

## **Abfälle und Emissionen beim Betrieb von Kraftwerken**

### **Definitionen und Abgrenzungen**

#### **Was sind Abfälle?**

Unter Abfällen oder Abfallstoffen versteht man ganz allgemein Überreste in Form fester und frei transportierbarer Stoffe bzw. Sachen, die in privaten Haushalten, in industriellen und öffentlichen Prozessen oder bei Dienstleistungen anfallen. Dazu gehören auch chemische und radioaktive Rückstände in fester Form. Laut gesetzlicher Definition gehören zum Abfall auch Stoffe in fester oder flüssiger Form, soweit sie sich in festen Behältern befinden. Die Kreislauf- und Abfallgesetze unterscheiden dabei zwischen „Abfall zur Verwertung“, sog. Wert- oder Reststoffen, und „Abfall zur Beseitigung“, der entweder zur Energie- und/oder Wärmeerzeugung verbrannt oder auf Deponien gelagert wird.

In jedem Fall ist der Verursacher und/oder der Besitzer der Abfälle verpflichtet, eine gesetzmäßige, der definierten Abfallkategorie entsprechende Entsorgung bzw. Verwertung sicherzustellen. Stoffe, die nicht in den entsprechenden Gesetzen, Ausführungsbestimmungen oder Verordnungen als Abfall aufgeführt werden, sind juristisch kein Abfall, sondern ein Wirtschaftsgut. Allgemeiner Grundsatz moderner Gesetzgebung ist: „Vermeidung geht vor Verwertung und diese vor Beseitigung“.

#### **Was sind Emissionen?**

Der Begriff „Emission“ ist aus dem Lateinischen („emittere“ = aussenden) abgeleitet und bedeutet „Ausstrahlung, Aussendung“. Im Zusammenhang mit dem Thema Energie sind Emissionen nach physikalischen und technischen Gesichtspunkten zu unterscheiden.

#### **Emissionen im physikalischen Sinn:**

- Lichtemission durch leuchtende Körper
- Emission von anderen elektromagnetischen Strahlungen (z. B. Röntgen- oder Gammastrahlen)
- Emission von einzelnen Teilchen (z. B. Alpha- und Betateilchen, Neutronen usw.) beim radioaktiven Zerfall und bei anderen Kernprozessen
- Emission von Elektronen:  
Glühemission durch hohe Temperatur aus Metallen und Oxiden (angewandt bei Elektronenröhren oder Bildröhren der Fernsehempfänger) und Photoemission (Licht) in Photozellen (angewandt bei der Photovoltaik)

### **Emissionen im technischen Sinn**

Darunter versteht man die Emission fester Partikel (z. B. Staub) sowie flüssiger und gasförmiger Stoffe, die durch industrielle Anlagen oder technische Prozesse in die Umwelt, d. h. in die Atmosphäre, in Gewässer oder in den Boden, gelangen. Diese Emissionen verändern die natürliche Zusammensetzung der Atmosphäre, der Gewässer oder des Bodens und führen meist zu Verunreinigungen, die das ökologische Gleichgewicht empfindlich stören können.

Zu den Emissionen bei Verbrennungsanlagen (z. B. Kraftwerke) und Verbrennungsmotoren (z. B. Kraftfahrzeuge) für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe zählen vor allem die Verbrennungsprodukte Schwefeloxide  $\text{SO}_x$ , Stickoxide  $\text{NO}_x$  und Kohlenstoffoxide  $\text{CO}_x$  sowie die staubförmigen Feststoffauswürfe Asche, Ruß, Flug- und Feinstaub.

Diese technischen Emissionen, die vor allem in Rauch- und Abgasen freigesetzt werden, werden meist in ppm,  $\text{g}/\text{m}^3$  oder  $\text{mg}/\text{m}^3$  angegeben. Auch die zulässigen Grenzwerte werden in diesen Maßeinheiten vorgegeben. Darüber hinaus können sowohl im technischen als auch im physikalischen Bereich sog. Energieemissionen festgestellt werden: Hierzu gehören z. B. Lärm, Erschütterungen oder die Wärmestrahlung. Für die elektromagnetische Strahlung im niederenergetischen Bereich gibt es den Begriff „Elektrosmog“, dem meist die Belastung der Umwelt durch Magnetfelder aus der Radio- und modernen Kommunikationstechnik zugeordnet wird.

Grundsätzlich gilt: Jede Emission bezieht sich auf eine bestimmte Quelle.

### **Wie wird ein Stoff zum „Schadstoff“?**

Stoffe, die durch ihre chemische oder physikalische Wirkung Mensch und Umwelt potenziell schädigen können, sind technisch oft unverzichtbar. Zum „Schadstoff“ werden sie erst, wenn sie unkontrolliert freigesetzt werden und im ökologischen Gleichgewicht unserer Erde Störungen verursachen oder die Gesundheit des Menschen beeinträchtigen. So sind Salpetersäure im Reaktor einer chemischen Fabrik oder Ammoniak im Kesselspeisewasser eines Dampferzeugers zweifelsohne gefährliche Stoffe, doch keine Schadstoffe. Dazu würden sie erst, wenn sie z. B. wegen Undichtigkeiten der Anlage in die Atemluft gelangen würden. Dagegen ist Kohlendioxid an sich ein ungefährlicher Stoff, doch durch die Anreicherung in der Atmosphäre fördert es den Treibhauseffekt und wird deshalb heute als Schadstoff eingestuft.

### **Fest, flüssig und gasförmig reicht zur Klassifizierung nicht!**

Auf den ersten Blick scheint der Aggregatzustand für die gesetzliche Einordnung von Abfällen und Emissionen eine Rolle zu spielen. Der Gesetzgeber berücksichtigt nicht nur die Konsistenz der Abfallstoffe und Emissionen. Zwar definiert man „Abfall“ als „feste Stoffe“, rechnet aber auch „Flüssigkeiten in Behältern“ dazu. Befindet sich jedoch der Feststoff „Staub“ in Abluft oder Abgas, gehört er wie gasförmige Stoffe zu den Emissionen der Gesetzgebung für „Luft“ (in Deutschland „Technische Anleitung Luft“). Wird der Staub aus dem Rauchgas ausgefiltert, gehört er als Feststoff wieder zur Abfallgesetzgebung. Sind an sich feste Bestandteile des Staubs durch die Rauchgaswäsche in Wasser gelöst, greift die Abwassergesetzgebung. Das mit Wärme belastete Kühlwasser wird teils wie Abwasser behandelt, teils gibt es extra gesetzliche Regelungen.

## Abfälle und Emissionen bei der Energiegewinnung

Wir beschränken uns hier auf die beim Energieumwandlungsprozess in Kraftwerken anfallenden Emissionen und Abfälle, die unmittelbar als Verbrennungsprodukte anfallen. Für eine Gesamtöko- und Energiebilanz müsste jeweils auch z. B. der Steinkohlebergbau, die Erdöl- bzw. Gasgewinnung oder der Uranbergbau und die Aufbereitung mit betrachtet werden.

### Feststoffabfälle bei der Energiegewinnung

#### Asche

Bei der Verfeuerung von Holz, Braunkohle, Steinkohle, Koks, Bitumen und Schweröl verbrennen nur die organischen Bestandteile dieser Brennstoffe. Die Rückstände in Form von Asche bestehen also im Wesentlichen aus den anorganischen Teilen des jeweils verfeuerten Brennstoffs, den sog. Mineralstoffen. Es sind dies vor allem Oxide und Karbonate verschiedener Metalle wie Aluminium, Calcium, Eisen, Magnesium, Mangan, Phosphor, Kalium, Silizium oder Natrium (z. B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  usw.), die teilweise zu Dünger weiterverarbeitet werden können. Asche aus Biomassekraftwerken kann z. B. in der Land- und Forstwirtschaft unaufbereitet als Kali- und Phosphatdünger eingesetzt werden.

Liegen die Verbrennungstemperaturen zwischen ca. 900 °C und 1200 °C (Ascheerweichungspunkt), wird die Asche zähflüssig, weich oder teigig. Bei Abkühlung dieser zähflüssigen Asche entsteht eine poröse, aber feste Masse, die teilweise als „verglaste“ Schlacke weiterverarbeitet wird.

#### Schlacke

Die Schlacke ist der verglaste Anteil der mineralischen Verbrennungsrückstände. Sie ist an sich kein Schadstoff, kann aber Schadstoffe enthalten, z. B. Schwermetalle. Besitzt die Schlacke z. B. durch komplette „Verglasung“ eine wasserunlösliche Zusammensetzung, sind eventuelle Schadstoffe fest gebunden. Früher wurde die Schlacke direkt für den Straßenbau verwendet oder deponiert. Heute gibt es in vielen Ländern gesetzliche Bestimmungen, die die Aufbereitung und Weiterverwendung der Schlacke regeln. Wird die Schlacke beispielsweise unter definierten Bedingungen als Rohstoff für die Zementherstellung verwendet, entsteht ein umweltneutrales Endprodukt.

#### Radioaktive Stoffe

Die Behandlung radioaktiver Abfälle wird in speziellen Gesetzen gesondert und detailliert vorgeschrieben. Danach hat der Erzeuger von radioaktiven Reststoffen dafür zu sorgen, dass diese schadlos verwertet oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden. Radioaktive Abfälle werden international in die drei Kategorien schwach-, mittel- und hochradioaktiv mit jeweils niedriger oder hoher Wärmeentwicklung unterteilt.

Ungefähr 90 % der radioaktiven Abfälle entfallen auf schwach- und mittelradioaktive Stoffe wie Hilfs- und Betriebsmittel (z. B. Filter) sowie Hüllrohr- und Strukturmaterialien (z. B.  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ). Hochradioaktive Spaltprodukte und verbrauchte Brennelemente mit hoher Wärmeentwicklung machen ca. 10 % der radioaktiven Abfälle aus.

Typische Brennstäbe, wie sie in Kernkraftwerken als „Brennstoff“ verwendet werden, enthalten ca. 96 % Anteil  $^{238}\text{U}$  und ca. 4 % angereichertes spaltbares  $^{235}\text{U}$ . Durch Kernspaltung wird  $^{235}\text{U}$  verbraucht und in verschiedene Spaltprodukte umgewandelt. Ein kleiner Teil des  $^{238}\text{U}$  wandelt sich durch Neutronenaufnahme in  $^{239}\text{Pu}$  um, das wie  $^{235}\text{U}$  spaltbar ist und ebenfalls Energie liefert. Nach etwa drei bis fünf Jahren, wenn der Anteil des spaltbaren  $^{235}\text{U}$  bis auf ca. 1 % „abgebrannt“ ist, müssen die Brennstäbe durch neue ersetzt werden.

Verbrauchte Brennstäbe enthalten noch etwa 94 %  $^{238}\text{U}$ , unter 1 % noch spaltbares  $^{235}\text{U}$  sowie weniger als 1 % spaltbares  $^{239}\text{Pu}$ . Die restlichen etwa 4 % sind eine Mischung aus hoch

radioaktiven Spaltprodukten – die häufigsten sind Isotope von Jod, Cäsium, Strontium, Xenon und Barium – sowie Transuranen wie Neptunium, Americium und Californium, die durch Einfang von Neutronen in Atomkernen von Uran und Plutonium ohne Kernspaltung entstanden sind. Die Brennstäbe werden zunächst für einige Jahre im Abklingbecken des Kernkraftwerks zum Abbau der schnell zerfallenden Isotope gelagert. Die Halbwertszeiten einiger der enthaltenen radioaktiven Stoffe liegen im Bereich von Sekunden, Minuten, Tagen oder wenigen Jahren. Andere Halbwertszeiten liegen im Bereich von vielen Tausenden von Jahren, was auf jeden Fall eine auf extrem lange Zeit sichere Endlagerung nötig macht. Deshalb werden die Brennelemente in speziellen „Castor“-Sicherheitsbehältern (**c**ask for **s**torage and **t**ransportation of radioactive material) in ein Zwischenlager oder in eine Wiederaufbereitungsanlage befördert. Dort werden die hochradioaktiven Spaltprodukte aus dem verbrauchten Kernbrennstoff chemisch herausgelöst, mit chemisch hoch beständigem Glas verschmolzen, in Edelstahlbehälter vergossen und in Castorbehältern für die spätere Endlagerung zurücktransportiert. Aus einem 1.000-MW-Kernkraftwerk fallen so pro Jahr 3,5 bis 4 m<sup>3</sup> verfestigter, hochradioaktiver Abfall für die Endlagerung an. Das bei der Wiederaufbereitung zurückgewonnene Uran wird nach Wiederanreicherung auf etwa 4 % <sup>235</sup>Uran zur Herstellung neuer Brennelemente verwendet und somit dem Kernbrennstoffkreislauf wieder zugeführt. Das separierte Plutonium wird zusammen mit Natururan zu Uran-Plutonium-Mischoxid-Brennstoff (MOX-Brennstoff) weiterverarbeitet. Doch die Wiederaufbereitung von verbrauchten Brennstäben ist durch die abgetrennten gefährlichen, radioaktiven „Abfallstoffe“ äußerst aufwändig und risoreich, und ist auch sehr teuer. In den USA und Deutschland (seit 2005) wird deshalb keine Wiederaufbereitung mehr durchgeführt.

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung existieren bislang in vielen Ländern – z. B. in Frankreich, Großbritannien, Spanien, Tschechien und in den USA – oberflächennahe Lager (in bis zu 100 m Tiefe).

Nach heutigen Sicherheitsmaßstäben gelten sie jedoch nicht als sichere Endlager. In Deutschland gab bzw. gibt es derzeit drei sog. „Endlager“ für schwach- und mittelradioaktive Abfälle: Morsleben, die Asse und Schacht Konrad. Im ehemaligen Salzbergwerk Morsleben kam es bereits in den 1980er Jahren zu Wassereinbrüchen und Einstürzen, sodass dieses Lager seit 1998 mit einem Aufwand von mehreren Milliarden Euro saniert wird. Dasselbe ist der Fall im ehemaligen Salzbergwerk Asse. Hier wurden 126.000 Fässer mit radioaktivem Müll gelagert. Inzwischen rosten die Fässer durch und das in das Bergwerk eingebrochene Wasser bildet eine radioaktive Sole. Diese droht in oberflächennahe Erd- und Grundwasserschichten einzudringen. Die Asse muss deshalb mit Milliardenaufwand saniert werden, der von 2008 ursprünglich geschätzten 2 Mrd. Euro bis 2016 auf über 10 Mrd. Euro angestiegen ist. 2002 wurde das ehemalige Erzbergwerk Konrad bei Salzgitter als Endlagerstätte in 800 bis 1300 m Tiefe genehmigt und die Genehmigung 2006 letztinstanzlich bestätigt. Das Endlager wird jetzt entsprechend der Genehmigung umgerüstet und sollte ab 2013 für die Einlagerung radioaktiver Abfälle bereit stehen. Nach Angaben des Bundesamts für Strahlungsschutz ist die offizielle Eröffnung wegen notwendiger Sanierungsarbeiten inzwischen auf ca. 2022 verschoben worden.

Für hochradioaktive Abfälle gibt es bisher in keinem der 31 Kernenergie nutzenden Staaten ein fertiges Endlager, obwohl entsprechende Planungen seit Jahrzehnten laufen; in den USA ist ein Endlager im Genehmigungsverfahren, in Finnland wurde der Standort festgelegt. In Deutschland wurde ab 1977 die Endlagerung hochradioaktiver Stoffe in Gorleben geplant und in Angriff genommen. Doch dieses ehemalige Salzbergwerk erscheint aus ähnlichen Gründen wie die Asse wenig geeignet und inzwischen wird ein neuer Standort für ein Endlager gesucht. Man geht davon aus, dass bis 2030, spätestens jedoch bis 2050, ein Standort gefunden sein wird.

Was ist nun das besondere Problem der radioaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken? Verglichen mit der Radioaktivität des ursprünglich in den Brennstäben eingesetzten Natururans enthalten die ver-

brauchten Brennstäbe sowohl mengenmäßig als auch bezüglich der Anzahl an Isotopen ein Vieltausendfaches an Radioaktivität. Die Befürworter der Kernkraft verweisen darauf, dass nach dem Stand der Technik eine auf Langzeit sichere Endlagerung möglich ist. Das Problem sind jedoch die hohen Kosten, die allein für den deutschen Atommüll bis zum Jahr 2100 auf über 100 Mrd. Euro geschätzt werden.

### Emissionen bei der Energiegewinnung

#### Schwefeloxide $\text{SO}_x$

Fast alle Lebewesen enthalten schwefelhaltige Aminosäuren. Ihre Umwandlungsprodukte Braunkohle, Steinkohle, Koks, Erdöl und Erdgas enthalten deshalb von Natur aus größere Mengen von Schwefelverbindungen. Wenn sie verbrannt werden, entstehen vor allem Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Schwefeltrioxid ( $\text{SO}_3$ ). Diese lösen sich als Säure in Wasser („saurer Regen“) und führten in den 1970er und 80er Jahren u. a. in Mitteleuropa zum flächenmäßigen Absterben von Wäldern in den Mittelgebirgen. Auch das menschliche Bronchialsystem wird durch Schwefeldioxid angegriffen. Durch verschärfte gesetzliche Verordnungen und neue Technologien werden heute Erdgas bis auf  $10 \text{ mg/m}^3$  und Heizöl, Diesel und Benzin bis auf  $10 \text{ mg/l}$  oder weniger entschwefelt. Bei Kraftwerken mit Verbrennung von Kohle oder schlechteren Heizölsorten wird heute mit hocheffizienter Rauchgasentschwefelung gearbeitet. Die Schwefeloxide werden dabei mit Kalk neutralisiert. Daraus entsteht Gips (Calciumsulfat  $\text{CaSO}_4$ ), der in der Bauwirtschaft weiterverwertet wird. Eine moderne Kraftwerkstechnologie ist die Kohlevergasung, ein Prozess, bei dem potenzielle Schadstoffe wie Schwefel und Schwermetalle bereits vor der Verbrennung entfernt werden.

#### Stickoxide $\text{NO}_x$

Die Masse der Stickoxide in den Rauchgasen bzw. Abgasen stammt größtenteils aus der Verbrennung mit Luft (Stickstoff-Sauerstoff-Gemisch). Würde man mit reinem Sauerstoff verbrennen, entstünden sie nicht, doch das wäre in der Regel zu teuer. Teilweise gibt es auch im Brennstoff enthaltenen Stickstoff, der in der Verbrennung zu Stickoxid reagieren kann. Die Reaktion ist stark temperaturabhängig und steht dem Streben nach höheren Wirkungsgraden entgegen. Stickoxide reagieren mit Wasser ebenfalls sauer. Ein großer wirtschaftlicher und ökologischer Schaden besteht in einer Überdüngung der Wälder durch stickoxidhaltigen Regen, was bei vielen Bäumen zu Wachstumsstörungen führt. Im Zusammenwirken mit Ozon aus der UV-Lichteinwirkung der Sonne und Kohlenwasserstoffen bilden Stickoxide darüber hinaus eine Vielzahl von Smogstoffen, was Lunge und Kreislauf des Menschen stark belastet. Deshalb sind inzwischen in Deutschland, der EU und den USA die gesetzlichen Grenzwerte für Stickoxide abgesenkt worden. Optimierte Prozessführung und Katalysatoren zur Umwandlung der Stickoxide in Stickstoff sorgen inzwischen in Kraftwerken für Abgasgehalte unter  $40 \text{ mg/m}^3$ .

Bei Autoabgasen, speziell bei Diesel-Pkws, ist der  $\text{NO}_x$ -Ausstoß ein großes Problem und kann derzeit durch Katalysatoren und normalen Fahrbedingungen nur unvollständig entfernt werden. Die fast vollständige katalytische Reinigung der Autoabgase von  $\text{NO}_x$  ist zwar möglich, doch extrem aufwändig und teuer. Neueste Erkenntnisse zeigen, dass große Anteile (bis zu 50 %) von  $\text{N}_x\text{O}_y$  auch aus der Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft stammen. (Ein erheblicher Anteil des gedüngten Stickstoffs zersetzt sich zu  $\text{N}_2\text{O}$  und geht als dieses hochwirksame Treibhausgas – 310mal wirksamer als  $\text{CO}_2$  – in die Luft).

#### Stäube

Unverbrannter Kohlenstoff (Ruß) ist zwar noch ein Problem bei Dieselmotoren, kann aber bei optimaler Prozessführung in modernen Verbrennungskraftwerken vernachlässigt werden. Metalloxide und Salze (vor allem Chloride) sind im Abgas von Verbrennungsanlagen stets in gewissem Umfang

als Feinstaub enthalten. Nachdem sich herausgestellt hat, dass Feinstäube ähnlich gesundheitsschädlich sind wie Asbest, wurden auch hier in vielen Ländern die Grenzwerte abgesenkt. Moderne Kraftwerke kommen mit Zyklonen (Fliehkraftabscheider), elektrostatischer Abscheidung und Nasswäsche auf Abgaswerte von weit unter  $20 \text{ mg/m}^3$ . Bei Gaskraftwerken ist dieser Wert auch ohne zusätzliche Abscheidung noch deutlich kleiner.

### **Kohlenstoffoxide $\text{CO}_x$**

Da in allen Verbrennungskraftwerken letztlich Kohlenstoff verbrannt wird, entsteht stets auch Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Die konventionelle Energieerzeugung auf Basis fossiler Brennstoffe ist derzeit mit 42 % Hauptemittent von  $\text{CO}_2$  Treibhausgasen.

$\text{CO}_2$ -Emissionen in g je erzeugter kWh: Braunkohle  $\approx 950 \text{ g/kWh}$ ; Steinkohle  $\approx 750 \text{ g/kWh}$ ;

Erdöl  $\approx 720 \text{ g/kWh}$ ; Erdgas  $\approx 540 \text{ g/kWh}$ ; Erdgas GuD  $\approx 350 \text{ g/kWh}$ .

Da  $\text{CO}_2$  in diesen Konzentrationen weder für Pflanzen, Tiere noch den Menschen giftig oder belastend ist, wurde dessen Ausstoß zunächst nicht als Problem erkannt. Doch über 150 Jahre weltweite Industrialisierung haben den Energiebedarf der Wirtschaft und damit den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe sehr stark ansteigen lassen, sodass sich heute der Anstieg des  $\text{CO}_2$ -Gehalts in der Atmosphäre als Treibhausgas mit einer Erhöhung der Temperatur auf der Erde bemerkbar macht. Zusätzliche Belastungen gibt es durch das Bevölkerungswachstum, was einen erhöhten  $\text{CO}_2$ -Ausstoß allein durch Kochen und Heizen bedeutet. Auch die zunehmende Rodung von Urwäldern zur Brennholzgewinnung (in Europa) bzw. zum Futtermittel- oder Energiepflanzenanbau in Asien und Südamerika hat den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß extrem gesteigert. Dazu kommen aus der Lebensmittelproduktion (u. a. Reisanbau und Rinderhaltung) zunehmende Mengen des Treibhausgases Methan ( $\text{CH}_4$ ). Es ist also nicht nur aus Gründen der Ressourcenschonung, sondern auch zur Abmilderung des Treibhauseffekts wichtig, weniger fossile Brennstoffe zu verfeuern. Dazu hilft einerseits die Steigerung der Effizienz der Verbrennungskraftwerke durch Einsatz moderner Technologie, andererseits die Nutzung regenerativer Energien mit dafür optimierten Techniken.

### **Wasser**

Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) wird bei der Verbrennung der Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Erdgas) stets zwangsläufig freigesetzt (z. B.  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ). Es kann in gewissem Umfang zwar das Kleinklima um ein Kraftwerk beeinflussen, man geht jedoch von keiner wirklichen Umweltbelastung aus. Vermehrte Wolkenbildung führt zwar evtl. zu lokalen Klimaschwankungen, doch letztlich wird das Wasser in der Atmosphäre auch wieder sehr schnell abgerechnet bzw. abgeschneit. So kommt es zu keiner langanhaltenden Anreicherung. Dies sieht man auch an den zunehmenden Fällen von Starkregen und Überschwemmungen weltweit. Zwar führt die Erderwärmung zu vermehrter Verdunstung von (Meer-)Wasser und Wolkenbildung. Dies führt aber auch zu vermehrten Niederschlägen in manchen Regionen der Erde, während anderorts die Wüsten wachsen.

### **Radioaktive Emissionen**

Bei einem Siedewasserreaktor strömen die im Reaktorwasser gelösten Gase und leicht flüchtigen Substanzen mit dem Dampf über die Turbine in die Kondensatoren. Von dort führt man sie einer Abgasaufbereitungsanlage zu. Dort werden die Gase über eine Verzögerungsleitung, eine Aktivkohle-Verzögerungsanlage und einen Absolutfilter geleitet, ehe sie zusammen mit der Gebäudeluft über den Kamin abgegeben werden. Der überwiegende Teil der Radioaktivität zerfällt innerhalb der Verzögerungsstrecken, z. B.  $^{133}\text{Xenon}$  (Halbwertszeit 5,3 Tage) bei einer Verzögerungszeit von 40 bis 60 Tagen auf 0,1 % der ursprünglichen Aktivität. Bei Druck- und Siedewasserreaktoren können auch radioaktive Gase durch Bestrahlung der Luft im Ringraum um den Reaktordruckbehälter sowie durch Undichtigkeiten der Rohrleitungssysteme in die Raumluft des Reaktorgebäudes

gelangen. Auch die Raumluft wird über die Abgasaufbereitungsanlage kontrolliert nach außen abgegeben. Abwässer von Kernkraftwerken werden in großen Behältern gesammelt, die Aktivität einzelner Nuklide bestimmt und bei Einhaltung der Grenzwerte kontrolliert abgegeben. Die tatsächlichen Emissionen der deutschen Kernkraftwerke liegen durchweg weit unterhalb der behördlich festgelegten Werte. Ein dichtes Netz von Messstationen überwacht die Umgebung eines jeden Kernkraftwerks. Es gibt jedoch auch kritische Stimmen, die ein in der Umgebung von AKWs beobachtetes erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern auf Kraftwerksemissionen zurückführen (siehe das Stichwort „Strahlung“).

### **Strahlung**

Außerhalb eines Kernkraftwerks ist direkte Strahlung (Alpha-, Beta- bzw. Gammastrahlung) aufgrund der geringen Reichweite bzw. der starken Abschirmung praktisch nicht messbar. Anders ist es bei den Transporten verbrauchter Brennelemente in Castorbehältern, für die deshalb besondere Schutzvorkehrungen getroffen werden. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die wahre Gefahr nicht die auf Entfernung gemessene Strahlung ist. Denn von einem alphastrahlenden Staubteilchen merkt in einigen Zentimetern Entfernung weder ein Geigerzähler noch der menschliche Körper etwas. Kommt das Staubteilchen jedoch in die Lunge oder gelöst in Trinkwasser in den Körper, sind 2 cm Reichweite viel. Dann kann diese Strahlung über Jahre hinweg durchaus Krebs auslösen.

### **Wärme**

Eine möglichst gute Nutzung der im Verbrennungsprozess entstandenen Wärme ist wichtig für die Effizienz von Kraftwerken. In vielen Kraftwerkstypen wird Dampf als Wärmeträger eingesetzt. Nur klassische Dampfmaschinen (z. B. Dampflokomotiven) lassen den ungenutzten Abdampf einfach in die Umwelt ab. Wird der Abdampf dagegen kondensiert und damit erneut der Kessel gespeist, hat das Vorteile. Bei Dampfturbinen erzeugt die Kondensation an der Austrittsseite Unterdruck, was zusätzlich den Wirkungsgrad erhöht. Um Verkalkung und Korrosion zu verhindern, muss das Kesselspeisewasser relativ rein sein und ganz bestimmte Zusätze enthalten. Es wäre also äußerst unwirtschaftlich, den Dampf nicht zu kondensieren und nicht im geschlossenen Kreislauf zu führen. (Bei Kernreaktoren muss schon allein aus Sicherheitsgründen der Primärwasserkreislauf ganz abgeschlossen sein.) Die thermischen Kraftwerke arbeiten in der Regel mit Kühltürmen und einem sekundären Kühlwasserkreislauf, meist aus Flusswasser. Das führt zur Verdampfung erheblicher Wassermengen des Flusses und zu seiner Aufheizung. Reine Luftkühlung der Kraftwerke wird heute in Gegenden durchgeführt, in denen keine Kühlmöglichkeit durch Wasser vorhanden ist. Sie ist allerdings wesentlich teurer als Wasserkühlung und wird deshalb kaum eingesetzt. Da in herkömmlichen thermischen Kraftwerken bis zu 65 % der Primärenergie als Abwärme verloren gehen, stellen thermische Großkraftwerke so gesehen eine erhebliche Umweltbelastung dar. Das Kernkraftwerk Isar 2 benötigt z. B. 42.000 l/s Kühlwasser; das inzwischen abgeschaltete Kernkraftwerk Biblis B entnahm 210.000 m<sup>3</sup>/h aus dem Main.

Der Einsatz moderner Technologien wie z. B. kombinierter Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD-Kraftwerke) mit integrierter Nutzung der Abwärme als Fernwärme ist deshalb nicht nur wirtschaftlich, sondern auch ökologisch sehr wichtig.

### **Lärm**

Bei Großkraftwerken gibt es aufgrund der massiven Konstruktion und des Abstands zu Wohngebieten in der Regel keine Probleme mit Lärmemissionen. Bei Kleinkraftwerken und Blockheizkraftwerken hängen die Lärmemissionen sehr von der baulichen Ausführung ab, so auch bei Biogasan-

lagen, die das Gas direkt mit Großdieseln verstromen. Bei Windkraftanlagen hängt es von der Entfernung zu Wohngebieten ab, ob die Lärmemission zur Belastung wird.

### **Gerüche**

Schlecht gefilterte Braunkohlekraftwerke verbreiteten bis in die 1990er Jahre in Mitteleuropa (z. B. damalige DDR, Tschechoslowakei und Polen) je nach Wetterlage bis zu 100 km weit reichende Geruchswolken („Katzendreckgestank“). Heute sind in der EU relativ strenge Abgasreinigungsaufgaben wirksam, sodass in der Regel bei Großanlagen keine Geruchsbelästigung auftritt. Wo nicht der modernste Stand der Technik angewendet wird, stehen derzeit auch kleinere Biogasanlagen oder kleinere Holzschneitzanlagen in schlechtem Ruf.