	Biologische	Sortieranlagen
			Abfallbehandlungsanlagen	Behandlungsanlagen	
1 000 t					
1998	124 623,5	63 504,8	11 898,3	7 730,5	14 328,4
1999	132 473,4	63 588,3	14 091,4	8 785,2	16 411,8
2000	144 574,0	63 060,5	15 187,3	10 284,1	19 252,5
2001	144 905,7	60 701,9	15 591,0	10 374,4	20 685,5
2002	145 965,3	60 921,3	16 039,7	12 242,1	21 823,2
2003	142 542,2	54 362,2	16 446,3	12 287,6	21 676,6
2004	158 343,3	56 674,8	18 416,9	12 391,3	22 679,1
2005	151 500,7	45 665,3	19 481,3	12 412,1	22 179,4

Deutlich ist aber der Anstieg der Abfälle, die auf Sortieranlagen landen und dann den Weg der Verwertung gehen werden, zu erkennen. Seit dem Jahrtausendwechsel ist zu erkennen, dass mehr Hausmüll verwertet als beseitigt wird (2), bei einigen Abfällen ist die Verwertungsquote noch höher (3).

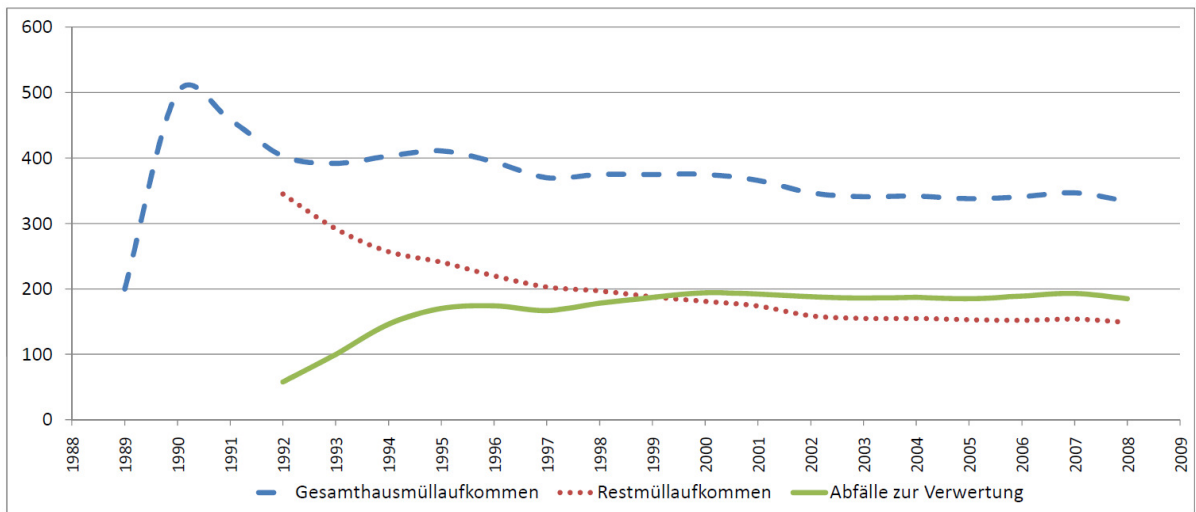


Abb. 2.2: Aufkommen, Verwertung und Beseitigung von Hausmüll in MV

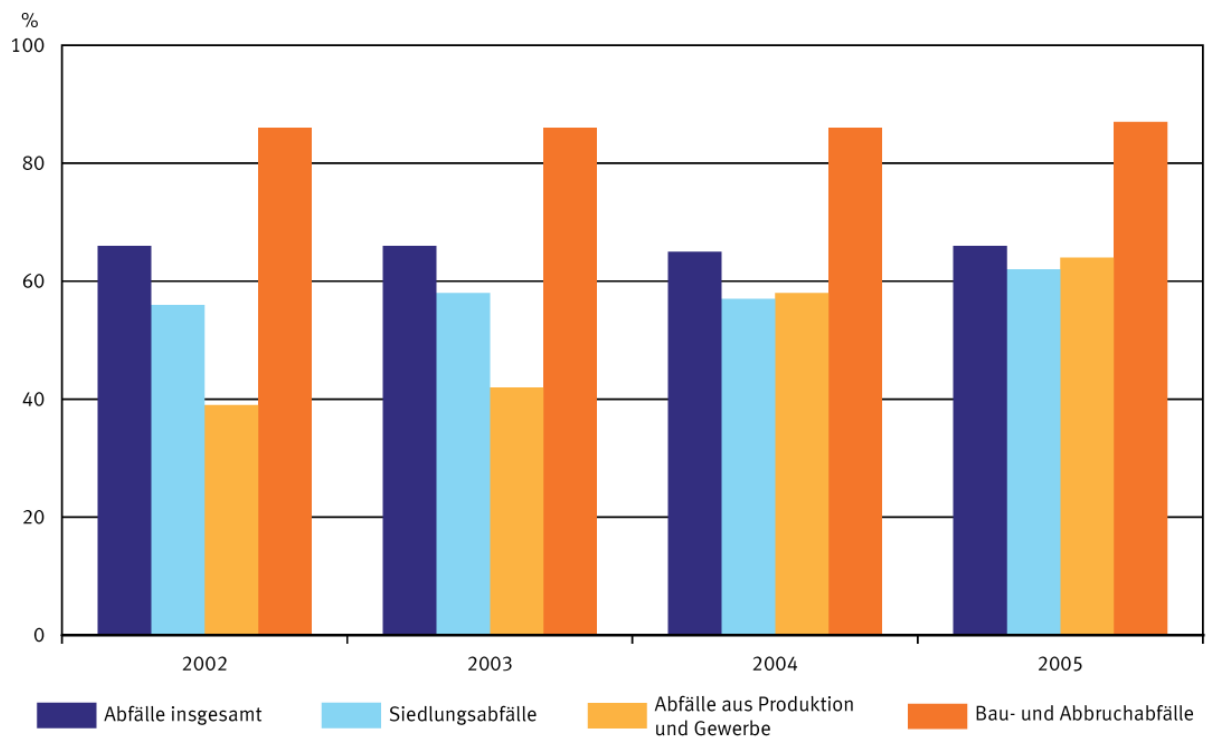


Abb. 2.3: Verwertungsquoten der Hauptabfallströme<sup>4</sup>

Die Darstellungen zeigen, dass bereits einige Ziele der abfallrechtlichen Gesetzgebung erreicht wurden. Kurz soll hier an diese Ziele erinnert werden:

- Verminderung der gesamten Umweltbelastung, d.h. der Boden, Luft- und Wasserbelastung sowie des Verbrauches von Energie und Deponievolumen durch den Umgang mit Abfällen auf ein tolerierbares Maß.
  - Vermeidung oder Verminderung von Abfällen an der Quelle
  - Vermeidung oder Verminderung von Schadstoffen bei der Produktion
  - Vermeidung durch verbesserte Verwertung
  - Entlastung der Umwelt durch umweltverträgliche Behandlung der verbleibenden Abfälle.



# Universität Rostock

---

## Weiterbildendes Fernstudium Umweltschutz

Christian Füll

### Reinhaltung der Luft

---

**Universität Rostock**

Zentrum für Qualitätssicherung in Studium und Weiterbildung

---

## Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	
1	Entstehung von Luftverunreinigungen .....	7
2	Wirkungen der Luftverunreinigungen .....	9
3	Verfahren zur Luftreinhaltung .....	11
3.1	Verfahren und Anlagen zur Entstaubung von Abgasen .....	11
3.1.1	Allgemeiner Überblick .....	11
3.1.2	Abscheidegrade .....	12
3.1.3	Schwerkraftabscheider .....	14
3.1.4	Umlenkabscheider .....	15
3.1.5	Fliehkraftabscheider .....	16
3.1.5.1	Aufbau und Abscheidemechanismus .....	16
3.1.5.2	Dimensionierung von Zyklonen .....	18
3.1.6	Filternde Abscheider .....	27
3.1.6.1	Abscheidemechanismen und Abscheidegrad .....	27
3.1.6.2	Abreinigungsfilter .....	29
3.1.6.3	Speicherfilter .....	39
3.1.6.4	Schütttschichtfilter .....	40
3.1.7	Naßabscheider .....	44
3.1.7.1	Abscheidemechanismus und Abscheidegrad .....	44
3.1.7.2	Berechnung der Druckverluste .....	47
3.1.7.3	Bauarten .....	48
3.1.7.4	Tropfenabscheider .....	54
3.1.8	Elektrische Abscheider .....	55
3.1.8.1	Abscheidemechanismen und Abscheidegrad .....	55
3.1.8.2	Auslegung von Elektrofiltern .....	58
3.1.8.3	Bauformen und Anwendungsbeispiele .....	59
3.2	Verfahren und Anlagen zur Abscheidung dampf- und gasförmiger Schadstoffe .....	62
3.2.1	Rückgewinnungsverfahren .....	62
3.2.1.1	Kondensationsverfahren .....	62
3.2.1.2	Absorptionsverfahren .....	63
3.2.1.3	Adsorptionsverfahren .....	66
3.2.2	Umwandlungsverfahren .....	69
3.2.2.1	Flammenverbrennung .....	69
3.2.2.2	Thermische Nachverbrennung .....	69
3.2.2.3	Katalytische Nachverbrennung .....	71
3.2.3	Biologische Verfahren .....	74
4	Literaturverzeichnis .....	77
5	Fragen zur Leistungskontrolle .....	79

## **Vorwort**

Die vorliegende erste Auflage der Studienmaterialien:

### **Reinhaltung der Luft**

entspricht ungefähr der gleichlautenden Vorlesung, die ich im Rahmen einer Privatdozentur seit 1994 am Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität Rostock vor Direktstudenten halte.

Bei der Zusammenstellung des Materials habe ich vor allem die wichtigsten deutschsprachigen Monographien berücksichtigt, die mit unterschiedlichen Schwerpunkten in den letzten 10 Jahren erschienen sind. Eigene Erfahrungen aus meiner 30-jährigen beruflichen Tätigkeit am früheren Institut für Landtechnik der Universität Rostock (1967 bis 1974) und am jetzigen „Blaue Liste“-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (seit 1974) konnte ich besonders im Kapitel „Fliehkraftabscheider“ einfließen lassen. Mit der Optimierung, Dimensionierung und industriellen Entwicklung von Zyklonabscheidern befasste ich mich seit Anfang der 80er Jahre.

Auf Grund des vorgegebenen Limits konnten einige wichtige Problemkreise nicht aufgenommen werden, so z.B. die verfahrenstechnischen und konstruktiven Möglichkeiten der Staubvermeidung an Staubquellen und die technischen Lösungen der Stauberfassung vor der Staubabscheidung, einschließlich ihrer Dimensionierung und Berechnung. Die Verfahren und Anlagen der Staubabscheidung sind relativ ausführlich dargestellt. Dies ermöglicht den Studierenden teilweise unter geringer Benutzung von weiterführender Literatur selbständig Dimensionierungen vorzunehmen, wobei anzumerken ist, daß vor allem bei Filtern und Naßabscheidern die Erfahrungen der Hersteller dominieren. Die Kapitel über Verfahren und Anlagen zur Abscheidung dampf- und gasförmiger Luftschadstoffe vermitteln in erster Linie einen guten Überblick. Die Dimensionierung der entsprechenden Apparate sind ohnehin Gegenstand der Disziplin „Thermische Verfahrenstechnik“. Der Studierende erhält jedoch aus dem Studienmaterial die Fähigkeit, Verwendung, Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen derartiger Anlagen zu beurteilen. Dem besonders Interessierten werden Hinweise auf die entsprechende Spezialliteratur gegeben.



## Vorwort

---

Von der zitierten Literatur sind als Gesamtdarstellungen besonders die Quellen [1], [3] und [6] zu empfehlen. Einen tieferen Einblick in Anlagen zur Staubabscheidung kann man durch das Studium der Quelle [8] und den dort gegebenen Hinweisen bekommen. Dimensionierungsgrundlagen über Anlagen zur Abscheidung dampf- und gasförmiger Luftschadstoffe sind u.a. in der Quelle [13] zu finden.

Zum Schluß möchte ich alle Leser um Hinweise zur Verbesserung dieses Lehrmaterials, auch auf etwa eingeschlichene Schreib- und Formfehler, bitten.

Potsdam-Bornim, September 1996

## 1 Entstehung von Luftverunreinigungen

Bei den Luftverunreinigungen ist zwischen natürlichen, z.B. Vulkanausbrüche oder Sandstürme, und durch die Tätigkeit der Menschen verursachten zu unterscheiden. Eine absolut reine Luft hat es zu keiner Zeit der Geschichte gegeben.

Nach einer Definition der Weltgesundheitsorganisation wird unter Luftverunreinigung verstanden, daß Stoffe in Menge, Konzentration und Zeitdauer vorliegen, die zur Schädigung von Menschen, Tieren und Pflanzen führen. Die negative Beeinflussung des globalen Klimas ist hierbei besonders zu beachten.

Die hauptsächlichsten Quellen für Luftverunreinigungen sind:

- Industrie
  - Energiewirtschaft
  - Chemische Industrie
  - Kohleverarbeitende Industrie
  - Bindemittelindustrie
  - Metallurgische Industrie
- Transportwesen
- Landwirtschaft
- Wohn- und Kommunalbereich

Innerhalb der **Industrie** ist besonders die Energiewirtschaft mit ihren zahlreichen Verbrennungsanlagen an der Emission nichttoxischer Stäube und gasförmiger Luftverunreinigungen in Form von Schwefelverbindungen, Stickoxide und Kohlenmonoxid beteiligt. In der chemischen Industrie und im Bereich der Metallurgie treten außerdem gesundheitsgefährdende Stäube, organische Verbindungen, Hallogene und Gerüche auf.

Im **Transportwesen** resultieren die Luftverunreinigungen nahezu ausschließlich aus der Emission von Abgasen der Verbrennungsmotoren. Für Dieselmotoren sind es vor allem Stickoxide, Aldehyde, Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid und bei Ottomotoren Blei, Stickoxid, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe.

Die in der **Landwirtschaft** emittierten Stäube sind mineralischer und organischer Herkunft. Sie sind besonders gesundheitsschädigend, wenn sie außerdem Pilzsporen enthalten. Gasförmige Luftverunreinigungen kommen in erster Linie aus der Tierhaltung, beispielsweise Schwefelverbindungen, organische Verbindungen und Gerüche.

In **Wohngebieten** werden Emissionen hauptsächlich durch Feuerungsstätten verursacht. In Abhängigkeit von der Brennstoffart überwiegen die gasförmigen Schadstoffe Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Stickoxide, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe in unterschiedlicher Menge. Hinzu kommen Stäube und Asche.

In **Kommunalbereichen** sind es neben Gewerbeeinrichtungen auch Deponien zur Müllentsorgung und Kompostieranlagen für organische Abfallstoffe. Sie sind oftmals Quellen für schädliche klimarelevante Gase.

## 2 Wirkungen der Luftverunreinigungen

Luftverunreinigungen können sich in ihren Wirkungen von kaum wahrnehmbar bis stark belästigend oder gar zum Tode führend bemerkbar machen. Sie können vorübergehend oder dauerhaft wirkend reversible oder irreversible Schädigungen hervorrufen. Betroffen können Menschen, Tiere, Vegetation, Materialien sowie begrenzte oder globale Lebensräume sein. Eine besondere Rolle nehmen Auswirkungen auf das Weltklima ein.

**Klimaveränderungen** werden durch die Treibhausgase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und FCKW - Stoffe mit klarem Trend hervorgerufen. Folgen können Temperaturerhöhung durch vermehrte Sonneneinstrahlung oder auch Temperaturerniedrigung durch höhere Staub- und Wolkenkonzentrationen sein. An quantitativ besseren Vorhersagen wird derzeit an vielen Stellen gearbeitet.

Die **Schädigung von Materialien** wird durch unterschiedliche Korrosionsmechanismen bewirkt. Baustoffe wandeln sich durch Schwefelsäure (saurer Regen) in Gips um. Bei Metallen wird die Korrosion hauptsächlich durch saure Spurengase verursacht, z.B.  $\text{SO}_2$ , Chlor- und Fluordämpfe. Auch Papier, Leder und Textilien werden durch saure Gase geschädigt.

Luftverunreinigungen können die **Schäden der Vegetation** direkt durch die Einwirkung von Gasen und Stäuben auf die oberirdischen Pflanzenteile oder indirekt über Boden und Wurzeln hervorrufen. Bekannt sind vor allem Waldschäden durch Raucheinwirkung oder sauren Regen.

**Schädigung der menschlichen Gesundheit** tritt durch die Aufnahme kontaminierter Nahrungsmittel und Getränke sowie durch Luftverunreinigungen in der Atemluft ein. Der Grad der Schädigung hängt von folgenden Faktoren ab [1]:

- Toxizität der Schadstoffe
- Konzentration der Schadstoffe und Dauer der Einwirkung
- kombinierte Einwirkung mehrerer Schadstoffe
- Umgebungsbedingungen
- Alter und gesundheitlicher Zustand der Menschen

Neben physischen und psychischen Schädigungen, die im schlimmsten Fall bis zum Tode führen können, werden auch Belästigungen z.B. durch Gerüche hervorgerufen. Gesundheitliche Schäden durch Luftverunreinigungen betreffen nicht nur die Atemwege. In Abhängigkeit von den aufgenommenen Stoffen können auch die verschiedensten Organe erkranken. **Grenzwerte**, die in verschiedenen Vorschriften und Gesetzen z.B. der TA Luft enthalten sind, sollen die schädlichen Wirkungen von Luftverunreinigungen verhindern.

### **3 Verfahren zur Luftreinhaltung**

Durch Verfahren zur Reinhaltung der Luft ist zu sichern, daß die Grenzwerte für die Emission und Immission gefährlicher Stoffe nicht überschritten werden. Dies ist grundsätzlich auf zwei Wegen möglich:

- Vermeiden von Luftverunreinigungen durch entsprechende Technologien
- Entfernen der Luftverunreinigungen an den Stellen der Emission

Die Verdünnung von Schadstoffen ist eine Maßnahme, die man nur in Ausnahmefällen anwenden sollte.

#### **3.1 Verfahren und Anlagen zur Entstaubung von Abgasen**

##### **3.1.1 Allgemeiner Überblick**

Verfahren und Anlagen zur Entstaubung von Abgasen kann man in mechanische und elektrische Abscheider unterteilen. Die mechanischen Abscheider gliedern sich wiederum in:

- Trockenabscheider
  - Massenkraftabscheider (Staubkammer, Prallkammer, Zyklon)
  - Filternde Abscheider (Gewebefilter, Schüttschichtfilter)
- Naßabscheider (Waschturm, Strahlwäscher)

Die Mechanismen für die Staubabscheidung beruhen auf der Anwendung von geeigneten Kräften und geometrischen Effekten:

- Trägheitskräfte
  - Schwerkraft (Staubkammer, Umlenkammer)
  - Fliehkraft (Fliehkraftabscheider)
  - allgemeine Trägheitskraft (Umlenkabscheider, mechanische Naßabscheider, Filter)
- Elektrische Kräfte (Elektroabscheider)

### 3 Verfahren zur Luftreinhaltung

#### 3.1 Verfahren und Anlagen zur Entstaubung von Abgasen

---

- Diffusion (Filter, Elektroabscheider)
- Grenzflächenkräfte (Naßabscheider, Filter, Elektroabscheider)
- Geometrische Effekte
  - Siebeffekt (Filter)
  - Sperreffekt (Filter)

##### 3.1.2 Abscheidegrade

Der **Gesamtabscheidegrad**  $T_{ges}$  eines Entstaubungssystems ist das Verhältnis von abgeschiedener Staubmasse  $m_G$  zur gesamten Staubmasse  $m_A$ , die der Entstaubungsanlage zugeführt wird:

$$T_{ges} = \frac{m_G}{m_A} \quad (1)$$

Der **Fraktionsabscheidegrad**  $T(x_p)$  gibt dagegen die abgeschiedene Staubmasse  $\Delta m_G$  einer bestimmten Teilchengrößenfraktion bezogen auf die Gesamtmasse  $\Delta m_A$  dieser Fraktion an. Er drückt damit den Verlauf des Abscheidegrades in Abhängigkeit von der Teilchengröße  $x_p$  aus:

$$T(x_p) = \frac{\Delta m_G}{\Delta m_A} \quad (2)$$

Für die Beurteilung von Staubabscheidern ist er besser geeignet. Er wird deshalb als Kennlinie von Abscheidern zur Berechnung von Gesamtabscheidegraden verwendet.

Filter und Elektroabscheider haben im Feinkornbereich eine höhere Staubabscheidung als Wäscher und Zyklone (Abbildung 1):