

Welche Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden und Staub entstehen bei der Stromerzeugung?

von [Peter Borsch](mailto:Peter.Borsch@energie-fakten.de) (email: Peter.Borsch@energie-fakten.de)

Hier die Fakten (vereinfachte Kurzfassung)

Bei der Verbrennung von Kohlen und Erdölprodukten sowie Erdgas entstehen – neben dem klimawirksamen Kohlendioxid (CO₂) – als wichtigste Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Staub. Deren Menge bzw. Anteile am Rauchgas hängt ab von der Zusammensetzung des Brennstoffs, der Verbrennungstechnik und dem Aufwand bei der Rauchgasreinigung.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden in den 70er und 80er Jahren strenge Vorschriften eingeführt, die eine Anpassung der Feuerungsanlagen und vielfach auch Rauchgasreinigung verlangten. Dadurch wurden gegenüber 1982 bei den westdeutschen Kraftwerken der öffentlichen Stromversorgung bis 2000 die Emissionen von SO₂ um 94 %, von NO_x

um 83 % und von Staub um etwa 91 % reduziert. In der DDR war die Schadstoffbelastung der Luft durch Kraftwerke wesentlich größer gewesen als früher in der alten Bundesrepublik. Nach der Wiedervereinigung wurden in den neuen Bundesländern die westdeutschen Standards übernommen und inzwischen auch erreicht.

Für die beiden Schadgase SO₂ und NO_x sind im Bereich der öffentlichen Stromerzeugung die Probleme gelöst. Feinstäube können auch in geringen Mengen gesundheitsschädigend wirken.

Hier die Fakten (fachspezifische Langfassung):

Die drei genannten Schadstoffe entstehen bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, also von Kohle, Erdöl, Erdgas und daraus hergestellten Brennstoffen (wie Heizöl, Briketts usw.). Bei der Stromerzeugung aus Kernenergie und regenerativen Energien (außer Biomasse und z.T. Erdwärme) werden diese Schadstoffe nicht freigesetzt.

Eine einfache Antwort im Hinblick auf die freigesetzten Mengen gibt es nicht, denn die Emissionen dieser Schadstoffe hängen ab von

- der Zusammensetzung des Brennstoffs,
- der Verbrennungstechnik und
- der Rauchgasreinigung.

Brennstoffe

Kohle und Erdöl enthalten bis zu 4 % Schwefel, der bei der Verbrennung zu Schwefeldioxid (SO₂) umgesetzt wird. Bei der Steinkohle wird hoher Schwefelgehalt in der Regel durch Nassverfahren (Flotation) auf etwa 1 % reduziert, beim Erdöl in der Raffinerie, am weitesten bei leichtem Heizöl und Dieselkraftstoff, am wenigsten bei schwerem Heizöl. Naturgas enthält gewöhnlich Schwefelwasserstoff, der wegen der Korrosionsgefahr bereits vor der Einspeisung ins Netz weitestgehend entfernt wird. Wegen ihrer Herkunft aus Biomasse enthalten Kohle und Erdöl auch geringe Stickstoffanteile.

Verbrennungstechnik

Stickoxide entstehen bei der Verbrennung zunächst aus dem organischen Stickstoff, bei Temperaturen über 1200°C auch durch

die Verbindung von Sauerstoff und Stickstoff aus der Verbrennungsluft. Durch geeignete Verbrennungsführung (Stufenbrenner) kann die Temperatur bei Braunkohle-, Öl- und Gasfeuerung in Grenzen gehalten werden. Wegen des hohen Heizwertes von Steinkohle treten bei deren Verbrennung höhere Temperaturen auf, so dass eine Entstickung der „Rauchgase“ erforderlich wird, wenn die in Deutschland geltenden Grenzwerte für Großfeuerungsanlagen eingehalten werden sollen.

Die Entstehung von Schwefeldioxid wird weitestgehend vermieden bei der Wirbelschichtfeuerung, denn dort wird dem Brennstoff (feinkörnige Kohle) Kalksteinmehl zugemischt, das den Schwefel in Form von Calciumsulfat (Gips) bindet. Da bei der Wirbelschichtfeuerung Temperaturen von 1200°C nicht erreicht werden, ist auch die Stickoxidbildung gering. Allerdings gibt es Wirbelschichtfeuerung bisher nur für kleinere Anlagen (bis etwa 300 Megawatt). In größerem Umfang hat sich die Wirbelschichtfeuerung bisher nicht durchsetzen können.

Rauchgasreinigung

Um die strengen Anforderungen der deutschen Umweltschutzvorschriften (Bundes-Immissionsschutzgesetz mit Großfeuerungsanlagen-Verordnung und Technische Anleitung - TA-Luft) zu erfüllen, müssen bei Kohle- und Ölkraftwerken die Rauchgase gereinigt werden.

Staub entsteht bei jeder Verbrennung von festen Stoffen; bei der Kohlenstaubfeuerung ist die gesamte Asche staub-

förmig. Um die Staubbelastung der Umgebung zu verringern, wurden schon frühzeitig einfache Staubabscheider eingesetzt. Die jetzt geltenden Grenzwerte erfordern aufwendige Gewebe- oder Elektrofilter.

Schwefeldioxid wird in der Regel durch Einsprühen von Kalkmilch in die Rauchgase gebunden, es entsteht Gips (Calciumsulfat). Stickoxide werden durch Einsprühen von Ammoniak aus dem Rauchgas entfernt. Damit dieser Prozess bei mäßigen Temperaturen (bis etwa 350°C) abläuft, sind Katalysatoren erforderlich.

Der Anteil der Rauchgasreinigung an den Investitionskosten von deutschen Kohlekraftwerken liegt um 30 %. Überdies wird für den Betrieb der Rauchgasreinigung Energie benötigt, der Wirkungsgrad der Kraftwerke wird dadurch um 2 - 3 Prozentpunkte verringert.

Beispiele für Emissionswerte

In Bild 1 sind die Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und Schwefeldioxid (SO₂), im Bild 2 die Emissionen von Staub aus sämtlichen Kraft- und Fernheizwerken dargestellt, von 1975 bis 1990 für die alten Bundesländer, von 1990 bis 1998 für das vereinigte Deutschland. Die Bilder 1 und 2 zeigen, dass in den alten Bundesländern bis 1990 gegenüber den Maximalwerten 1975 bzw. 1980 die NO_x-Emissionen um 52 %, die SO₂-Emissionen um 83 % und die Staubemissionen um 89 % reduziert worden sind.

Die Emissionsdaten der Kraftwerke der öffentlichen Stromerzeugung¹ werden von der „Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke“ (VDEW) für Westdeutschland seit 1982 und für Ostdeutschland seit 1990 ermittelt. In diesem Teilbereich sind die Reduktionen noch drastischer. Im Vergleich zu den Bezugsjahren (1982 bzw. 1990) wurden in den alten Bundesländern bis zum Jahr 2000 die SO₂-Emissionen um 94 %, die NO_x-Emissionen um 83 % und die Staubemissionen um 91 % reduziert; in den neuen Bundesländern betragen die Reduktionen bei SO₂ 97 %, bei NO_x 72 % und bei Staub 99 %. Nach VDEW-Angaben waren allein für die Entschwefelung in den westlichen Bundesländern in den achtziger Jahren etwa 15 Milliarden DM investiert worden, in den östlichen Bundesländern sind es in den neunziger Jahren mehr als 3,5 Milliarden DM gewesen.

Die Stromerzeugung in den alten Bundesländern ist zwar von 1975 – 1990 deutlich gewachsen: von etwa 320 auf 450 Milliarden Kilowattstunden (kWh) pro Jahr. Der Beitrag von Kohle- und Ölkraftwerken (etwa 230 Milliarden kWh pro Jahr) hat sich dabei nicht wesentlich geändert. Nach 1990 hat in Deutschland die Stromerzeugung (in den neuen Bundesländern) zunächst abgenommen; seit 1994 steigt sie wieder leicht an. Die Stromerzeugung von Kohle- und Ölkraftwerken war 1998 mit etwa 300 Milliarden kWh etwa 7 % geringer als 1991.

¹ Zum Sektor „Kraft- und Fernheizwerke“ gehören neben der öffentlichen Stromerzeugung auch Kraftwerke in Industrieanlagen sowie Fernheizwerke. Diese sind meist kleiner als die der öffentlichen Stromerzeugung und müssen deshalb weniger strenge Anforderungen an die Rauchgasreinigung einhalten.

Die Kurven zeigen: Bis etwa 1980 gab es bei SO₂ und NO_x einen leichten Anstieg, der etwa dem Anstieg der Stromerzeugung in den entsprechenden Kraftwerken entspricht. Die Großfeuerungsanlagen-Verordnung von 1983 verlangte von allen

Betreibern ab 1988 die Einhaltung strenger Grenzwerte. Das wurde durch den Einbau von Rauchgasreinigungsanlagen erreicht. Beim Staub gab es auch vor 1975 eine abnehmende Tendenz, sie wurde etwa ab 1985 durch die Verordnung verstärkt.

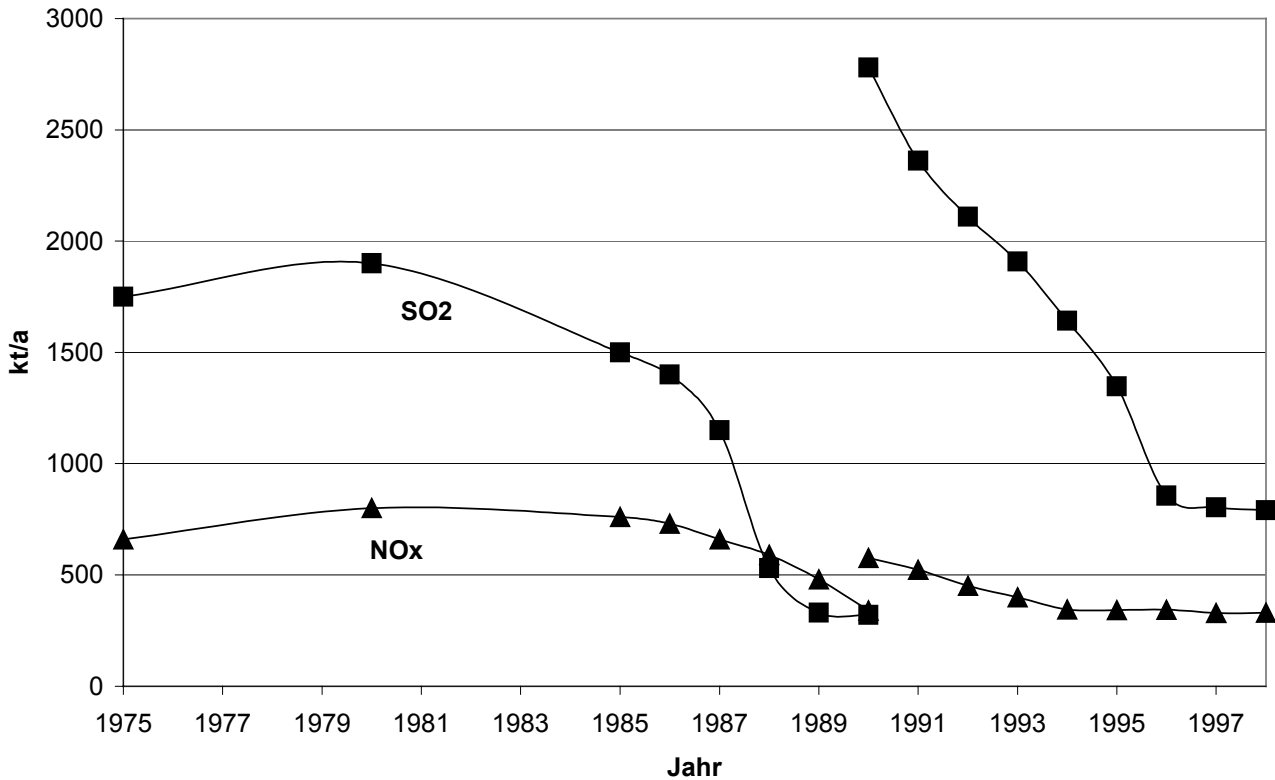


Bild 1: Emission von Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxiden (NO_x) 1975 – 1998 aus Kraft- und Fernheizwerken in der Bundesrepublik Deutschland (1975-1990 alte Bundesländer, 1990-1998 Gesamtdeutschland)

Die Stromerzeugung in der DDR (etwa 1/3 der westdeutschen) beruhte ganz überwiegend auf der Verbrennung stark schwefelhaltiger Braunkohle, Rauchgasentschwefelung gab es nicht. Im Einigungsvertrag von 1990 wurde die Nachrüstung oder Stilllegung dieser Kraftwerke verlangt; dies ist inzwischen erreicht. Kohlenkraftwerke im grenznahen Ausland, z.B. Tschechien, verfügen heute zum Teil noch nicht über die erforderliche Rauchgasreinigung.

Emissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen

Bisher wurden nur Emissionen aus dem Betrieb der Anlagen betrachtet. Für einen vollständigeren Überblick ist zu berücksichtigen, dass Schadstoffemissionen auch bei der Errichtung der Anlagen, der Gewinnung und Verarbeitung der dafür notwendigen Materialien, der Gewinnung und dem Transport der Brennstoffe sowie bei der Beseitigung der Anlagen nach dem Ende ihres Betriebs entstehen. Bezieht man diese vor- und nachgelagerten Prozesse mit

in die Betrachtung ein, dann lohnt es sich, auch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Kernenergie zu betrachten. Dort werden die hier genannten Schadstoffe zwar nicht während des Betriebes emittiert, wohl aber bei den vor- und nachgelagerten Prozessen.

Wegen der relativ geringen Energiedichte der erneuerbaren Energien wird für die Anlagen – vor allem bei Photovoltaik, weniger bei Windkraft – relativ viel Material benötigt, dessen Herstellung und Verarbeitung mit Emissionen verbunden ist.

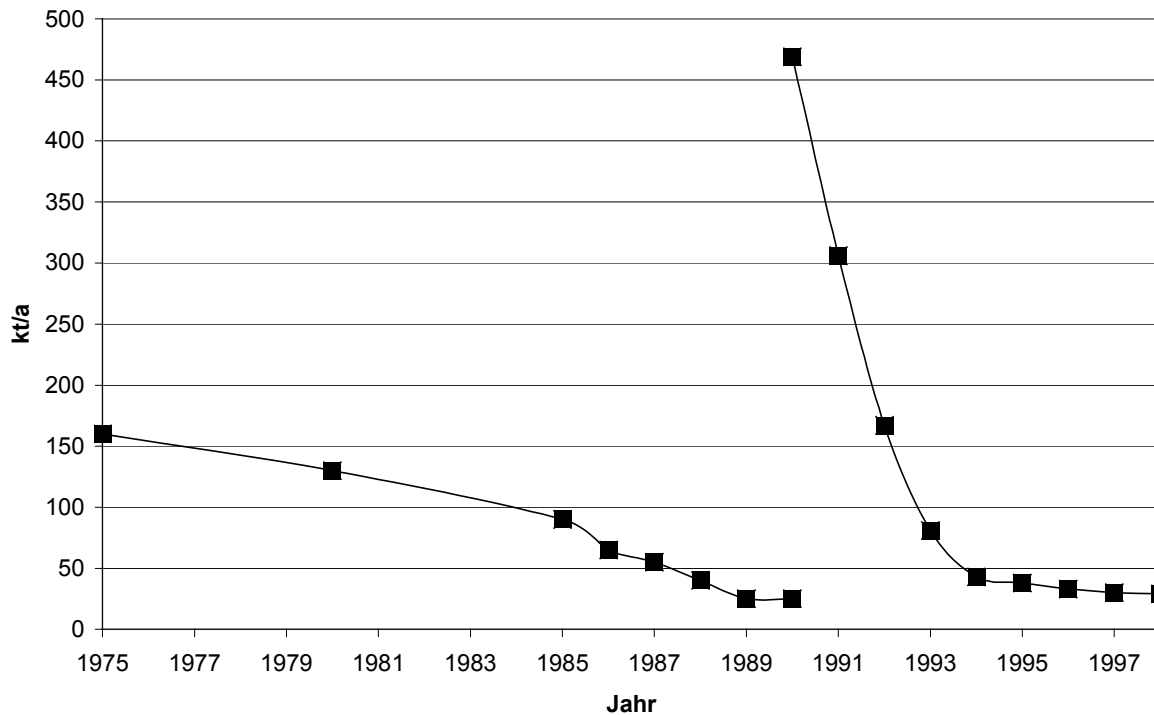


Bild 2: Emission von Staub 1975-1998 aus den Kraft- und Fernheizwerken in der Bundesrepublik Deutschland (1975-1990 alte Bundesländer, 1990-1998 Gesamtdeutschland)

Bild 3 und Tabelle 1 zeigen beispielhaft die Emissionen von SO₂ und NO_x für verschiedene Verfahren der Stromerzeugung, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen und mit den heutigen Produktionsstrukturen hergestellt werden. Mit anderen Produktionsstrukturen (z.B. anderen Techniken oder Energieträgern bei der Stromerzeugung) würde man andere Ergebnisse erhalten. (Bei Photovoltaik, Wasserkraft und Windkraft haben die Schwankungsbreiten folgende Gründe: verschiedene Zellentypen bei Photovoltaik, unterschiedliche Typen und Größen von

Wasserkraftwerken, verschiedene Größen und Bauweisen von Windkraftwerken. Für Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke gibt es dagegen Standardgrößen und –bauweisen.)

Das Bild 3 zeigt, dass bei Stromerzeugung mit Photovoltaik die Emissionen von SO₂ und NO_x mit denen von modernen Gaskraftwerken vergleichbar sind. Die höchsten Emissionen findet man bei Steinkohlekraftwerken, die geringsten bei Wasserkraft und Kernenergie, Windkraft liegt etwas darüber.

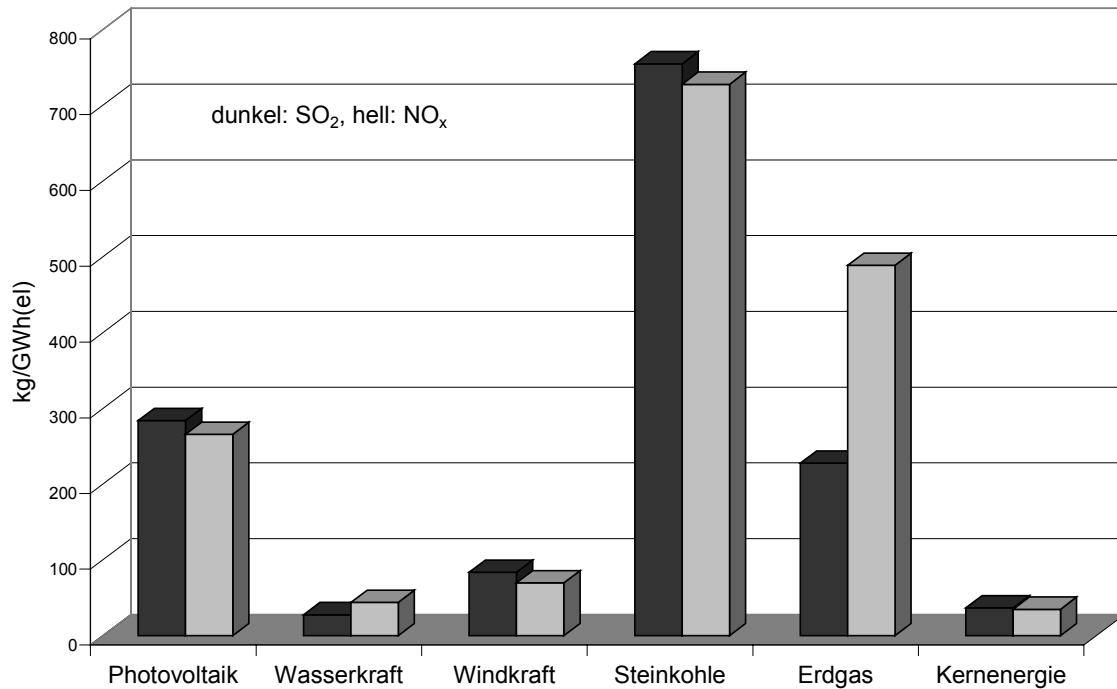


Bild 3: Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxiden (NO_x) bei verschiedenen Verfahren der Stromerzeugung unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges der Anlagen (Photovoltaik, Wasser- und Windkraft: Mittelwerte)

	SO ₂	NO _x
Photovoltaik¹	239-329	246-286
Wasserkraft	20-36	31-56
Windkraft²	64-104	47-92
Steinkohle	755	728
Erdgas	228	489
Kernenergie	37	35

¹ monokristallin, amorph

² mittlere Windgeschwindigkeit 4,5 m/s

Tabelle 1: Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und Schwefeldioxid (SO₂) für unterschiedliche Verfahren der Stromerzeugung in kg/GWh_{el} unter Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs

Diese Fakten sind – neben vielen anderen – auch zu beachten, wenn es um den Ver-

gleich verschiedener Alternativen zur Stromerzeugung unter dem Gesichtspunkt der Schadstoffemissionen bzw. der Nachhaltigkeit geht.

Auswirkungen der Emissionen

Schwefeldioxid und Stickoxide belasten die Atmungsorgane; die Stäube enthalten eine Vielzahl von giftigen und zum Teil potenziell krebserzeugenden Stoffen (wie z.B. Arsen, Blei, Cadmium, Quecksilber), und können insbesondere als Feinstäube bis in die Lunge gelangen. Aus Schwefeldioxid und Stickoxiden entstehen mit der Luftfeuchtigkeit Säuren, die ebenfalls prinzipiell gesundheitsschädlich sind, wenn sie eingeatmet werden; darüber hinaus beeinträchtigen sie das Pflanzenwachstum (und damit auch die Erträge von Feldfrüchten), versauern Gewässer und Böden (und tragen damit zu den Waldschäden bei) und greifen Bauwerke an (Rost an

Metallkonstruktionen, Schäden am Sandstein von Bauwerken²).

Diese Schäden verursachen Kosten, die nicht in die betriebswirtschaftlichen Kalkulationen der Stromerzeuger eingehen, es sind sogenannte externe Kosten, die von Dritten oder der Allgemeinheit zu tragen sind (siehe: *Externe Kosten*). Mit der Großfeuerungsanlagen-Verordnung von 1983 wurden die Stromerzeuger gezwungen, die Emissionen drastisch zu verringern, damit wurden auch die externen Kosten entsprechend verringert. Sie wurden insoweit internalisiert, aus externen Kosten wurden interne Kosten der Stromerzeuger, die an die Abnehmer weitergegeben werden.

Da die Emissionen nicht völlig verschwunden sind, bleibt ein Rest an externen Kosten. Deren Höhe ist nicht genau bestimmbar, sie wurde in verschiedenen Studien abgeschätzt. Eine neuere Studie, die auch die Emissionen berücksichtigt, die direkt oder mittelbar beim Bau und der Entsorgung der Anlagen und der Bereitstellung der Brennstoffe entstehen, kommt zu folgendem Ergebnis: Die externen Kosten pro erzeugter Kilowattstunde (kWh) betragen (ohne Berücksichtigung der Beiträge zum Treibhauseffekt!) etwa 1,8 – 3,7 Pf. für Kohlekraftwerke und 0,04 – 0,08 Pf. für Windenergieanlagen. Moderne Kombi-Gaskraftwerke, Kernenergie und Photovoltaik liegen dazwischen.

Wie ist es in anderen Ländern?

In den Industriestaaten ist es ähnlich wie in Deutschland, in den Entwicklungsländern und den GUS-Staaten (ehemalige Sowjetunion) eher wie in der früheren DDR. Rauchgasreinigung kostet Geld.

² Am Kölner Dom z.B. werden jährlich einige Millionen DM aufgewendet, um solche Schäden zu beseitigen.