

FEINMASCHIGES KATASTER DER SO_2 - UND NO_x -EMISSIONEN IN
BADEN-WÜRTTEMBERG FÜR DIE ZEIT DER TULLA-MESSKAMPAGNE

B. Boysen, R. Friedrich, Th. Müller, N. Scheirle, A. Voss

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wird ein Emissionskataster für Baden-Württemberg in einer Auflösung von 1 mal 1 Kilometer für die Zeit der TULLA-Meßkampagne erstellt. Erfagt werden hierbei die Schadstoffe SO_2 und NO_x .

Für die verschiedenen Sektoren werden verschiedene Methoden der Schadstoff Erfassung angewandt:

Für öffentliche Kraftwerke und andere Großemittenten mit einer Feuerungsleistung über 10 MW wurde eine Umfrageaktion durchgeführt. Diese umfaßt etwa 360 Betreiber von Feuerungsanlagen.

Für die restlichen Feuerungsanlagen einschließlich der privaten Haushalte und für den Kraftfahrzeugsektor wurden Modelle entwickelt, die aufgrund äußerer Parameter wie Gebäudestrukturen, Jahresenergieverbräuche der Industrie, Außentemperatur, Konjunkturverlauf etc. den zeitlichen und räumlichen Verlauf der Emissionen bestimmen.

Die Modellberechnungen werden zur Zeit durchgeführt. Erste Ergebnisse, die in diesem Bericht dargestellt werden, zeigen insbesondere die räumlichen und zeitlichen Schwankungen der SO_2 - und NO_x -Emissionen in Baden-Württemberg auf.

Abstract

High Resolution Emission Inventory of SO_2 and NO_x Emissions in Baden-Württemberg during the TULLA - Measurement Campaign

The aim of this study is to determine the amount of emissions of SO_2 and NO_x for the state of Baden-Württemberg during the period of the TULLA-Experiment. The emissions are calculated for every hour during this period and in the scale of 1 x 1 Kilometer.

There are different methods used to determine the emissions:

All power-plants and other major sources (mainly of the industry-sector) with furnaces greater 10 MW were asked to give the amount of hourly emissions directly, or if not possible, the hourly energy consumption. In this campaign about 360 institutions and plants were included.

For all other emittents including private households and the transportation sector, models were developed to calculate the time-dependent emissions based on exogeneous parameters such as housing-data, yearly energy-consumption-data, temperature, economic situation etc.

The model-calculations are executed right now. Preliminary results show the time-dependent and geographical variations of the emissions for Baden-Württemberg.

Problemstellung

Ziel dieses Vorhabens ist es, im Rahmen des TULLA-Projektes ein Emissionskataster zu erstellen, das für die Zeit der Meßperiode (18.3.1985 bis 29.3.1985) stündlich SO_2 - und NO_x -Emissionen in einem Raster von 1 km x 1 km für Baden-Württemberg liefert.

Die Ergebnisse dienen als Eingabegrößen für ein an der Universität Karlsruhe entwickeltes Ausbreitungsmodell, das anhand der im Untersuchungszeitraum gewonnenen Immissions-Meßdaten verifiziert werden soll.

Das Emissionskataster schließt die Sektoren Öffentliche Kraftwerke, Industrie, Kleinverbraucher und Verkehr ein. Um stündliche Emissionen mit ausreichender Genauigkeit berechnen zu können, wurden neue Methoden und Modelle entwickelt.

Methoden

Emissionen der Kraftwerke

Die Emissionen der Kraftwerke wurden durch eine Umfrage unter den Betreibern gewonnen, die in den meisten Fällen die NO_x - und SO_2 -Stundenemissionswerte direkt erfassen. In den restlichen Fällen wurden die Schadstoffausstöße aus den stündlichen Brennstoffverbräuchen errechnet.

Emissionen des Verarbeitenden Gewerbes

Die Emissionen des Verarbeitenden Gewerbes wurden bei den Betreibern, die Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von über $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ betreiben, genau wie bei den Kraftwerken, über eine Fragebogenaktion erfaßt.

Neben den Angaben über die stündlichen Emissionen bzw. stündlichen Brennstoffeinsätze wurden dabei noch andere Daten der Feuerungsanlage wie z.B. die Kaminhöhe, der Kaminquerschnitt und der Jahresenergieverbrauch erhoben. Die Fragebogenerhebung erstreckte sich auf 300 Betriebe.

Für die verbleibenden Anlagen der Industrie wurde ein Modell entwickelt, das aus Parametern wie Temperatur, Gradtagszahl, Produktionsindex und dem jährlichen Energieverbrauch nach Energieträgern der einzelnen Branchen die stündlichen Emissionen der verbleibenden Betriebe gemeindeweise ermittelt. Dazu wurde der Energieverbrauch sämtlicher Branchen des Verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg auf seinen zeitlichen Verlauf hin untersucht. Für jede Branche wurden über zwei Jahre hinweg mit Hilfe einer Regressionsanalyse Koeffizienten bestimmt, um damit den stündlichen Energieverbrauch unter Einbeziehung des jährlichen Gesamtverbrauchs ermitteln zu können. Die Verifizierung dieses Modells wurde anhand der jahreszeitlichen Temperatur- und Konjunkturverläufe der Vergangenheit für Baden-Württemberg durchgeführt.

Emissionen der Kleinverbraucher

Für die Kleinverbrauchergruppen wird ähnlich vorgegangen wie bei der Industrie, allerdings liegen hier keine jährlichen Energieverbräuche nach Energieträgern auf Gemeindebasis vor. Daher müssen diese Daten erst aus anderen Größen, wie zum Beispiel Beschäftigtenzahlen, Gebäudegrößen, Schülerzahlen und sonstigen Indikatoren berechnet werden. Die Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf die einzelnen Energieträger wird gemeindeweise durch Befragung der Energieversorgungsunternehmen am Ort bestimmt. Um stündliche Werte des Energieverbrauchs zu berechnen, wird der Jahresenergieverbrauch nach verschiedenen Verwendungszwecken (z.B. Raumwärme, Prozeßwärme hoher bzw. niedriger Temperatur) aufgeteilt. Diesen Teilverbräuchen werden dann Tages-, Wochen- und Monatsgänge zugeordnet, die anhand von Parametern wie Außenlufttemperatur, Produktionsindex usw. für die jeweils gewünschte Zeitperiode berechnet werden. Aus Jahresverbräuchen und Gängen können dann die stündlichen Emissionen bestimmt werden.

Emissionen der privaten Haushalte

Das Modell für den Bereich private Haushalte berechnet den stündlichen Verlauf der Emissionen, die vom Energieumsatz (ohne Strom) für Heizung, Warmwasser und Kochen herrühren. Grundlage für die örtliche Verteilung stellt die Gebäudeklassifizierung der amtlichen Statistik dar. Sie nennt fünf Kategorien von Wohngebäuden, wovon vier nach drei Altersklassen unterteilt sind. Stellvertre-

tend für diese Klassifizierung werden 13 Typen von Gebäuden bauphysikalisch und geometrisch definiert. Die Heiz- und die sonstigen Energiekonsumgewohnheiten der Bewohner werden durch sechs Verhaltensmuster abgebildet. Sie werden durch die Tagesgänge der Sollinnentemperatur, der Raumlüftung, der internen Wärmequellen des Warmwasser- und Kochenergieverbrauchs charakterisiert. Jedem dieser sechs typischen Benutzer ist ein Häufigkeitswert zugeordnet. Der Verlauf der Witterung ist durch die Parameter Lufttemperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit erfasst. Baden-Württemberg wird dabei in vier Klimazonen eingeteilt.

Das zur Simulation der Energiebilanz von Gebäuden verwendete physikalische Modell geht von wärmeleitenden und wärmespeichernden Gebäudeteilen, von Lüftungsverlusten und Solarenergiegewinnen sowie von inneren Wärmequellen aus. Aufgrund der vom Benutzer gewünschten Sollbedingungen (Raumtemperatur, Luftwechsel, Warmwasserverbrauch, Kochwärme) und aufgrund der klimatischen und sonstigen Bedingungen wird für das Gebäude die Wärmebilanz in stündlichen Intervallen berechnet. Da die Zeitkonstanten von Gebäuden im allgemeinen weit über 100 Stunden liegen, sind dynamische Berechnungen notwendig. Die Validierung des Modells erfolgt an Testgebäuden durch den Vergleich von Rechen- und Meßwerten.

Für einen Rechenlauf muß das Modell 312 mal angewendet werden. Vor der regionalen und örtlichen Aufteilung werden die Ergebnisse aus den sechs Nutzerklassen aggregiert, so daß für jede Klimazone 13 Energieverbrauchskurven vorliegen. Die örtliche Ermittlung des Ganges der Emissionen erfolgt anhand der Anzahl der Gebäude in der betrachteten Gemeinde. Zunächst wird aus deren Anteilen die gesamte Wärmenachfrage bestimmt. Mit der durch Umfragen bei den Energieversorgungsunternehmen ermittelten Struktur des örtlichen Brennstoffeinsatzes wird der Energieverbrauch nach Energieträgern ermittelt. Mit Hilfe von Faktoren werden daraus die Emissionen berechnet.

Emissionen des Verkehrs

Eingangsdaten für das Verkehrsmodell sind durchschnittliche tägliche Verkehrsmengen der Straßenabschnitte in Baden-Württemberg sowie stündliche Verkehrsmengen an Dauermeßstellen. Im Modell sind Lage und Eigenschaften der Straßenabschnitte in Baden-Württemberg abgebildet.

Die Zahl der im Durchschnitt täglich auf den Straßenabschnitten fahrenden Fahrzeuge ist aus der landesweiten Verkehrszählung 1980 bekannt. Um den zeitlichen Verlauf des Verkehrsaufkommens zu ermitteln, werden die Daten der automatischen Zahlstellen herangezogen. Sie liefern für ca. 90 ausgewählte Meßpunkte in Baden-Württemberg stündliche Verkehrsmengen für die Monate März 1980 und 1985. Anhand dieser Zahlen können die Entwicklung der durchschnittlichen Verkehrsmengen von 1980 bis 1985 sowie typische Tagesgänge während der Meßperiode für verschiedene Straßentypen abgeleitet werden.

Die Zahl der Fahrzeuge pro Stunde auf einem Straßenabschnitt ergibt sich aus dem prozentualen Anteil des Tagesverkehrs in dieser Stunde multipliziert mit der von 1980 auf 1985 hochgerechneten durchschnittlichen täglichen Verkehrsmenge auf diesem Abschnitt.

Durch Multiplikation mit Emissionsfaktoren, die für verschiedene Geschwindigkeiten und getrennt nach Lastkraftwagen und Personenkraftwagen vorliegen, können die Emissionen bestimmt werden.

Um die Emissionen rasterquadratweise ermitteln zu können, werden die Straßenabschnitte in Teilstücke zerlegt, die jeweils innerhalb eines Rasterquadrats liegen. Die Kantenlänge eines solchen Quadrates ist variabel wählbar zwischen 1 und 5 km.

Die Länge des jeweiligen Teilstückes eines Straßenabschnittes, multipliziert mit der Zahl der Fahrzeuge auf diesem Teilstück und mit den zugehörigen Emissionsfaktoren ergibt die Emissionen.

Ergebnisse

Die folgenden Bilder zeigen vorläufige Ergebnisse für Baden-Württemberg aus den oben angeführten Berechnungen.

Die Abb. 1 und 2 zeigen eine zusammenfassende Darstellung aller SO_2 - und NO_x -Emissionen der Sektoren Industrie, Haushalte, Kleinverbraucher und Verkehr für Baden-Württemberg während der TULLA-Meßkampagne. Die Werte basieren auf Hochrechnungen aus den bisher ausgewerteten Daten. Auf der x-Achse sind dabei die Stunden ab Beginn der Meßperiode dargestellt.

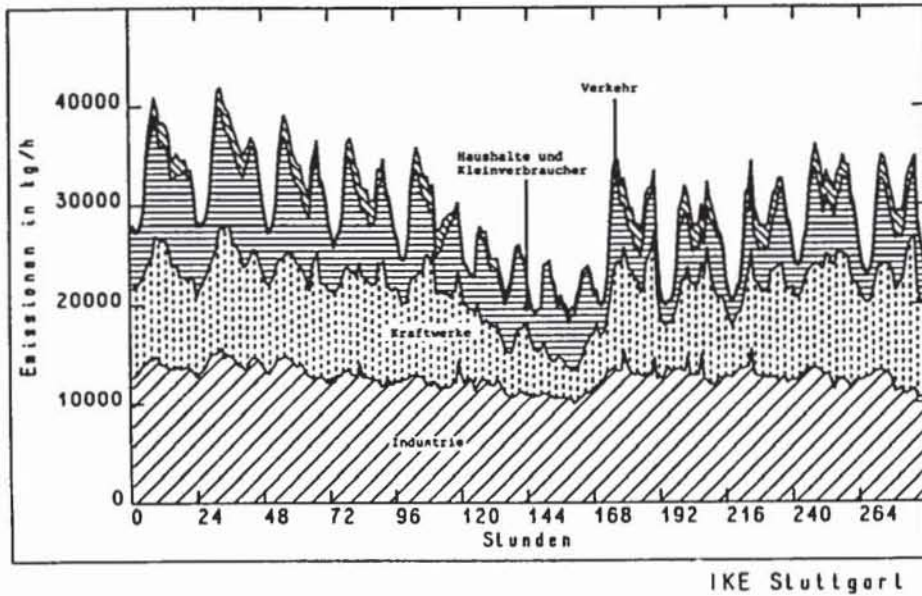


Abb. 1: SO₂-Emissionen in Baden-Württemberg vom 18.3. bis 29.3.1985

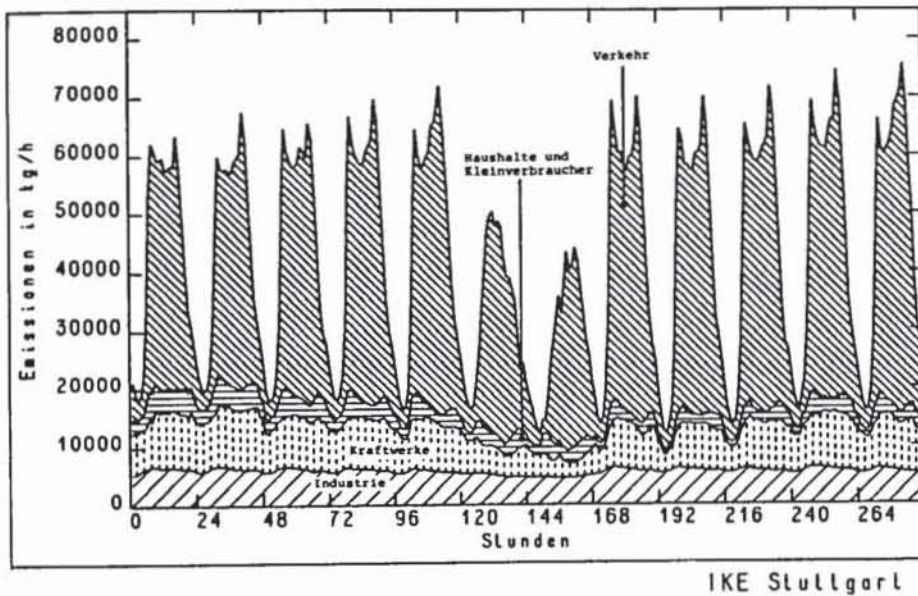


Abb. 2: NO_x-Emissionen in Baden-Württemberg vom 18.3. bis 29.3.1985

Beim Sektor Industrie sind die Schwankungen der stündlichen Emissionen gering. An Werktagen liegen die Minima ca. 10 % unter den Tagesmaxima. Der minimale Wert (am Samstag) liegt um ca. 35 % unter dem maximalen Wert am Dienstag, den 19.3., 8.00 - 9.00 Uhr.

Bei den öffentlichen Kraftwerken sind die Schwankungen etwas stärker, der minimale Tageswert liegt meist 30 - 40 %, im Extremfall bis zu 65 % unter dem Tagesmaximum. Durch den Probetrieb des neuen Blocks 7 in Karlsruhe kommt es zu Emissionsspitzen. Auffällig ist der starke Abfall der Emissionen am Wochenende.

Bei den Haushalten und Kleinverbrauchern liegen die Tagesminima (nachts zwischen 2 und 4 Uhr) um etwa 50 bis 70 % unter dem Tagesmaximum.

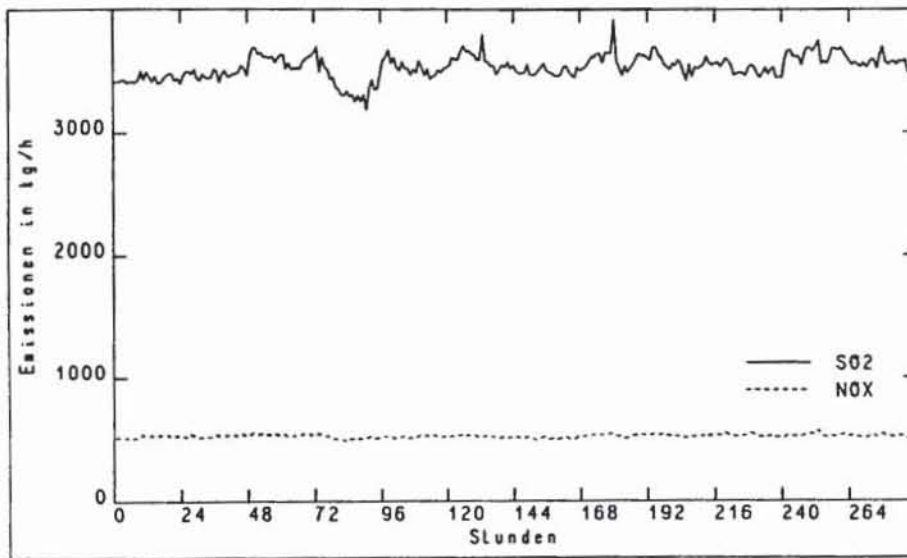
Beim Verkehr treten extreme Schwankungen auf. Die minimalen stündlichen Emissionen betragen nur etwa 4 - 5 % der Maximalwerte. An Wochenenden sind die Emissionen deutlich reduziert. Zu erkennen ist ebenfalls der Witterungseinfluß auf die Anzahl der fahrenden Fahrzeuge, denn zu Beginn der Meßperiode fiel Schnee, die Werte der Emissionen nehmen von Montag bis Freitag zu. Die niedrigsten Emissionen entstanden in der Nacht von Samstag, 23.3. auf Sonntag, den 24.3.85. Sie betragen ca. 1 % der maximalen stündlichen Emissionen, welche am Freitag, den 29.3.85 stattfanden.

Die höchsten SO₂-Gesamtemissionen aller Sektoren entstanden am Dienstag, 19.3., ca. 8.00 Uhr mit 40 t SO₂ pro Stunde. Beim NO_x wurde der höchste Wert mit über 75 t pro Stunde am Freitag, den 29.3. erreicht. An Wochenenden sind die Emissionen deutlich (um ca. 25 - 30 %) niedriger als an Arbeitstagen. Dies gilt insbesondere für die Spitzenbelastung. Die Tagesminima treten jeweils nachts (ca. 2 - 3 Uhr) auf. Dabei schwanken die NO_x-Emissionen wegen des hohen Verkehrsanteils im Tagesverlauf viel stärker als die SO₂-Emissionen. Beim SO₂ liegen die Tagesminima bei etwa 70 - 80 % der Tagesmaxima, beim NO_x sind es ca. 20 - 30 %.

Die Anteile der einzelnen Sektoren an den Gesamtemissionen während der TULLA-Meßkampagne (Mittelwert über 12 Tage) betragen (vorläufige Werte):

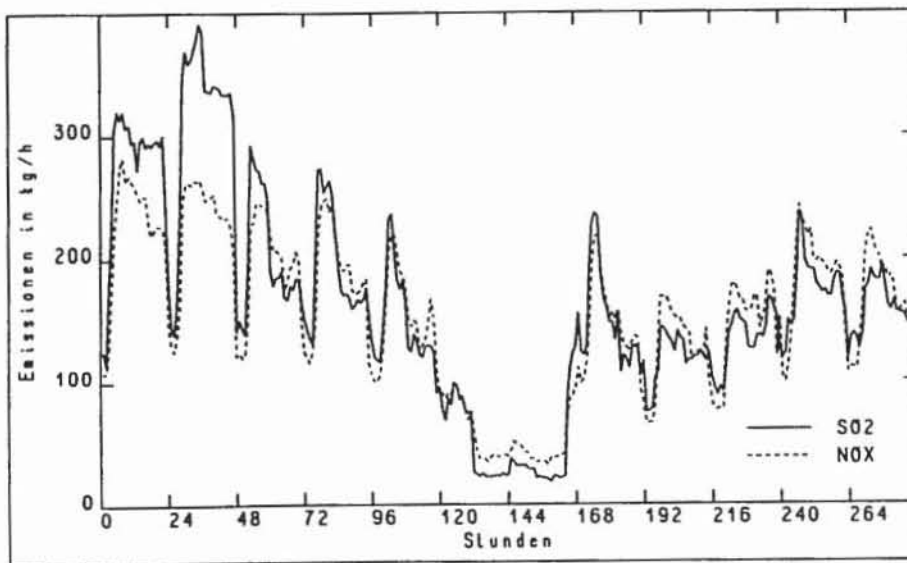
	SO ₂	NO _x
Industrie	43,2 %	13,8 %
Öff. Kraftwerke	30,9 %	17,2 %
Haushalte u. Kleinverbraucher	21,6 %	6,3 %
Verkehr	4,4 %	62,7 %

Die Abb. 3 und 4 zeigen die Emissionen zweier ausgewählter Branchen des Verarbeitenden Gewerbes. Auf der x-Achse sind wieder die Stunden von Beginn der Meßperiode an aufgetragen. In Abb. 3 ist dabei deutlich der typische Emissions-Verlauf einer Branche aus dem Grundstoff- und Produktionsgüterbereich (Papierindustrie) zu erkennen. Die Anlagen werden durchgehend betrieben, Schwankungen während der Nacht oder am Wochenende sind kaum zu erkennen. Im Gegensatz dazu zeigt die Abb. 4 für die Branche Straßenfahrzeugbau den typischen Verlauf in der Investitionsgüterindustrie. Hier ist ein deutlich ausgeprägter Tagesgang zu verzeichnen, am Wochenende werden die Anlagen meist nicht betrieben und die Raumtemperatur abgesenkt.



IKE Stuttgart

Abb. 3: Emissionen der Papierindustrie in Baden-Württemberg vom 18.3. bis 29.3.1985

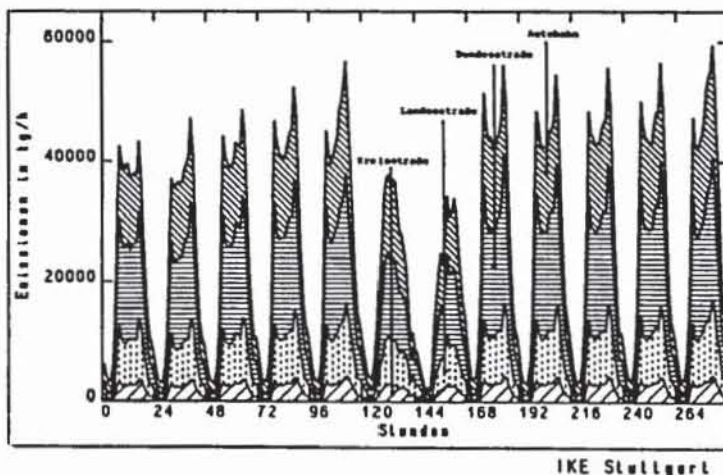


IKE Stuttgart

Abb. 4: Emissionen des Straßenfahrzeugbaus in Baden-Württemberg vom 18.3. bis 29.3.1985

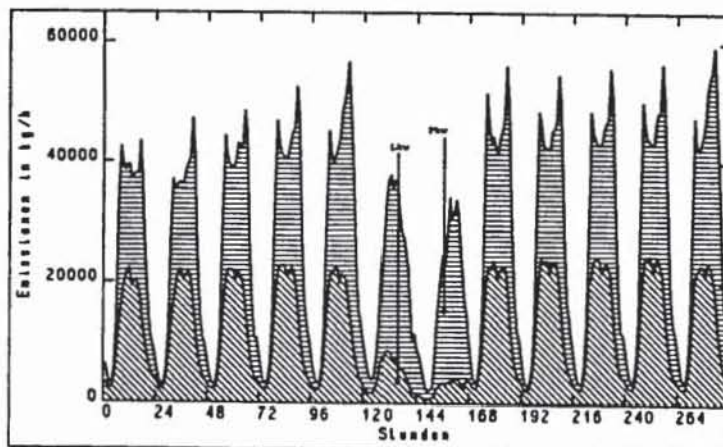
Abb. 5 zeigt als Summenkurve die Aufteilung der NO_x -Emissionen des Verkehrs auf die verschiedenen Stragentypen. Es sind kumuliert die NO_x -Emissionen der Kreisstraßen (unterste Kurve), Landesstraßen, Bundesstraßen und Autobahnen aufgetragen.

In Abb. 6 ist die Summe der Emissionen aller Kraftfahrzeuge und der Anteil der LKW-Emissionen an der Gesamtsumme zu sehen. Die untere Kurve gibt den LKW-Anteil an den stündlichen Werten wieder. Während der NO_x -Emissions-Anteil, der von den LKW stammt, die Woche über tagsüber konstant hoch ist, zeigt das sonntägliche Fahrverbot für LKW deutlich Wirkung. Zu erkennen ist auch der Einfluß des schlechten Wetters auf den PKW-Verkehr: die Emissionen der LKW sind werktags fast immer gleich hoch, die Summe aller Emissionen liegt jedoch zu Beginn der Meßperiode in den ersten Tagen deutlich unter den Emissionen der zweiten Woche der Meßperiode.



IKE Stuttgart

Abb. 5: NO_x -Emissionen des Sektors Verkehr vom 18.3. bis 29.3.1985 getrennt nach Stragentypen



IKE Stuttgart

Abb. 6: NO_x -Emissionen des Sektors Verkehr vom 18.3. bis 29.3.1985 getrennt nach Fahrzeugarten

Die Abb. 7 und 8 sollen einen Eindruck über die räumliche Verteilung der Emissionen in Baden-Württemberg vermitteln.

Abb. 7 gibt in einem fünf mal fünf Kilometer-Raster die SO₂-Emissionen der bisher erfaßten Großemittenten am Dienstag, den 19.3. zwischen 8.00 und 9.00 Uhr wieder. Deutlich sind die relativ höheren Emissionen in den Ballungsräumen Mittlerer Neckar und Karlsruhe/Mannheim zu erkennen.

DI 19.03. 8.00 BIS 9.00 UHR RASTER 5x5 KM

SEKTOR: EINZELEMITTENTEN

SO₂

- VON 0.0 - 10.0 KG / RASTER
- ▤ VON 10.0 - 25.0 KG / RASTER
- ▥ VON 25.0 - 50.0 KG / RASTER
- ▧ VON 50.0 - 100.0 KG / RASTER
- ▨ VON 100.0 - 500.0 KG / RASTER
- VON 500.0 - 4000.0 KG / RASTER

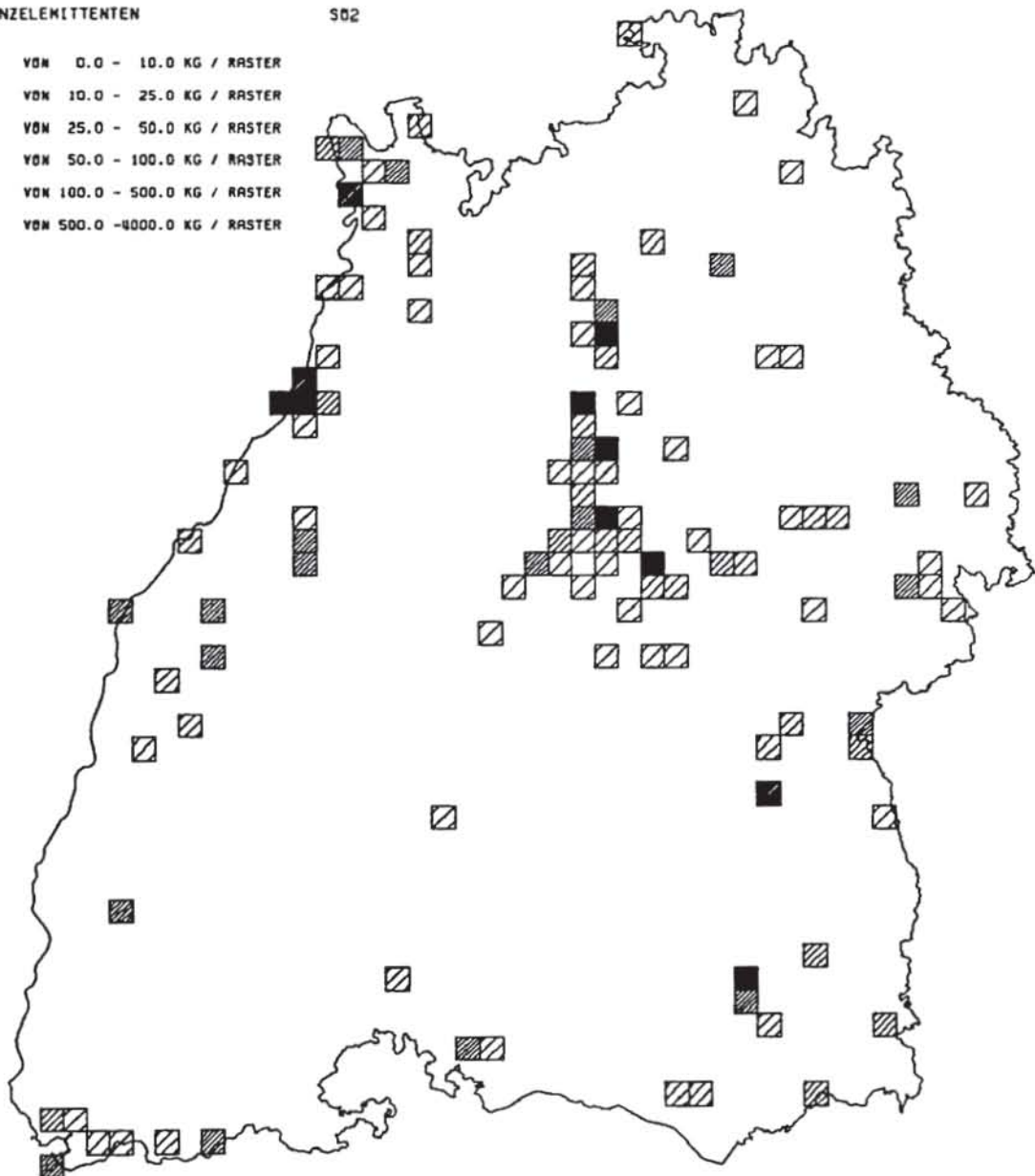


Abb. 7: SO₂-Emissionen von Großfeuerungen in Baden-Württemberg am Dienstag, den 19.3.1985, 8.00 bis 9.00 Uhr

Abb. 8 zeigt die NO_x -Emissionen des Sektors Verkehr am Freitag, den 22.3.85 von 16 Uhr bis 17 Uhr. Hohe Emissionen entstehen im Raum Mannheim-Heidelberg, die aus dem dort verhältnismäßig dichten Netz von Autobahnen stammen. Der Verlauf der Autobahnen A5 (Heidelberg - LÖrrach) und A8 (Karlsruhe - Ulm) ist ebenso erkennbar wie die A81 (Stuttgart - Heilbronn) und die A6 (Heilbronn - Wall-dorf).

FR 22.03. 16.00 BIS 17.00 UHR RASTER 5x 5 KM

SEKTOR: VERKEHR

NO_x

□	VON 0.0 - 25.0 KG / RASTER
▤	VON 25.0 - 50.0 KG / RASTER
▥	VON 50.0 - 85.0 KG / RASTER
▧	VON 85.0 - 125.0 KG / RASTER
▨	VON 125.0 - 250.0 KG / RASTER
■	VON 250.0 - 500.0 KG / RASTER

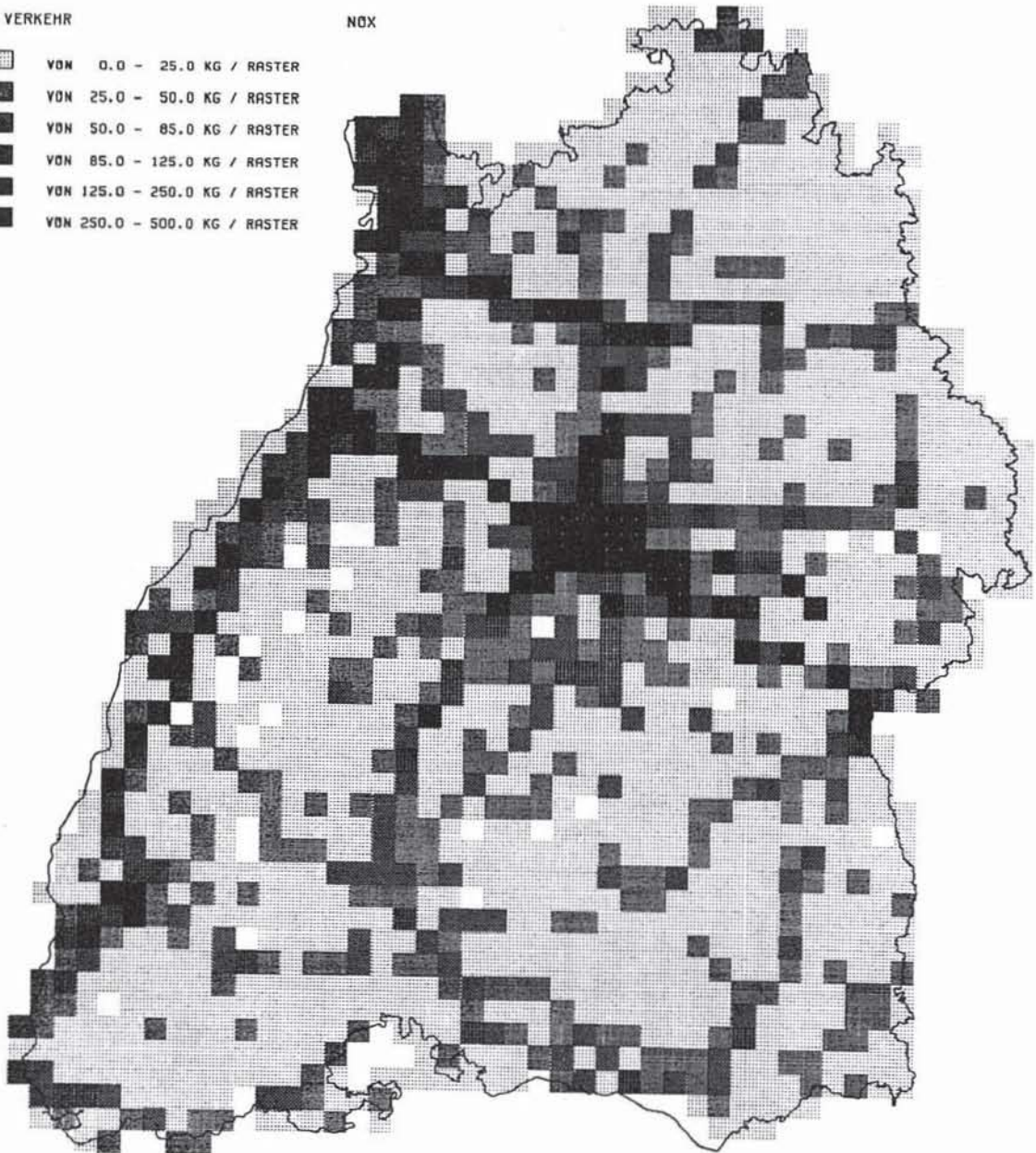


Abb. 8: Räumliche Verteilung der NO_x -Emissionen des Sektors Verkehr in Baden-Württemberg am Freitag, den 22.3.1985, 16.00 bis 17.00 Uhr