

# Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung der $\text{SO}_2$ - und $\text{NO}_x$ -Emissionen in großen Städten am Beispiel der Stadt Stuttgart

R. Friedrich, B. Boysen, M. Mattis und A. Voß, Stuttgart

## Zusammenfassung

Kosten und Effektivität verschiedener Maßnahmen zur Reduzierung von  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen in großen Städten werden am Beispiel der Stadt Stuttgart untersucht. Dazu werden die derzeitigen und zukünftigen  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Stuttgart stadtteilweise berechnet. Anschließend werden Maßnahmen zur Minderung von  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen identifiziert und analysiert. Die Anwendung der Maßnahmen wird simuliert, dabei werden die entstehenden Kosten und Emissionsminderungen ermittelt. Aus den Ergebnissen werden Empfehlungen für eine möglichst effiziente Umweltpolitik abgeleitet.

## 1 Problemstellung

Infolge der seit einigen Jahren verstärkt geführten Diskussion über die schädlichen Wirkungen von Luftschadstoffemissionen gibt es inzwischen eine Fülle von Vorschlägen, Möglichkeiten und Techniken zur Minderung von Emissionen. Was aber noch weitgehend fehlt, ist eine systematische Einordnung und Bewertung dieser Techniken, die den Entscheidungsträgern Kosten und Effektivität, d. h. zu erwartende Minderungen der Emissionen, angibt und sie damit befähigt, die jeweils effizientesten Maßnahmen einzusetzen.

Da die einsetzbaren Mittel zur Erreichung umweltpolitischer Ziele begrenzt sind, kommt es darauf an, die knap-

pen Mittel so einzusetzen, daß der größtmögliche Effekt erreicht wird. Wegen der komplexen Zusammenhänge und der Vielzahl von Einflußparametern im Energiesystem bedarf es zur Analyse dieser Frage quantitativer systemtechnischer Methoden.

Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen ist daher die Erarbeitung systemtechnischer Methoden zur Analyse und Bewertung von Emissionsminderungsstrategien für Ballungsgebiete sowie die exemplarische Anwendung dieser Methoden für die Stadt Stuttgart zur Identifizierung effizienter Maßnahmen zur Verminderung von  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen.

Dazu werden die derzeitigen und die zukünftig (bis zum Jahr 2000) zu erwartenden Emissionen in Stuttgart stadtteilweise bestimmt sowie Maßnahmen und Techniken zur Emissionsminderung charakterisiert. Anschließend wird die Durchführung verschiedener Maßnahmen simuliert. Anhand der spezifischen Minderungskosten (SMK), definiert als Quotient aus den entstehenden Kosten und Emissionsminderungen, werden diese Maßnahmen bewertet. Die SMK einer Maßnahme geben an, wieviel DM bei Durchführung der Maßnahme pro nicht mehr emittiertem kg Schadstoff eingesetzt werden müssen.

Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen erhält man eine systematische Bewertung und eine Rangfolge von verschiedenen Maßnahmen zur Reduzierung der  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Zusammenhang mit der Energieumwandlung und dem Verkehr in Stuttgart. Zudem wird dargestellt, mit welchen Maßnahmenkombinationen und zu welchen Mehrkosten sich verschiedene Emissionsminderungsziele erreichen lassen.

## 2 Modelle zur Ermittlung der Emissionen in Stuttgart

Um die  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen berechnen und die Auswirkungen und Kosten von Maßnahmen simulieren zu können, werden EDV-gestützte Modelle eingesetzt, in denen die Struktur der Emittenten sowie deren Brennstoffeinsatz und deren spezifische Emissionen abgebildet sind.

Da sowohl die bereits eingeleiteten Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie z.B. die Großfeuerungsanlagenverordnung (GFAVo) oder die Novellierung der TA Luft als auch die darüber hinaus möglichen Maßnahmen erst mit zeitlicher Verzögerung auf dann geänderte Strukturen einwirken, ist die Darstellung der zukünftigen Entwicklung erforderlich. Es werden daher Szenarien der zukünftigen Entwicklung der für die Emissionen wichtigen Parameter bis 2000 in die Modelle eingegeben, die daraus jeweils die Entwicklung der Emissionen sowie die für die Luftreinhaltung zusätzlich entstehenden Kosten ermitteln.

Die verschiedenen Emittenten in Stuttgart werden in vier Gruppen eingeteilt und abgebildet:

- Öffentliche Kraftwerke
- Sonstige nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (in der Regel Anlagen > 1 MW Feuerungswärmeleistung, z. T. auch andere Leistungsgrenzen).
- Nicht genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen (z. B. Heizungsanlagen für Wohngebäude < 1 MW)
- Verkehr.

Im Bereich "öffentliche Kraftwerke" werden die Emissionen getrennt nach Kraftwerksblöcken berechnet. Die jährlichen Einsätze der einzelnen Kraftwerksblöcke werden in Abstimmung mit dem Kraftwerksbetreiber, den "Technischen Werken

der Stadt Stuttgart AG' (TWS AG) ermittelt. Dabei wird ein Zuwachs des Stromverbrauchs von 2,5 %/a bis zum Jahr 2000 angenommen.

Im Bereich 'Sonstige genehmigungsbedürftige Anlagen' liegen detaillierte Daten über Leistung, Feuerungsart und Brennstoffeinsatz kesselweise vor. Insgesamt sind 360 Kessel in 175 Anlagen erfaßt. Die Erfassung und Bearbeitung erfolgt aus Datenschutzgründen in anonymisierter Form. Die Daten entstammen eigenen Erhebungen sowie Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz und des Statistischen Landesamtes. Für alle größeren Anlagen ( $> 50 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) und die meisten kleineren Anlagen liegen Angaben über die in Zukunft geplanten Änderungen der Feuerungsanlagen (z. B. Brennstoffumstellung) und Maßnahmen zur Minderung der Emissionen aus eigenen Erhebungen und Angaben der TWS vor.

Für die 'nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen' wird von stadtteilweise vorhandenen Daten über Größe und Alter der Wohnungen und Wohngebäude, Wärmebedarf, Leistung der Feuerungsanlage und Brennstoffeinsatz ausgegangen. Diese Daten wurden aus dem 'Wärmeatlas' der TWS AG /2/ sowie aus Daten des Statistischen Amtes der Stadt Stuttgart berechnet. Sie werden ergänzt durch Angaben der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) über Emissionen bei Kleinverbrauchern. Die Fortschreibung beruht auf einer Reihe von Annahmen über Erneuerung der Anlagen, Brennstoffsubstitution, Modernisierung der Gebäude und Umstellung von Einzel- auf Sammelheizung /1/.

Zur Untersuchung der Emissionen im Verkehr stehen Daten über die Verkehrsbeziehungen der einzelnen Verkehrszellen in und um Stuttgart und über Verkehrsmengen auf den Durchgangsstraßen zur Verfügung /3/. Diese werden ergänzt

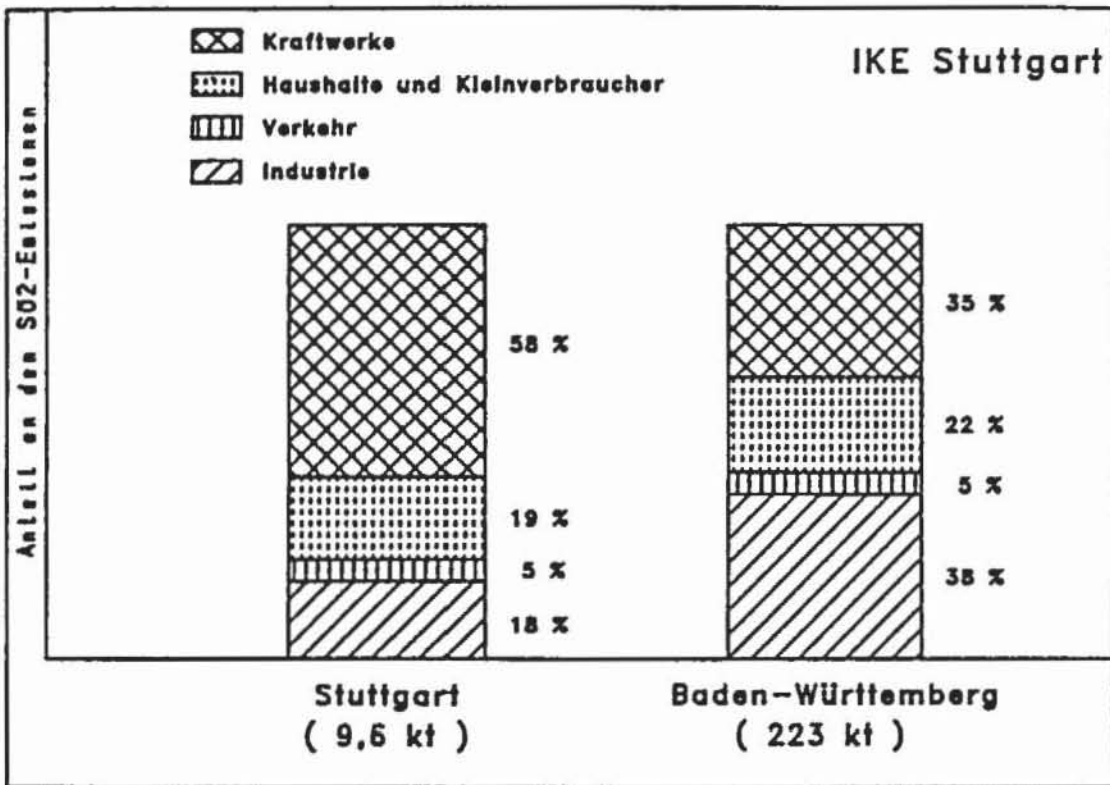


Abb. 1: Anteil der Emittentengruppen an den SO<sub>2</sub>-Emissionen in Stuttgart 1985 und - zum Vergleich - in Baden-Württemberg

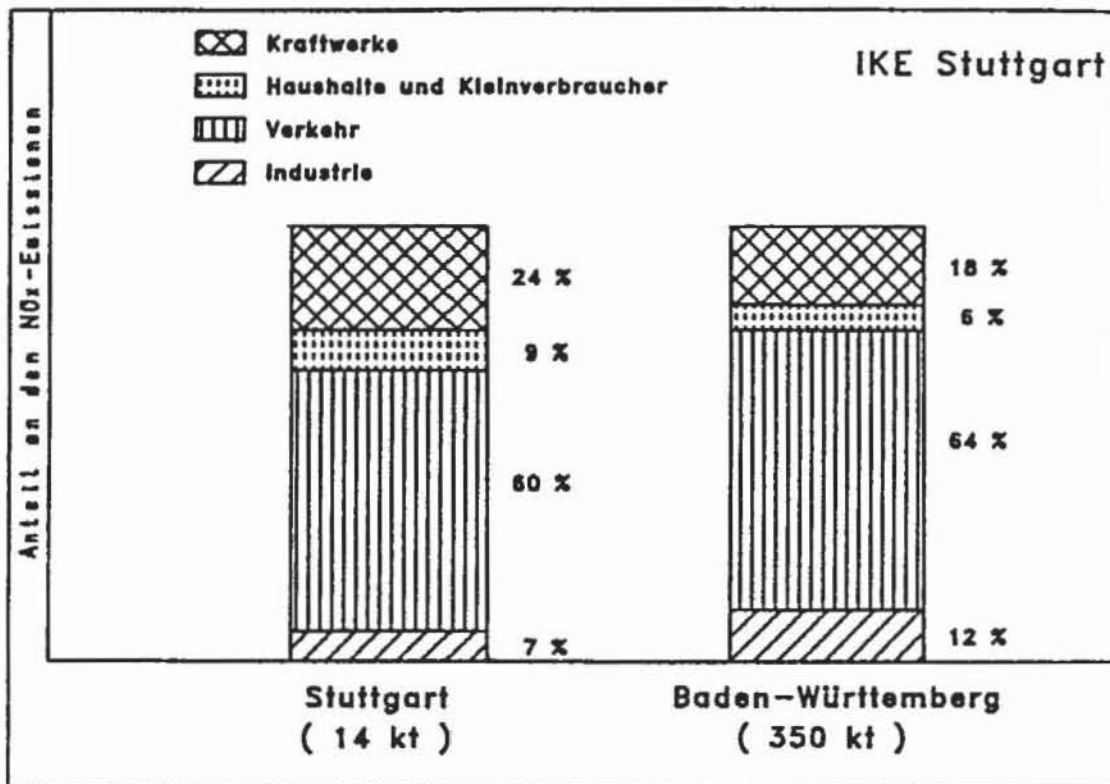


Abb. 2: Anteil der Emittentengruppen an den NO<sub>x</sub>-Emissionen in Stuttgart 1985 und - zum Vergleich - in Baden-Württemberg

durch eine Differenzierung der PKW's und LKW's nach Hubraumklassen und eingesetzten Schadstoffminderungstechniken. Die Fortschreibung bis 2000 basiert auf einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens gegenüber 1985 um insgesamt 5 % bei PKW bzw. 15 % bei LKW.

Insgesamt steht somit eine sehr detaillierte Datenbasis zur Verfügung, die - im Gegensatz zu Emissionskatastern - auch Daten über die Struktur der Emittenten (z. B. Wohnfläche, Feuerungstyp und -größe, Verkehrsbeziehungen) und deren zukünftige Entwicklung beinhaltet.

### 3 Die derzeitigen Emissionen in Stuttgart

Abb. 1 und 2 zeigen die  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Stuttgart 1985 differenziert nach Emittentengruppen.

Insgesamt wurden im Gemeindegebiet von Stuttgart 1985 9,6 kt  $\text{SO}_2$  (1 kt = 1000 t) und 14 kt  $\text{NO}_x$  emittiert.

Hauptsächliche Emittenten bei  $\text{SO}_2$  sind die öffentlichen Kraftwerke mit 58 %, beim  $\text{NO}_x$  ist es der Verkehr mit 60 %. Der Anteil der Industrie an den Emissionen liegt deutlich unter dem Landesdurchschnitt, weil es in Stuttgart nur wenige kleinere Betriebe der Grundstoffindustrie gibt.

### 4 Die Entwicklung der Emissionen und Maßnahmen zur Emissionsminderung

#### 4.1 Öffentliche Kraftwerke

Die TWS AG betreiben in Stuttgart je ein Kraftwerk in Gaisburg mit 4 Blöcken, ein Kraftwerk in Münster mit 4 Blöcken, ein Müllheizkraftwerk und 4 Gasturbinen. Auf-

grund der Bestimmungen der GFAVo (einschließlich der Dynamisierungsklausel), von Vereinbarungen im Rahmen von zwei Kommissionen der Landesregierung /4 bis 7/ und von freiwilligen zusätzlichen Leistungen der TWS werden bzw. wurden die folgenden Schadstoffminderungsmaßnahmen durchgeführt:

Heizkraftwerk Gaisburg:

- Umstellung von schwerem auf leichtes Heizöl und Erdgas
- Installation  $\text{NO}_x$ -armer Brenner und sonstiger Primärmaßnahmen
- Bau von zwei neuen Kessel mit Kohlewirbelschichtfeuerung

Kraftwerk Gaisburg:

- Umstellung von schwerem Heizöl auf leichtes Heizöl und Erdgas
- Durchführung von Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung

Kraftwerk Münster:

- Rauchgasentschwefelungsanlage (Kalkwaschverfahren)
- Rauchgasentstickungsanlage (SCR-Verfahren)
- Durchführung von Primärmaßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung

Müllverbrennungsanlage:

- Rauchgaswaschanlage

Diese Maßnahmen - unterstützt durch den Zubau des Kernkraftwerks Neckarwestheim II, an dem die TWS AG beteiligt ist - führen trotz steigendem Stromverbrauch zu einer Abnahme der  $\text{SO}_2$ -Emissionen von 5,6 kt/a 1985 auf 1,2 kt/a im Jahr 2000, d. h. um 78 % (Abb. 3) und zu einer Abnahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen von 3,5 kt/a 1985 auf 1,3 kt/a im Jahr 2000, d. h. um 64 %. Die bereits erwähnten spezifischen Minderungskosten (SMK) betragen

- für die Rauchgasentschwefelungsanlagen (ohne Müllverbrennungsanlage) im Durchschnitt 4,5 DM/kg  $\text{SO}_2$
- für die Maßnahmen zur  $\text{NO}_x$ -Minderung (insbesondere SCR-Anlagen): 10 DM/kg  $\text{NO}_x$ .

Diese Zahlen stellen, da die Durchführung dieser Maßnah-

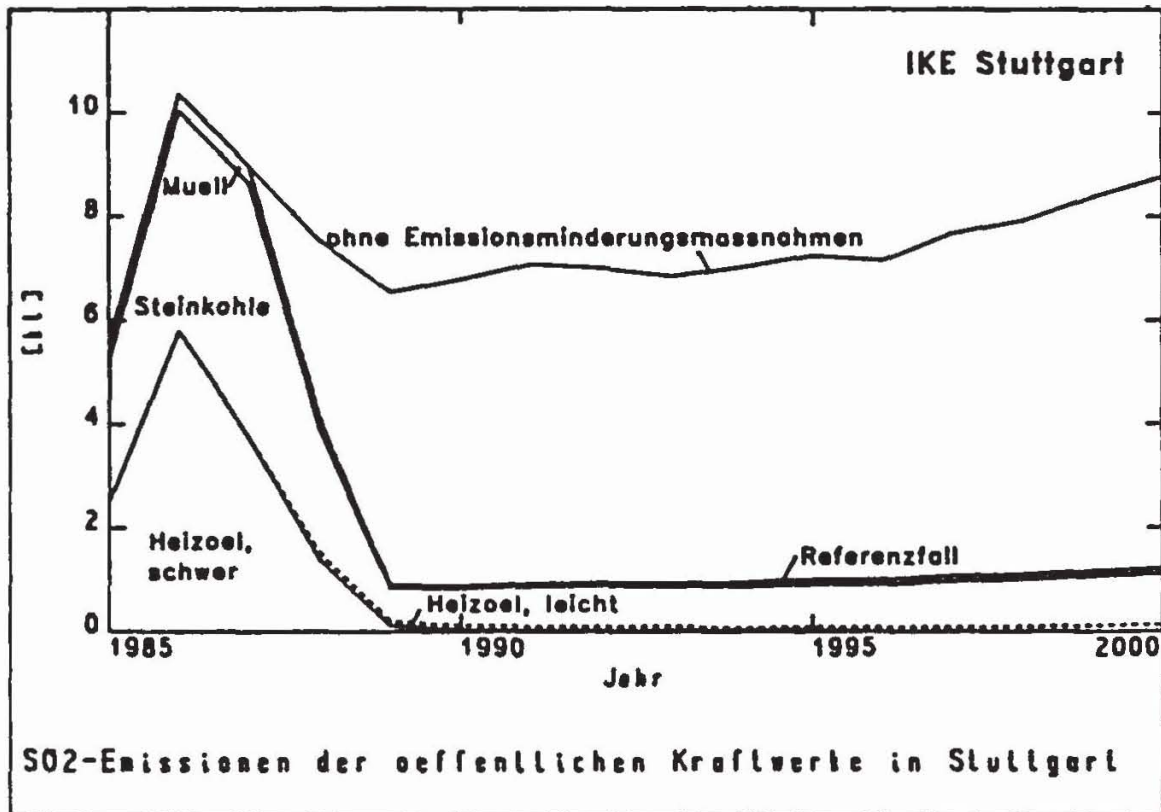


Abb. 3: SO<sub>2</sub>-Emissionen aus öffentlichen Kraftwerken in Stuttgart ohne Emissionsminderungsmaßnahmen und bei Durchführung der beschriebenen Maßnahmen (Kurve Referenzfall)

men beschlossen und akzeptiert ist, einen Maßstab für die Bewertung zusätzlicher Maßnahmen in anderen Sektoren dar.

Die Durchführung der Maßnahmen kostet insgesamt ca. 70 Mio DM/a.

Da mittelfristig schweres Heizöl in allen Blöcken bis auf einen durch Gas und leichtes Heizöl ersetzt wird und alle Kohleblöcke, die nicht in Kaltreserve gehen oder stillgelegt werden, sowie ein Block, der weiterhin schweres Heizöl einsetzt, mit Rauchgasentschwefelungs- und DENOX-Anlagen versehen werden, sind weitergehende mittel- und langfristige Maßnahmen nicht zu empfehlen. Eine Ausnahme bildet die weitergehende Entschwefelung von leichtem Heizöl auf 0,15 % Schwefelgehalt. Bei SMK von 6,5 DM/kg SO<sub>2</sub> ergeben sich Minderungen von 0,05 kt/a.



#### 4.2 Genehmigungsbedürftige Anlagen (ohne öffentliche Kraftwerke)

In Stuttgart gibt es 175 genehmigungsbedürftige Anlagen, davon 80 industrielle Anlagen und 95 Anlagen von sog. 'Kleinverbrauchern', z.B. Krankenhäuser, Universität, Dienstleistungsunternehmen usw. Von diesen 175 Anlagen unterliegen 3 der GFAVo, da sie eine Feuerungsleistung von mehr als 50 MW besitzen. 2 dieser 3 Anlagen werden in den nächsten Jahren stillgelegt, da eine Versorgung mit Fernwärme vorgesehen ist.

Abb. 4 zeigt den Bedarf an fossilen Brennstoffen in den genehmigungsbedürftigen Anlagen und seine Entwicklung bis zum Jahr 2000. Es zeigt sich, daß in den nächsten Jahren (bis 1990) erhebliche Brennstoffsubstitutionen vorgesehen sind. So wird insbesondere schweres Heizöl, aber auch Kohle durch leitungsgebundene Energieträger (Gas, Fernwärme, Strom) ersetzt.

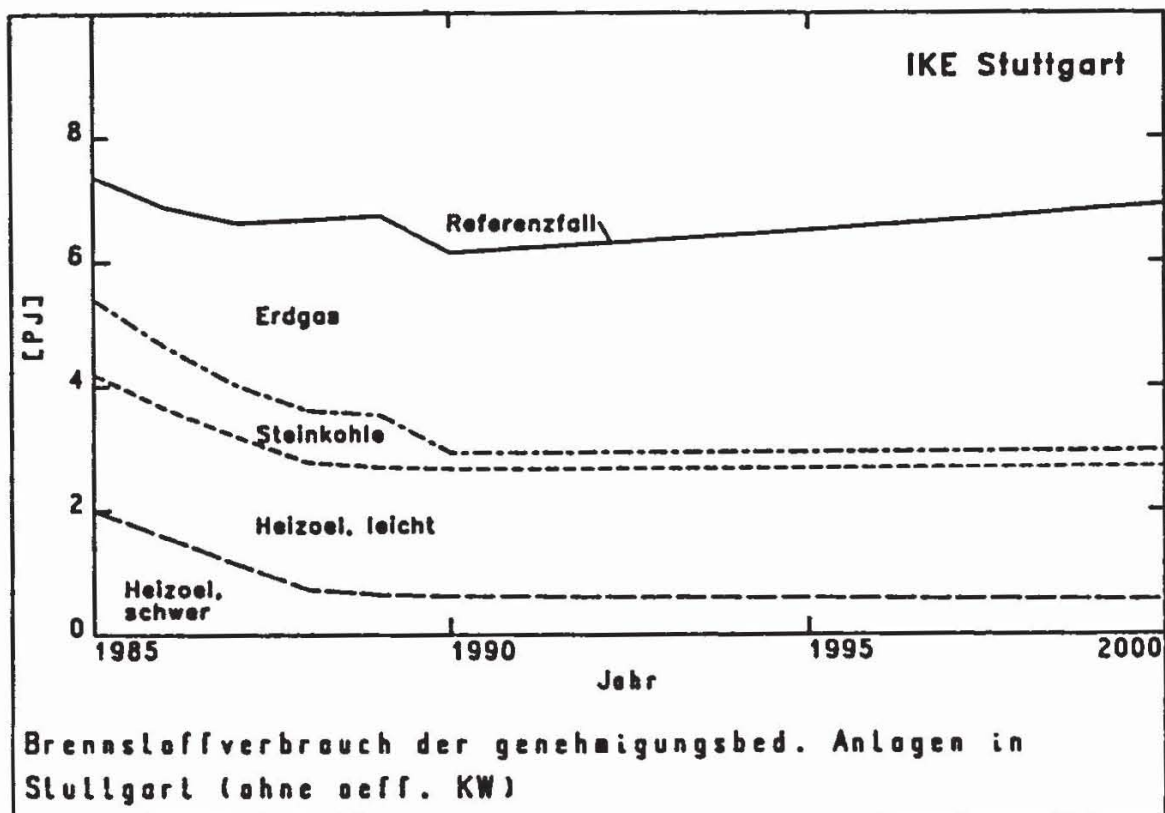


Abb. 4: Entwicklung des Brennstoffverbrauchs in genehmigungsbedürftigen Anlagen in Stuttgart (ohne öffentliche Kraftwerke)

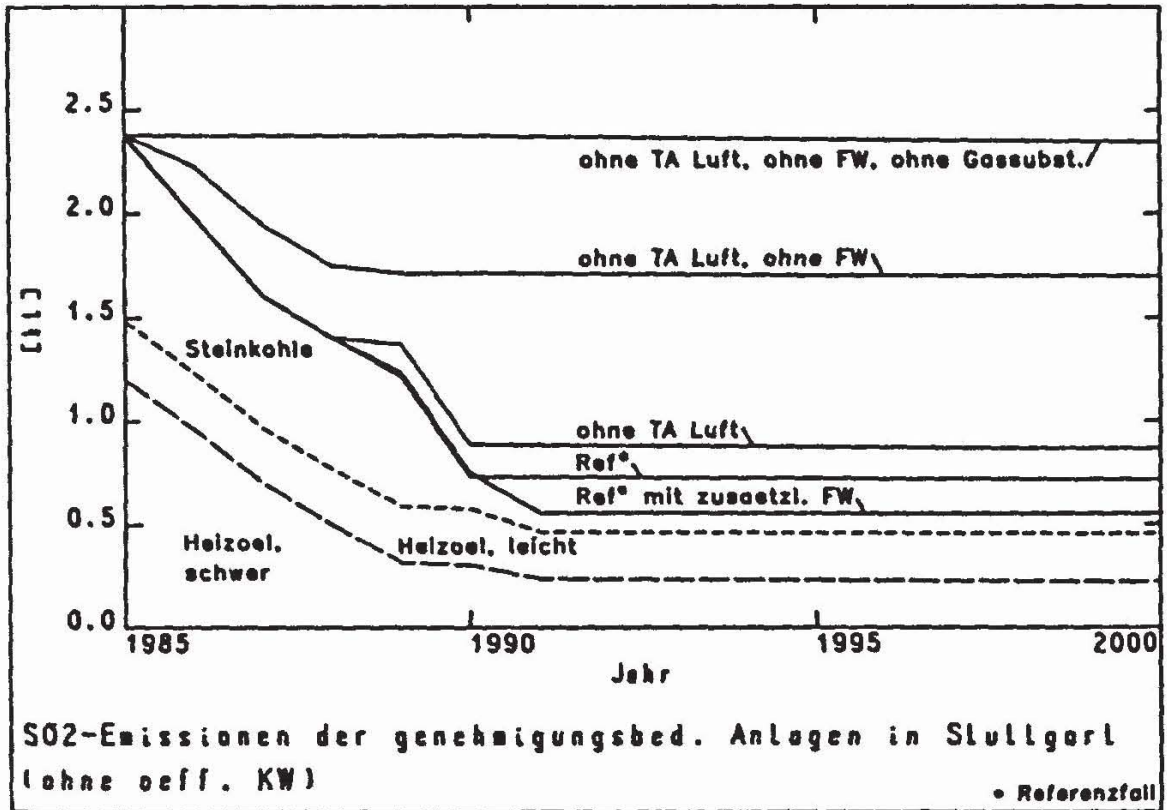


Abb. 5: SO<sub>2</sub>-Emissionen der genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen bei Durchführung verschiedener Maßnahmen (Erläuterung der Maßnahmen im Text)

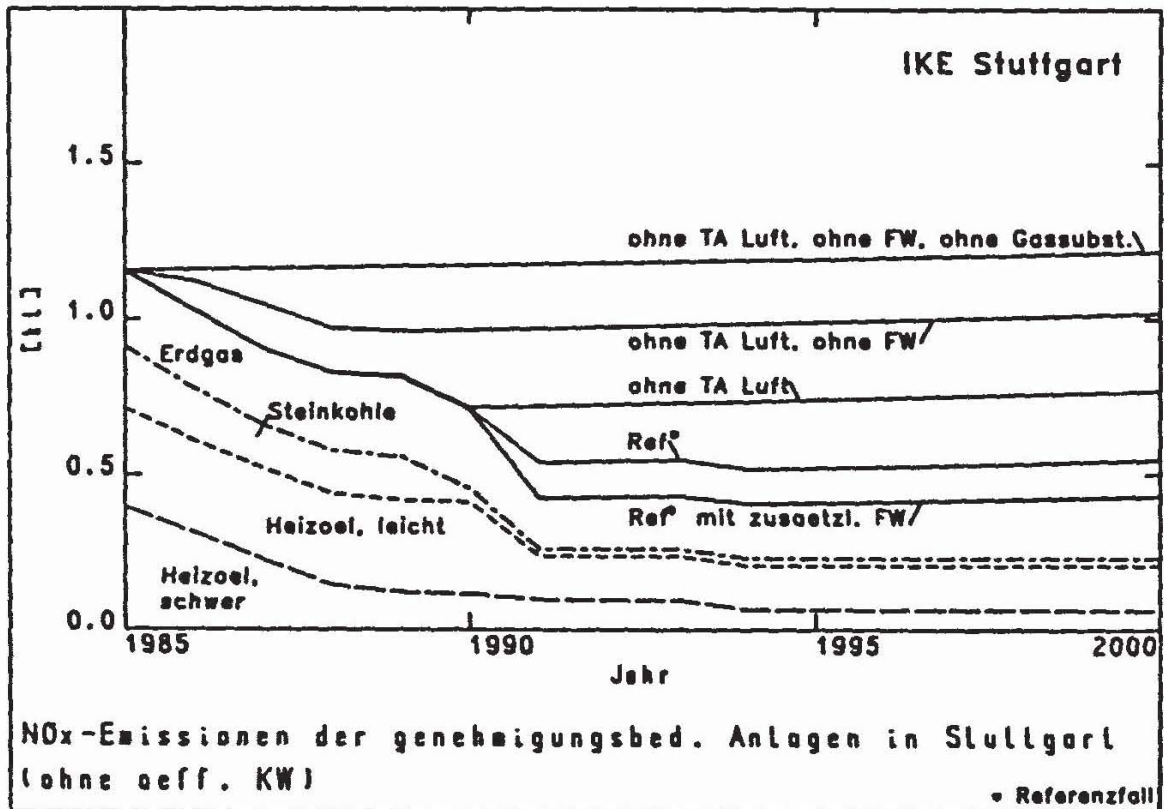


Abb. 6: NO<sub>x</sub>-Emissionen der genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen bei Durchführung verschiedener Maßnahmen (Erläuterungen der Maßnahmen im Text)

Durch diese Substitutionen und die Neufassung der TA Luft werden die  $\text{SO}_2$ -Emissionen sehr deutlich von 2,4 kt/a 1985 auf 0,7 kt/a bis 1990 (um 70 %) zurückgehen (Abb. 5, Kurve Ref\*). Beim  $\text{NO}_x$  (Abb. 6, Kurve Ref\*) ist der Rückgang (von 1,2 kt/a 1985 auf 0,5 kt/a 1990 um 53 %) etwas weniger deutlich, weil auch gasbefeuerte Anlagen noch in nennenswertem Umfang  $\text{NO}_x$  emittieren.

Ohne die geplanten Umrüstungen von Anlagen auf Gas und Fernwärme und ohne die Neufassung der TA Luft, aber unter Berücksichtigung von Energieeinsparungen, würden die  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen aus genehmigungsbedürftigen Anlagen etwa konstant bleiben (Abb. 5 und 6, oberste Kurven). Durch die geplante Umrüstung von ölbefeuerten Anlagen auf Gasfeuerung werden die Emissionen Ende der neunziger Jahre bei  $\text{SO}_2$  um 28 % bzw. 0,65 kt  $\text{SO}_2$ /a und bei  $\text{NO}_x$  um 16 % bzw. 0,2 kt/ $\text{NO}_x$ /a gemindert (Abb. 5 und 6, Kurve 'ohne TA Luft, ohne FW'). Die geplante Umrüstung auf Fernwärme mindert die Emissionen in den neunziger Jahren um 0,8 kt  $\text{SO}_2$ /a und 0,25 kt  $\text{NO}_x$ /a (Kurve 'ohne TA Luft'). Die dadurch bewirkten Mehremissionen in Heizkraftwerken sind bei den Emissionen der öffentlichen Kraftwerke berücksichtigt. Durch die Neufassung der TA Luft wird eine Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen um 0,1 kt  $\text{SO}_2$ /a und der  $\text{NO}_x$ -Emissionen um 0,2 kt  $\text{NO}_x$ /a erzielt - dies ist bei  $\text{SO}_2$  deutlich weniger als mit den vorgenannten Maßnahmen erreicht wird (Kurve Ref\*).

Die aufgrund der TA Luft erforderlichen Maßnahmen zur Reduzierung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen - insbesondere die Substitution von schwerem Heizöl in Anlagen < 5 MW und die Verwendung von schwefelarmem schwerem Heizöl - verursachen Kosten von 0,42 Mio DM/a. Die SMK betragen 3 DM/kg  $\text{SO}_2$ . Für  $\text{NO}_x$ -Minderungsmaßnahmen müssen aufgrund der TA Luft

2 Mio DM/a ausgegeben werden - vor allem für  $\text{NO}_x$ -arme Brenner. Die SMK betragen 8,4 DM/kg  $\text{NO}_x$ .

Zusätzlich zu den genannten Maßnahmen wurde eine Reihe weiterer Maßnahmen zur Schadstoffminderung untersucht. Dazu gehört insbesondere die Rauchgasreinigung. Zur  $\text{SO}_2$ -Minderung bei kohle- und schwerölbefeuerten Kesseln steht - auch bei kleineren Anlagen unter 50 MW - das Kalkwaschverfahren zur Rauchgasentschwefelung zur Verfügung. In zweiter Linie kommen auch das Trockenadditivverfahren und das Sprühabsorptionsverfahren in Betracht. Andere Verfahren haben höhere SMK oder sind noch nicht ausgereift (siehe auch /8/). Auch beim Kalkwaschverfahren ist allerdings das Problem der Deponierung bzw. Verwertung der entstehenden Reststoffe nicht gelöst.

Günstige SMK entstehen vor allem bei Anlagen mit hoher Auslastung z. B. in der Grundstoffindustrie. In Stuttgart sind solche Anlagen kaum vorhanden. Die günstigste Anlage in Stuttgart würde Kosten von 6 DM/kg  $\text{SO}_2$  verursachen, zwischen 10 und 15 DM/kg  $\text{SO}_2$  ließen sich 2 weitere Anlagen mit Kohlefeuerungen mit Rauchgasentschwefelungsanlagen versehen. Bei Kosten von 1,6 Mio DM/a ließen sich die Emissionen durch diese 3 Anlagen um 0,18 kt  $\text{SO}_2$ /a vermindern. Die durchschnittlichen SMK dieser Maßnahme betragen 8,8 DM/kg  $\text{SO}_2$ .

Als Sekundärmaßnahmen zur Entfernung des  $\text{NO}_x$  aus dem Rauchgas bieten sich insbesondere sog. SCR-Anlagen an. Die günstigste Anlage erreicht hier SMK von 18 DM/kg  $\text{NO}_x$ , bei Mehrkosten von 0,3 Mio DM/a könnten 0,017 kt  $\text{NO}_x$ /a weniger emittiert werden. Eine weitere Anlage besitzt SMK von 24 DM/kg  $\text{NO}_x$  bei einer Minderung von 0,03 kt  $\text{NO}_x$ /a.

Alle weiteren Anlagen weisen SMK von über 30 DM/kg  $\text{NO}_x$ , die Mehrzahl der Anlagen sogar SMK von über 100 DM/kg  $\text{NO}_x$  auf, so daß diese Maßnahmen weniger empfehlenswert sind.

Empfehlenswert ist dagegen die Durchführung von Primärmaßnahmen, bei denen die Entstehung von  $\text{NO}_x$  während der Verbrennung vermindert wird. Hier ist insbesondere die Einführung  $\text{NO}_x$ -armer Brenner und die  $\text{NO}_x$ -arme Einstellung der Feuerung zu erwähnen. Durch solche Maßnahmen können die Grenzwerte der TA Luft - insbesondere bei Schwerölfeuerungen - erheblich unterschritten werden. Eine Quantifizierung ist allerdings wegen der je nach Feuerungsart, -typ und -einstellung sehr unterschiedlichen Emissionsfaktoren nicht möglich.

Des weiteren wurden zwei Strategien untersucht, bei denen verstärkt Fernwärme eingesetzt wird. Bei der ersten Strategie werden alle Anlagen, die in heute mit Fernwärme versorgten Gebieten liegen, mit Fernwärme versorgt. Dies bringt allerdings lediglich eine Minderung der Emissionen um 0,01 kt  $\text{SO}_2$  und 0,02 kt  $\text{NO}_x$ . Bei der zweiten Fernwärmeausbaustrategie werden alle Anlagen im Industriegebiet des Stadtteils Feuerbach und in angrenzenden Gebieten der Stadtteile Zuffenhausen und Bad Cannstatt mit Fernwärme versorgt. Dies würde die Emissionen um weitere 0,16 kt  $\text{SO}_2$  und um 0,1 kt  $\text{NO}_x$  mindern (Kurve 'zusätzl. FW' in Abb. 5 und 6). Diesen Minderemissionen stehen allerdings Mehremissionen in den Heizkraftwerken der Stadt gegenüber.

#### 4.3 Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen

Für die Ermittlung der Emissionsentwicklung im Zeitraum von 1985 bis 2000 im sog. Referenzfall wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Bestand an Öl- und Kohleeinzelheizungen nimmt deutlich auf etwa die Hälfte ab;
- etwa ein Drittel der Ölzentralheizungen werden auf Fernwärme und Gas umgestellt;
- die Hälfte der Wohnungen mit Gaseinzelheizungen werden auf Gaszentral- oder Etagenheizungen umgestellt.

Die darüber hinaus getroffenen Annahmen über Modernisierungs- und Einsparmaßnahmen, Bevölkerungsentwicklung, Nutzungsgrade neuer Kessel und Wirtschaftswachstum führen zu einer Absenkung des Raumwärmebedarfs der privaten Haushalte von 1985 bis 2000 um 3 % und zu einer Erhöhung des Raumwärmebedarfs für gewerblich genutzte Flächen um ca. 6 %.

Auf Grund dieser Annahmen sinkt der Verbrauch an leichtem Heizöl von ca. 8 PJ/a auf 5 PJ/a und von Kohle von 0,4 PJ/a auf 0,2 PJ/a ab. Der Gasverbrauch steigt von 10 PJ/a auf 11,5 PJ/a an. Strom und Fernwärme decken derzeit 17 %, im Jahr 2000 22 % des Raumwärmebedarfs.

Aus diesen Brennstoffsubstitutionen resultiert im Referenzfall eine Reduzierung der Emissionen von 1,2 kt SO<sub>2</sub> und 1 kt NO<sub>x</sub> im Jahr 1985 auf 0,8 kt SO<sub>2</sub> und 0,95 kt NO<sub>x</sub> im Jahr 2000; dies entspricht einer Minderung um 33 % bei SO<sub>2</sub> und 5 % bei NO<sub>x</sub>.

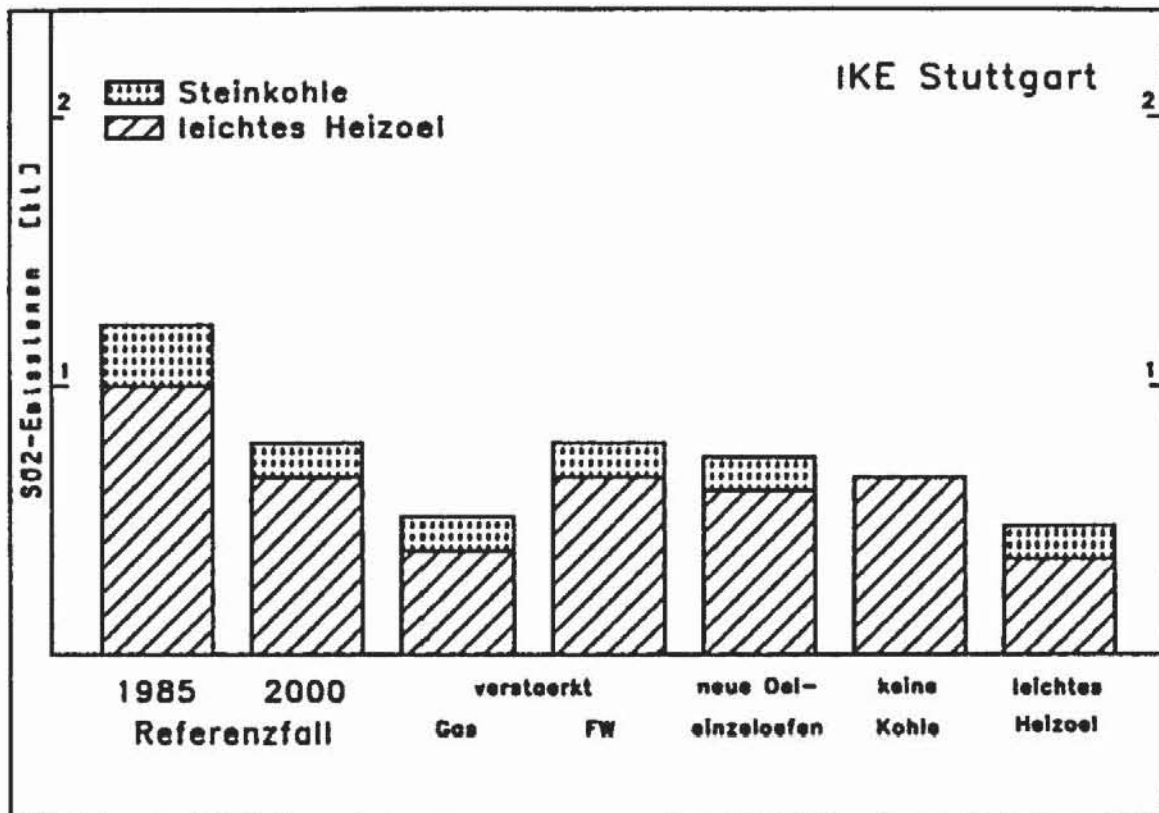
Folgende Maßnahmen, die zu einer weiteren Minderung von SO<sub>2</sub>-Emissionen führen, wurden untersucht:

- a) Durch verstärkte Substitution von Öl durch Gas in Zentralheizungen können zusätzlich noch etwa 0,3 kt SO<sub>2</sub> weniger emittiert werden.

- b) Ersetzt man etwa die Hälfte aller Zentralheizungen in fernwärmeversorgten Stadtteilen durch Fernwärme, so lassen sich dadurch in diesen Stadtteilen die Emissionen um ca. 0,2 kt  $\text{SO}_2$  und 0,1 kt  $\text{NO}_x$  reduzieren. Dafür entstehen andererseits zusätzliche Emissionen in den Heizkraftwerken, so daß die gesamte  $\text{SO}_2$ -Minderung etwa halbiert wird, wobei die zusätzlichen Emissionen aus Heizkraftwerken aber weiträumig verteilt werden.
- c) Durch Ersatz der vorhandenen Öleinzelföfen durch neue moderne Öleinzelföfen, die einen 50 % niedrigeren Brennstoffbedarf aufweisen, lassen sich die  $\text{SO}_2$ -Emissionen um ca. 0,05 kt mindern. Infolge der Brennstoffersparnis ist diese Maßnahme wirtschaftlich, d. h. es entstehen keine Mehrkosten.
- d) Durch Umstellung der Kohleöfen auf Gas lassen sich weitere 0,2 kt  $\text{SO}_2$ /a vermeiden.
- e) Eine Entschwefelung des leichten Heizöls bringt Emissionsminderungen von ca. 0,3 kt  $\text{SO}_2$ /a.

Die durch die einzelnen Maßnahmen bewirkten Minderungen der Schadstoffemissionen sind in Abb. 7 dargestellt.

Untersucht wurden auch die Möglichkeiten des Einsatzes von Rauchgaswäschern bei Kesseln, in denen leichtes Heizöl eingesetzt wird. Solche Rauchgaswäscher führen allerdings erst ab etwa 200 kW zu konkurrenzfähigen spezifischen Minderungskosten. Außerdem ist, um die beim Waschen anfallende Kondensationswärme des Wassers nutzen zu können, ein schwitzwassersicherer Kamin erforderlich. Das Potential für solche Anlagen ist daher gering. Dazu kommt, daß eine eventuelle Halbierung des maximalen Schwefelgehalts in leichtem Heizöl die Effizienz von Rauchgaswäschern halbiert bzw. die SMK verdoppelt.



**Abb. 7 :** SO<sub>2</sub>-Emissionen der nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen bei Durchführung verschiedener Maßnahmen, Erläuterung der Maßnahmen im Text

Unter anderem wurden folgende Maßnahmen zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen untersucht:

- a) Austausch von Brennern in Ölzentralheizungen < 50 kW durch Blaubrenner, die mit Luftüberschuß arbeiten bzw. bei Anlagen > 50 kW durch Gebläsebrenner mit gestufter Luftzuführung. Die Mehrkosten gegenüber herkömmlichen Brennern betragen ca. 0,8 Mio DM/a bei Minderungen von 0,1 kt NO<sub>x</sub>/a. Die SMK betragen ca. 8-9 DM/kg NO<sub>x</sub>.
- b) Austausch von Brennern in Gaszentralheizungen durch neue Brenner mit Edelstahleinsatz. Bei vernachlässig-



baren Mehrkosten entstehen Minderungen von ca. 0,14 kt  $\text{NO}_x$ /a.

- c) Austausch aller atmosphärischen Gaszentralheizungen (Brenner und Kessel) durch Anlagen mit Gebläsebrenner. In Anlagen < 100 kW ergeben sich dabei Minderemissionen von 0,14 kt  $\text{NO}_x$ /a bei Mehrkosten von 1,8 Mio DM/a. Die SMK betragen somit ca. 13 DM/kg  $\text{NO}_x$ . Bei Anlagen > 100 kW ist der Einsatz von Gebläsebrennern infolge des besseren Wirkungsgrades dieser Anlagen wirtschaftlich. Bei diesen Anlagen entstehen somit keine Mehrkosten. Die Minderemissionen betragen 0,07 kt  $\text{NO}_x$ /a.
- d) Einsatz von Gasspezialkesseln mit überstöchiometrisch vormischendem Brenner. Durch den Einsatz dieser Kessel bei allen Gaszentralheizungen wäre eine Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen um 0,22 kt  $\text{NO}_x$ /a bei Mehrkosten von 2,4 Mio DM/a möglich. Die SMK betragen somit ca. 11 DM/kg  $\text{NO}_x$ .
- e) Die Verwendung von Edelstahl- und Keramikeinsätzen bei Gaseinzelöfen und -etagenheizungen würde die  $\text{NO}_x$ -Emissionen um 0,1 kt  $\text{NO}_x$ /a reduzieren, ohne daß nennenswerte Mehrkosten entstehen.

Abb. 8 stellt die mit diesen Maßnahmen erreichbaren Emissionen im Vergleich dar. Alle eingesetzten  $\text{NO}_x$ -armen Kessel und Brenner sind entweder auf dem Markt erhältlich oder zumindest als Prototyp vorhanden. Da die SMK im Bereich der SMK durchgeführter Maßnahmen z. B. bei Kraftwerken und PKW liegen, ist die Durchführung empfehlenswert.

Da die verschiedenen Maßnahmen zum Teil dieselben Anlagen betreffen, können die o. g. Minderungen nicht alle addiert werden. Maximal sind Minderungen von ca. 0,4 kt  $\text{NO}_x$ /a möglich.

Selbstverständlich tragen auch Maßnahmen zur Energieeinsparung, insbesondere die Wärmedämmung von Gebäuden und der Einsatz von Feuerungsanlagen mit verbesserten Jahresnutzungsgraden zur Schadstoffminderung bei. Bezüglich der Effizienz solcher Maßnahmen sei auf /1/ verwiesen.

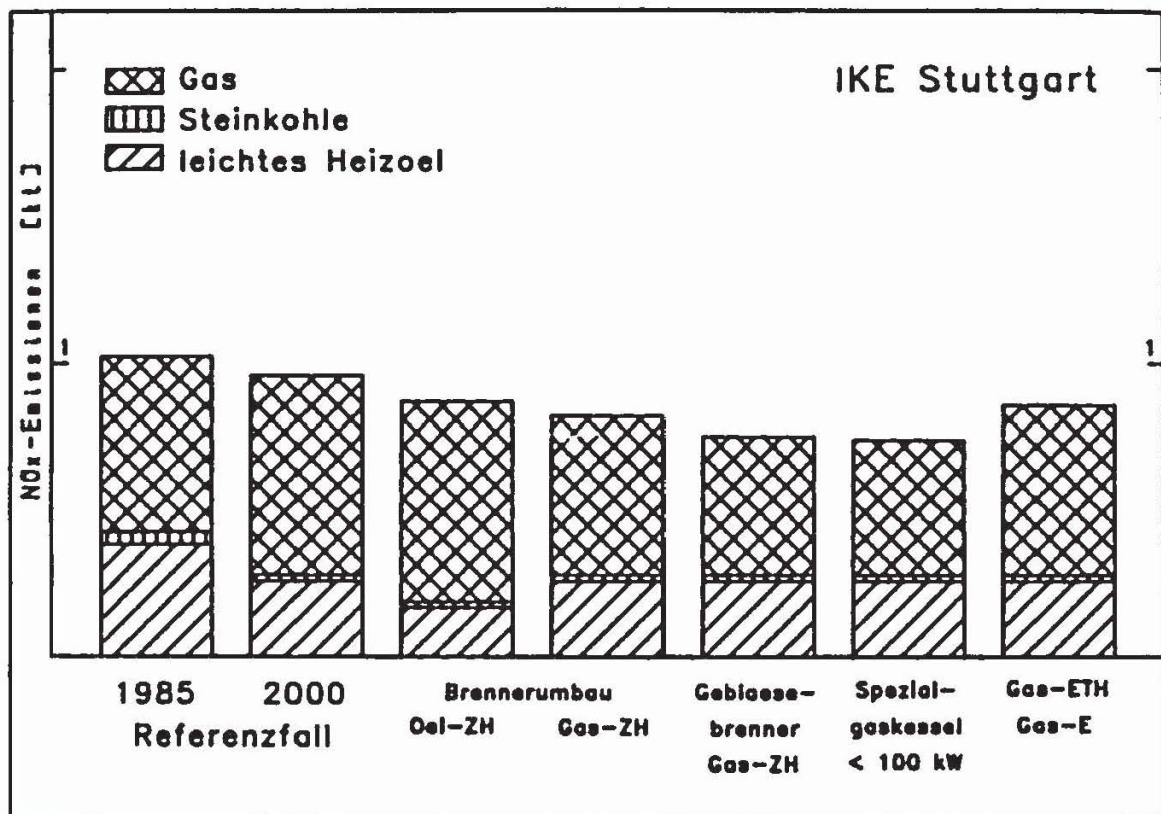


Abb. 8:  $\text{NO}_x$ -Emissionen der nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen bei Durchführung verschiedener Maßnahmen, Erläuterung der Maßnahmen im Text

#### 4.4 Verkehr

Im Sektor Verkehr wurden zwei Arten von Maßnahmen untersucht:

- technische Maßnahmen zur Schadstoffminderung bei PKW
- verkehrsplanerische Maßnahmen.

##### 4.4.1 Technische Maßnahmen zur Minderung der Schadstoffemissionen

Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Straßenverkehrs betragen 1985 8,6 kt  $\text{NO}_x$ . Darin sind ca. 1,5 kt  $\text{NO}_x$  enthalten, die auf den Autobahnabschnitten im Gemeindegebiet emittiert werden. Zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung wurde in Anlehnung an /3/ angenommen, daß von 1985 bis 2000 die Verkehrsleistung der PKW um insgesamt 5 %, die der LKW um 15 % zunimmt. Ohne technische Maßnahmen zur Schadstoffminderung - abgesehen von der zu erwartenden technischen Verbesserung der Motoren - ergibt sich ein etwa konstantes Emissionsniveau von ca. 8,6 kt  $\text{NO}_x$ /a bis 2000 (obere Kurve in Abb. 9). Dabei werden die Mehrmissionen bei den LKW dadurch kompensiert, daß bei den PKW ein von ca. 10 % auf 20 % steigender Anteil von Dieselfahrzeugen angenommen wird und Diesel-PKW wesentlich geringere spezifische  $\text{NO}_x$ -Emissionen als PKW mit Ottomotoren aufweisen.

Die EG hat verschärfte Grenzwerte für PKW - differenziert nach Hubraumklassen - verordnet. Würden alle neu zugelassenen PKW die EG-Grenzwerte ab dem dafür vorgesehenen Zeitpunkt gerade erfüllen, so ergäbe sich eine Minderung gegenüber dem Fall ohne Maßnahmen von ca. 12 % im Jahr 2000 (siehe Kurve 'EG-Grenzwerte' in Abb. 9).

Die tatsächlichen Emissionen werden aber niedriger liegen, weil

- der Einsatz schadstoffarmer Fahrzeuge bereits vor dem Zeitpunkt des Inkrafttretens der EG-Grenzwerte erfolgt, z. B. aufgrund der damit verbundenen Steuererleichterungen
- die zum Einsatz kommenden Techniken, insbesondere der Dreiwegekatalysator mit Lambdasonde, z. T. wesentlich niedrige spezifische Emissionen als gefordert erreichen.

Um wieviel die Emissionen im Jahr 2000 daher tatsächlich gemindert werden, hängt u. a. von den Kaufentscheidungen der Autokäufer und dem Angebot der Automobilindustrie ab.

Nimmt man an, daß der Anteil der Neufahrzeuge mit Katalysator

- in der Hubraumklasse 1400 bis 2000 cm<sup>3</sup> von 1985 bis 1993

- in der Hubraumklasse > 2000 von 1985 bis 1989

kontinuierlich auf 100 % anwächst, und daß bis 1993 neben dem geregelten zum Teil auch der unregelte Katalysator eingesetzt wird, so sinken dadurch die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Verkehrs in Stuttgart von etwa 8,6 kt/a auf etwa 5,6 kt/a um ca. 34 % ab (Kurve 'Referenzfall' in Abb. 9, die Annahmen sind detailliert in /1/ erläutert). Dieses Szenario wird als Referenzfall bezeichnet.

Dabei ist berücksichtigt, daß der Katalysator erst bei einer Betriebstemperatur von ca. 300 °C mit vollem Rückhaltegrad arbeitet. Diese Temperatur wird nach einem Kaltstart erst nach ca. 1 bis 3 Minuten bzw. 1 bis 3 km erreicht. Im Stadtverkehr wird dadurch der mittlere Rückhaltegrad des Katalysators um durchschnittlich ca. 12 - 14 Prozentpunkte gegenüber den Rückhaltegrad bei warmem Motor gemindert.

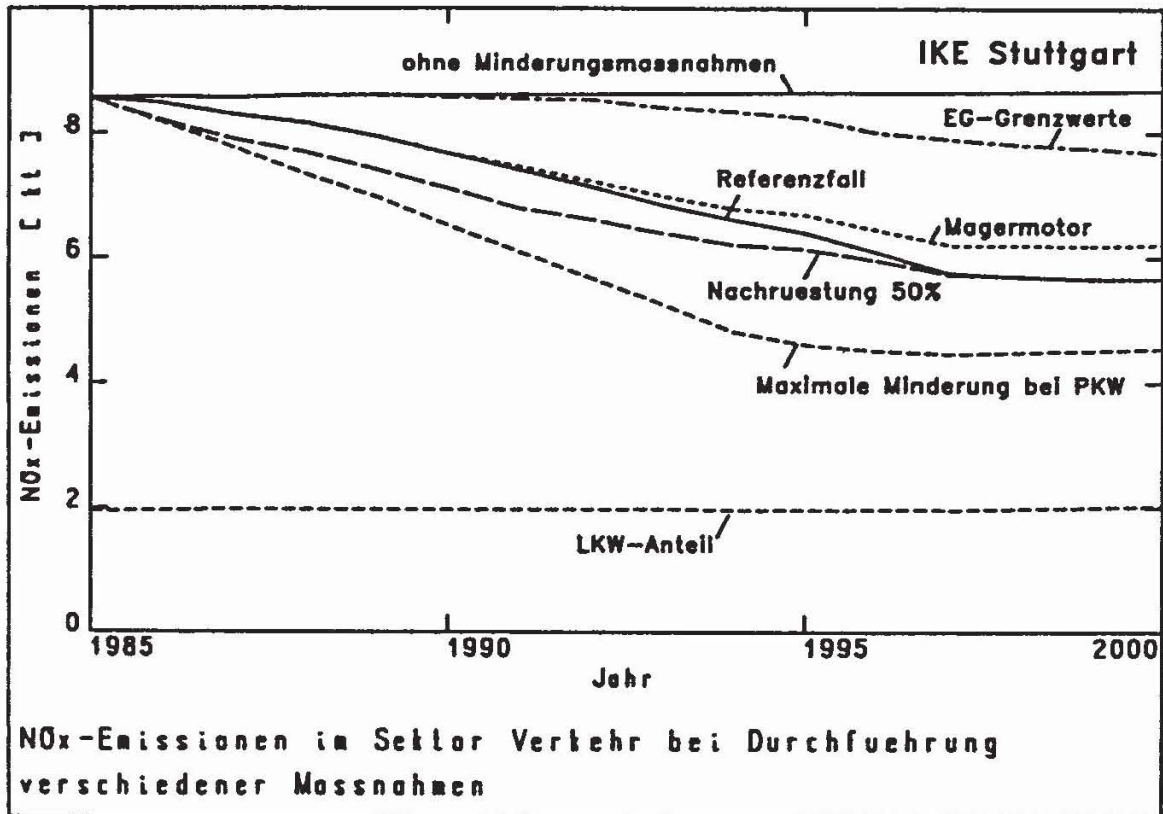


Abb. 9 : NO<sub>x</sub>-Emissionen des Verkehrs in Stuttgart bei Durchführung verschiedener Maßnahmen zur Minderung von NO<sub>x</sub>-Emissionen, Erläuterung siehe Text

Für die im Referenzfall berücksichtigten Maßnahmen zur Schadstoffminderung müssen die Autofahrer bzw. die Steuerzahler ca. 45 Mio DM/a aufwenden. Die SMK für den regulierten Katalysator betragen je nach Hubraumklasse ca. 15-20 DM/kg NO<sub>x</sub>. Bei der Bewertung dieser Zahl ist zu berücksichtigen, daß der Katalysator auch Kohlenwasserstoff- und CO-Emissionen vermindert, eine Gutschrift für diese Minderung ist hier nicht berücksichtigt. Die SMK für den ungereinigten Katalysator liegen mit ca. 16-24 DM/kg NO<sub>x</sub> höher, da dieser zwar billiger ist, andererseits aber geringere Emissionsminderungen aufweist.

SMK unter 10,- DM kann u. U. die Abgasrückführung aufweisen. Es sind  $\text{NO}_x$ -Minderungen um ca. 40-60 % möglich, allerdings unter Inkaufnahme einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs um 10 %.

Noch in der Entwicklung befindet sich der sog. Magermotor, der mit besonders magerem Gemisch arbeitet. Nach Lösung der vielfältigen technischen Probleme erscheint aber eine Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen gegenüber heutigen Ottomotoren um 50 % möglich; die Mehrkosten können noch nicht zuverlässig abgeschätzt werden. Würden ab 1990 statt geregelten Katalysatoren Magermotoren bei Neufahrzeugen zum Einsatz kommen, so ergäbe sich eine Erhöhung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen gegenüber dem Referenzfall um 0,5 kt  $\text{NO}_x/\text{a}$  bzw. 9 % (Kurve 'Magermotor' in Abb. 9).

Eine Reduzierung der Emissionen über den Referenzfall hinaus kann langfristig vor allem durch eine möglichst weitgehende Einführung des geregelten Dreiwegekatalysators erreicht werden, da dieser die höchsten Abscheidegrade erreicht. Um die maximal mögliche Minderung durch diese Maßnahmen zu ermitteln, wird angenommen, daß ab Mitte 1986 jedes Neufahrzeug mit einem Hubraum von mehr als 1000  $\text{cm}^3$  mit geregeltem Katalysator versehen ist. In diesem Fall sinken die  $\text{NO}_x$ -Emissionen gegenüber dem Referenzfall um 19 % auf 4,5 kt  $\text{NO}_x/\text{a}$  ab (Abb. 9, Kurve 'Maximale Minderung bei PKW').

Alle bis jetzt dargestellten Maßnahmen werden an Neufahrzeugen durchgeführt. Da jedes Jahr nur ein kleiner Teil (ca. 9-10 %) der Fahrzeugflotte ersetzt wird, führt dies zu einem entsprechend langsamen Rückgang der Emissionen.

Um schneller wirksame Schadstoffminderungen zu erreichen, müssen daher die Altfahrzeuge nachgerüstet werden. Als Maßnahmen kommen dabei insbesondere Abgasrückführung und ungeregelter Katalysator in Betracht. Werden diese Maßnahmen in den nächsten Jahren so eingesetzt, daß etwa 50 % der Altfahrzeuge nachgerüstet werden, so ergibt sich der in Abb. 9, Kurve 'Nachrüstung 50 %' dargestellte Emissionsverlauf.

Im Jahr 2000 werden ca. 2 kt  $\text{NO}_x$ /a, das sind etwa 36 % der gesamten Emissionen des Verkehrs im Referenzfall, durch LKW verursacht. Mögliche Minderungsmaßnahmen bei LKW sind z. B. Aufladung und Ladeluftkühlung. Da Daten in diesem Bereich weitgehend fehlen, ist eine Quantifizierung der Auswirkungen solcher Maßnahmen nicht möglich.

Die  $\text{SO}_2$ -Emissionen des Verkehrs steigen im Referenzfall von 0,4 auf 0,6 kt  $\text{SO}_2$ /a an, weil die Zahl der Dieselfahrzeuge zunimmt. Die einzige empfehlenswerte Maßnahme zur Minderung dieser Emissionen ist die weitergehende Entschwefelung des Dieselmotorkraftstoffs auf ca. 0,15 % Schwefelgehalt. Bei SMK von 6,5 DM/kg  $\text{SO}_2$  entstehen dadurch Emissionsminderungen von 0,27 kt  $\text{SO}_2$ /a.

#### 4.4.2 Sonstige Maßnahmen im Sektor Verkehr

Es gibt eine ganze Reihe planerischer Maßnahmen zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Verkehrs. Langfristig erscheint dabei eine stärkere Nutzungsmischung, durch die die von der Wohnung zum Arbeitsplatz oder zur Naherholung zurückzulegenden Wege verkürzt werden, erstrebenswert. Im Rahmen dieser Arbeit werden aber nur Maßnahmen untersucht, bei denen eine Quantifizierung wenigstens in Ansätzen möglich ist.

Tab. 1 zeigt die Ergebnisse folgender Maßnahmen:

- der Zubau von sog. blauen oder Umweltampeln, die die Autofahrer zum Abschalten des Motors bei einer genügend langen Rotphase veranlassen sollen
- der Ausbau eines zusammenhängenden Radwegenetzes
- Maßnahmen zur Verkehrsberuhigung (Tempo 30 in Wohngebieten)
- eine verstärkte Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel (Erhöhung der Fahrgastzahlen um 10 %).

Alle Angaben in der Tabelle beziehen sich auf Fahrzeuge ohne technische Rückhaltemaßnahmen wie z. B. Katalysatoren. Je mehr schadstoffarme Fahrzeuge zugelassen werden, um so größer bzw. ungünstiger werden die SMK. Die Tabelle zeigt, daß das größte Potential der verkehrsplanerischen Maßnahmen in der Ausweitung des öffentlichen Nahverkehrs besteht. Als einzige der untersuchten Maßnahmen hat aber die Einführung von blauen Ampeln auf vielbefahrenen, möglichst mehrspurigen Straßen mit ampelgeregelter Kreuzung SMK, die vergleichbar mit denen anderer Maßnahmen z. B. bei Kraftwerken sind. Beim Radwegnetz verhindert die ungünstige topographische Lage Stuttgarts bessere Ergebnisse.

Tab. 1: Potential und spezifische Minderungskosten (SMK) verschiedener Maßnahmen zur Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Verkehrs

	Minderungspotential t $\text{NO}_x$ /a 1985	SMK DM/kg $\text{NO}_x$ 1985
Umweltampel	16	10 - 40
Verkehrsberuhigung	4	100
Radwegenetz	24	17 - 80
ÖPNV + 10 %	122	?



## 5 Zusammenfassung und Empfehlungen

In Stuttgart werden die  $\text{SO}_2$ -Emissionen bei Berücksichtigung der im sog. Referenzfall getroffenen Annahmen von ca. 10 kt  $\text{SO}_2$ /a 1985 auf ca. 3,5 kt im Jahr 2000, d. h. um 64 %, zurückgehen (siehe Abb. 10 und 11).

Die wesentlichen Gründe hierfür sind:

- der Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen und die Substitution von schwerem Heizöl in den Kraftwerken der Technischen Werke der Stadt Stuttgart,
- die Substitution von schwerem Heizöl und Kohle durch Gas und Fernwärme vor allem in genehmigungsbedürftigen Anlagen, in zweiter Linie in Anlagen der Haushalte und Kleinverbraucher.

Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen gehen von ca. 14 kt  $\text{NO}_x$ /a 1985 auf 8 kt/a im Jahr 2000, d. h. um 47 %, zurück. Die wesentlichen Ursachen hierfür sind:

- der Einbau von DENOX-Anlagen bei den öffentlichen Kraftwerken
- die Einführung von schadstoffarmen PKW durch neue EG-Grenzwerte und Steuererleichterungen
- die Umstellung von schwerölbefeuerten Anlagen auf Gas sowie die Substitution von schweröl- und kohlegefeuerten Anlagen durch Fernwärme.

Auch die Neufassung der TA Luft trägt zu der o. g. Minderung bei, allerdings mit Minderungen von 0,14 kt  $\text{SO}_2$ /a und 0,2 kt  $\text{NO}_x$ /a in einem deutlich geringeren Maße als die vorgenannten Maßnahmen.

Die Durchführung aller dieser Maßnahmen verursacht Kosten von 100 Mio DM/a; in dieser Zahl sind die Kosten für Brennstoffsubstitutionen nicht berücksichtigt. Der Hauptanteil dieser Kosten (70 %) wird zur Minderung der Emissionen aus öffentlichen Kraftwerken eingesetzt.

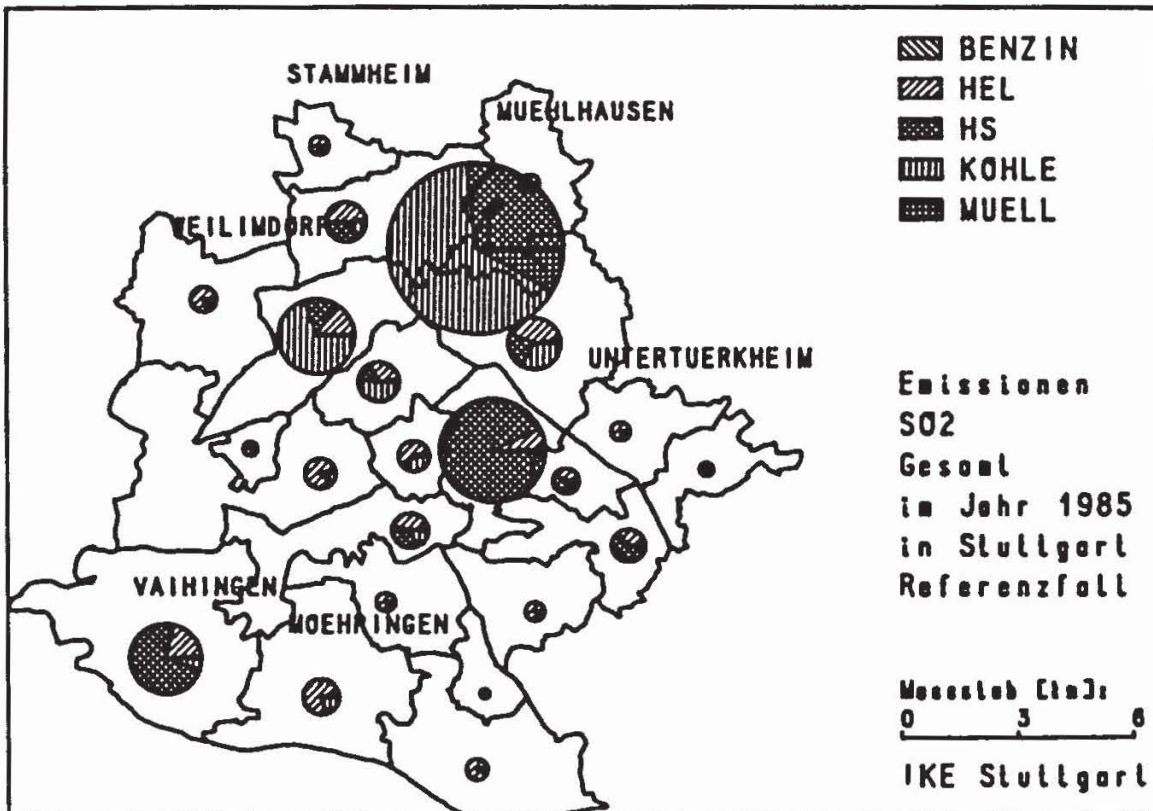


Abb. 10: SO<sub>2</sub>-Emissionen in Stuttgart 1985  
(HEL = leichtes Heizöl, HS = schweres Heizöl)

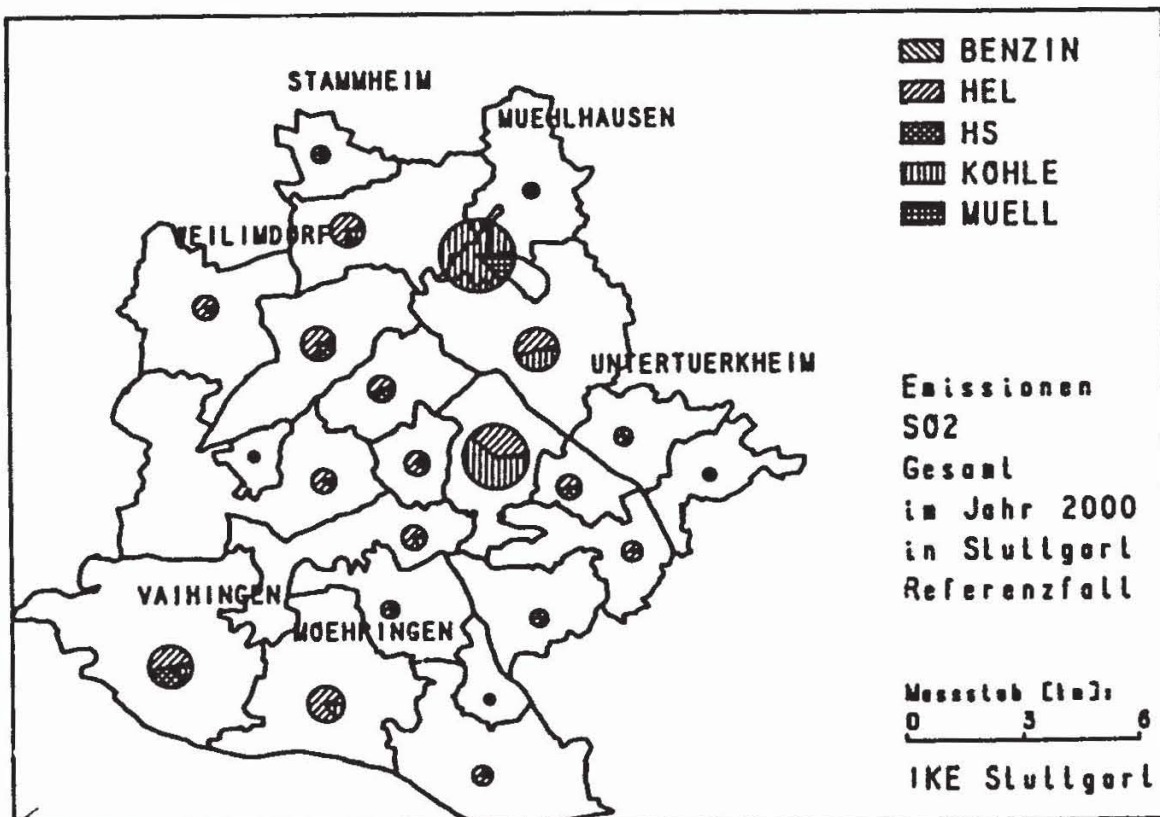


Abb. 11: SO<sub>2</sub>-Emissionen in Stuttgart 2000 (im Referenzfall,  
HEL = leichtes Heizöl, HS = schweres Heizöl)

Darüberhinaus wurden weitergehende Maßnahmen zur Emissionsminderung untersucht.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- a) Bei großen Feuerungsanlagen ( $> 50 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) ergeben sich erhebliche Emissionsminderungen, wenn die Bestimmungen der Großfeuerungsanlagenverordnung (GFAVo) unter Berücksichtigung der darin enthaltenen Dynamisierungsklausel konsequent angewendet werden.
- b) Bei kleineren genehmigungsbedürftigen Feuerungen ( $1-50 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) lassen sich über die Bestimmungen der TA Luft hinaus weitere Minderungen realisieren.

Zur Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen ist insbesondere die Substitution von schwerem Heizöl durch Erdgas sinnvoll. Bei kohlebefeuernten Anlagen führt auch der Einsatz von Wirbelschichtfeuerungen zu erheblichen Emissionsminderungen.

Bei kohle- und schwerölbefeuernten Anlagen mit hoher Auslastung - solche Anlagen finden sich insbesondere bei der Grundstoffindustrie - ist der Einsatz von Rauchgasreinigungsanlagen empfehlenswert. Dies setzt allerdings voraus, daß die anfallenden End- und Nebenprodukte ordnungsgemäß und mit vertretbaren Kosten verwertet oder beseitigt werden.

Zur Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen ist in erster Linie die Anwendung von Primärmaßnahmen empfehlenswert. In regelmäßigen Abständen sollte eine Überprüfung aller Anlagen in Bezug auf ihre  $\text{NO}_x$ -Emissionen und eine emissionsarme Einstellung erfolgen. Auch die Umstellung von schwerem Heizöl und Kohle auf Erdgas, Flüssiggas und leichtes Heizöl führt zu Emissionsminderungen.

Zur Durchsetzung der Maßnahmen im Bereich der Feuerungsanlagen zwischen 1 und 50 MW können folgende Instrumente eingesetzt werden:

- die konsequente Nutzung der Dynamisierungsklauseln der TA Luft durch die Genehmigungsbehörden
  - die Bereitstellung von Erdgas zu konkurrenzfähigen Preisen
  - die Durchführung von Demonstrationsvorhaben zur Rauchgasreinigung bei Feuerungen für schweres Heizöl und Kohle (z. B. bei gemeindeeigenen Feuerungsanlagen)
  - die regelmäßige Überprüfung und  $\text{NO}_x$ -arme Einstellung von Feuerungsanlagen.
- c) Auf Grund der niedrigeren Emissionshöhen haben die kleinen Feuerungsanlagen ( $< 1 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) einen niedrigeren Anteil an den Emissionen als an den Immissionen im Stadtgebiet. Dazu kommt, daß in allen anderen Sektoren gesetzliche Maßnahmen zur Minderung der  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen beschlossen wurden, nicht aber bei kleinen Feuerungsanlagen, so daß der Anteil dieser Anlagen an den gesamten Emissionen erheblich zunimmt.

Dies unterstreicht die Bedeutung der Durchführung von Maßnahmen auch in diesem Bereich.

Zur Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen kommen - neben der weitergehenden Entschwefelung von leichtem Heizöl, siehe e) - folgende Maßnahmen vorrangig in Betracht:

- die Umstellung von Kohleheizungen auf andere Brennstoffe
- die Umrüstung bestehender Öle Einzelheizungen auf Erdgas oder auf moderne Öle Einzelheizungen mit besseren Nutzungsgraden
- die Umrüstung von Ölsammelheizungen auf Erdgasbetrieb.

Bei der NO<sub>x</sub>-Minderung kommt weniger eine Substitution von Brennstoffen untereinander als vielmehr die Umrüstung auf NO<sub>x</sub>-arme Brenner und Kessel/Brenner-Kombinationen in Frage. Es sind bereits Anlagen auf dem Markt, die deutlich niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen als der Durchschnitt der Anlagen aufweisen. Die spezifischen Minderungskosten dieser Anlagen sind niedrig, der Einsatz solcher NO<sub>x</sub>-armer Anlagen ist daher zu empfehlen.

Gesetzliche Regelungen zur Durchsetzung der genannten Maßnahmen fehlen. Es bieten sich folgende Instrumente zur Durchsetzung der Maßnahmen an:

- Messung der Emissionen von NO<sub>x</sub>-armen Brennern und Anlagen im praktischen Betrieb
  - Information der Bevölkerung über schadstoffarme Anlagen, Empfehlungen des Einsatzes solcher Anlagen
  - Gewährung von Zuschüssen.
- d) Um möglichst niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionen im Verkehr zu erreichen, kommt es darauf an, daß möglichst viele Fahrzeuge technische Maßnahmen zur Schadstoffminderung einsetzen und daß die effektivsten Maßnahmen eingesetzt werden.

Die geringsten Emissionen weisen eindeutig Neufahrzeuge auf, die mit Dreiwegekatalysator mit Lambdasonde ausgerüstet sind. Niedrigere spezifische Minderungskosten, allerdings auch höhere Emissionen, entstehen durch die Abgasrückführung und die Substitution von Otto- durch Dieselmotoren. Wenn die noch bestehenden Probleme gelöst werden, kann auch das Magerkonzept zur Emissionsminderung in Stadtgebieten herangezogen werden.

Da verschärfte Grenzwerte gegenüber der EG wohl nicht durchsetzbar sind und Steuererleichterungen bereits bestehen, bleiben als Instrumente zur Durchsetzung weitreichender Maßnahmen

- eine umfassende Information der Autokäufer und -halter
- freiwillige Vereinbarungen mit der Automobilindustrie bezüglich des Angebots und des Mehrpreises von schadstoffarmen Autos und von Nachrüstungsmaßnahmen bei Altfahrzeugen
- die Unterstützung des Aufbaus eines flächendeckenden Angebots von bleifreiem Benzin
- die Nachrüstung von Altfahrzeugen im Besitz der öffentlichen Hand

Planerische Maßnahmen haben dagegen kurz- und mittelfristig nur ein Potential, das weit unter dem von technischen Maßnahmen an Fahrzeugen liegt. Günstige Minderungskosten werden insbesondere durch sog. blaue oder Umweltampeln erreicht. Dies gilt jedoch nur für vielbefahrene Kreuzungen mit ausreichend langer Rotphase und vor allem bei einem hohen Befolgungsgrad.

Auch die Erhöhung der Fahrgastzahlen beim öffentlichen Personennahverkehr trägt zur Schadstoffminderung bei, es bleibt jedoch offen, wie dies mit vertretbarem Aufwand durchgesetzt werden soll.

In kleineren Städten auf ebenem Gelände ist der Ausbau eines Radwegenetzes als Maßnahme diskussionswürdig. Dabei ist darauf zu achten, daß ein vollständiges, zusammenhängendes Netz zur Verfügung steht, da sonst das Netz nicht in ausreichendem Maße genutzt wird.

Durch die Schadstoffminderung bei PKW steigt der Anteil der  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch die LKW an. Die bei LKW geplanten Minderungsmaßnahmen (z. B. reduzierte EG-Grenzwerte) führen nicht zu wesentlichen Reduzierungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei LKW. Daher erscheinen Maßnahmen in diesem Bereich erforderlich. Bevor jedoch konkrete Maßnahmen empfohlen werden können, müssen erst Grundlagendaten beschafft und Versuche durchgeführt werden.

#### e) Allgemeine Maßnahmen

Zwei Maßnahmen führen darüberhinaus in allen Sektoren zu Schadstoffminderungen mit vertretbaren spezifischen Minderungskosten:

- Zum einen ist die Durchführung von Maßnahmen zur Energieeinsparung in allen Sektoren empfehlenswert.
- Außerdem sollte weiterhin darauf hingewirkt werden, daß der maximale Schwefelgehalt im leichten Heizöl im Rahmen der EG-Richtlinien weiter reduziert wird.

Auf Grund der sehr detaillierten Datenbasis können mit den hier vorgestellten Methoden auch weitere Maßnahmen analysiert werden.

Damit steht ein Instrumentarium zur Verfügung, das Kosten und Wirkungen von Maßnahmen zur Luftreinhaltung bei allen Emittentengruppen ermitteln und damit zur Identifizierung und Durchsetzung einer möglichst effizienten Umweltpolitik beitragen kann.

## Literaturverzeichnis

- /1/ A. Voß u. Mitarb.:  
Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen in Ballungsräumen am Beispiel der Stadt Stuttgart, Abschlußbericht, KFK-PEF, in Vorbereitung
- /2/ Technische Werke der Stadt Stuttgart AG (Hrsg.):  
Der Wärmeatlas Stuttgart  
Schriftenreihe Energieversorgungskonzepte Band 1, Stuttgart, 1983
- /3/ Nachbarschaftsverband Stuttgart (Hrsg.):  
Verkehrsuntersuchung im Gebiet des Nachbarschaftsverbandes Stuttgart und der Landkreise Böblingen, Esslingen und Ludwigsburg; Stuttgart März 1985
- /4/ Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):  
Bericht der Arbeitsgruppe 'Energiebedarf-Umwelt-Kraftwerksbetrieb', Stuttgart 1983
- /5/ Friedrich, R., A. Voß, E. Ruff:  
Fünf Vorschläge für reinere Luft, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 34, Heft 8, 1984
- /6/ Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):  
Minderung von Stickoxidemissionen an Kohlekraftwerken in Baden-Württemberg, Stuttgart 1984
- /7/ Friedrich, R., M. Mattis, A. Voß:  
Entstickung in sechs Schritten, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 35, Heft 1, 1985
- /8/ Staatsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.):  
Wirtschaftliche Entwicklung-Umwelt - Industrielle Produktion, Stuttgart 1986