

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 33 (1992)
Heft: 2

Artikel: Zur Berechnung von Immissionsfeldern : Hinweise auf die Entwicklung eines einfachen Instruments
Autor: Feller, Waldemar
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088748>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zur Berechnung von Immissionsfeldern

Hinweise auf die Entwicklung eines einfachen Instruments

Waldemar Feller

Zusammenfassung

Mit der Entwicklung einer Transfer-Matrix zur Beschreibung des Zusammenhangs von Emissionen und Immissionen entsteht ein Instrument, das dank seiner einfachen Form für weitere Untersuchungen verwendet werden kann. Die einzelnen Matrixelemente werden mit einem Partikel-Trajektorien-Modell berechnet. Als Eingabedaten werden dabei ein Windfeld (Projekt MISTRAL) sowie ein Emissionskataster benötigt. Eine solche Matrix ermöglicht es, für ein gegebenes Emissionskataster auf eine einfache und rasche Art die zugehörigen Immissionen auszurechnen.

1 Einleitung

Luftverschmutzungen entstehen durch Emissionen von Schadstoffen durch Verkehr, Haushalte, Industrie und Gewerbe. In starker Konzentration treten die Luftschadstoffe in unmittelbarer Nähe der Quellen auf, sie können aber durch Windströmungen über mehr oder weniger grosse Distanzen transportiert und dabei verdünnt werden. Durch Deposition und chemische Reaktionen kann sich dabei ihre Konzentration weiter vermindern; durch chemische Reaktionen können allerdings auch neue Schadstoffe entstehen. Die in der Luft vorhandenen, auf den Menschen und seine natürliche Umgebung einwirkenden Schadstoffe werden als Immissionen bezeichnet.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine Korrelation zwischen Emissionen und Immissionen von Luftschadstoffen herzustellen. Mit der Entwicklung eines einfachen Instruments zur Berechnung von Immissionsfeldern soll die Möglichkeit geschaffen

Adresse des Autors: Waldemar Feller, Labor für Umwelt- und Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI

werden, auf der Emissionsseite vorgeschlagene Massnahmen auf ihre Wirksamkeit hin zu testen. Ein solches Planungsinstrument wäre ein wertvolles Hilfsmittel, um diejenigen Massnahmen zu finden, die die Erfüllung der in der Luftreinhalteverordnung festgehaltenen gesetzlichen Vorschriften auf der Immissionsseite garantieren würden.

Es werden die Schadstoffe Schwefeldioxid und Stickoxide betrachtet. Als Zielsetzung wird ein direkter Zusammenhang der Jahresmittelwerte der Emissionen und Immissionen angestrebt. Im Zentrum der Betrachtungen steht somit die räumliche Verteilung der Schadstoffe und nicht ihre zeitliche Entwicklung an bestimmten Orten.

Diese Arbeit entsteht im Rahmen des Drei-Länder-Projekts REKLIP und wird von diesem Projekt finanziell unterstützt.

2 Die Transfermatrix

Da der Zusammenhang Emissionen-Immissionen für inerte Substanzen linear ist, kann der Übergang von den Emissionen zu den Immissionen mit einer Matrixgleichung dargestellt werden:

$$\underline{c} = T * Q$$

\underline{c} = Vektor der Konzentrationen (Immissionen) an verschiedenen Punkten

T = Transfermatrix mit den Elementen für den Übergang von einem Punkt zum andern

Q = Vektor der Quellen (Emissionen) an verschiedenen Punkten

Mit den Diagonalelementen der Transfermatrix können die lokalen, "eigenen" Immissionen, mit den Nicht-Diagonalelementen die "importierten" Immissionen beschrieben werden. Sind alle Elemente dieser Transfermatrix bekannt, so ist man in der Lage, die unterschiedlich grossen Beiträge der verschiedenen Quellen zur Schadstoffkonzentration an einem bestimmten Punkt auf sehr einfache Weise zu berechnen.

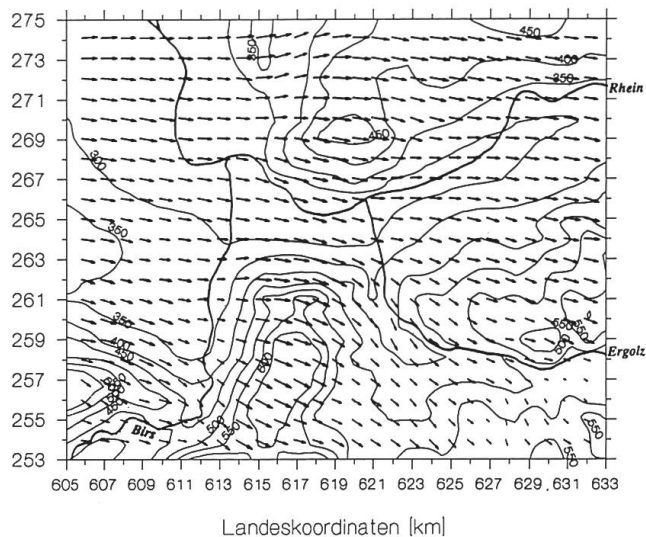
Die Matrixelemente sind Funktionen meteorologischer Grössen wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Stabilität, Turbulenzparameter sowie der Depositionsgeschwindigkeit und der Distanz.

3 Berechnung der Matrixelemente

Die Matrizendarstellung hat dank ihrer einfachen Form keine Einschränkungen in der Wahl des Modells zur Berechnung der Elemente der Transfermatrix zur Folge. Die Modellwahl wird vielmehr beeinflusst von der Grösse des zu betrachtenden Gebietes, der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie von den topographischen Verhältnissen. Meist wird die numerische Simulation mit den bekannten Gauss'schen Ausbreitungsmodellen realisiert. Diese Modelle können aber nur für Entfernungen bis zu einigen Kilometern eingesetzt werden, weil sie Inhomogenitäten der Topographie und der meteorologischen Situationen nicht berücksichtigen können.

Das in diesem Projekt zum Einsatz gelangende Modell ist ein am PSI entwickeltes Partikel-Trajektorien-Modell (*Lamprecht* 1990, 29-33), das für einige tausend Partikel die Wege bestimmt; die Geschwindigkeit einer einzelnen Partikel setzt sich aus der

Abb. 1 Berechnetes Windfeld in Bodennähe in der Umgebung von Basel am 16. August 1991, 12.00-18.00, auf der Basis von 6-h-Mittelwerten.



mittleren Windgeschwindigkeit und einer wegen der Luftturbulenz fluktuierenden Geschwindigkeit zusammen. Der fluktuierende Anteil wird wiederum zweigeteilt: In eine aufgrund der Trägheit der Luftmasse korrelierte Komponente, die das Erinnerungsvermögen repräsentiert, und in eine Zufallskomponente. Mit dieser zusammengesetzten Geschwindigkeit wird für jedes Teilchen eine Trajektorie berechnet. Aus der kumulierten Aufenthaltsdauer aller Teilchen in einer bestimmten Zelle gewinnt man dann den Wert der Schadstoffkonzentration. Als Eingabegrößen benötigt das Modell neben der Angabe der drei Koordinaten und der Quellstärke einer Quelle, wobei Punkt-, Linien- oder Flächenquellen möglich sind, ein Windfeld, die meteorologischen Größen Mischungsschichthöhe, Monin-Obhukov-Länge, Rauigkeitslänge und Bodenschubspannungsgeschwindigkeit sowie die Depositionsgeschwindigkeit. Aus den meteorologischen Größen werden im Modell nach dem bekannten Schema von *S.R. Hanna* vorerst die für die numerische Simulation benötigten Geschwindigkeitsvarianzen und Lagrange'schen Zeitskalen (*Hanna* 1982, 282 ff.; *Zanetti* 1991, 198-200) berechnet. Die Geschwindigkeitsvarianzen und Lagrange'schen Zeitskalen beschreiben die Luftturbulenz und rufen daher die typische Ausbreitung von Schadstoffwolken hervor.

In Abb. 1 wurde den Isohypsen der Orographie der Umgebung von Basel ein in Bodennähe liegendes Windfeld überlagert. Dieses Windfeld wurde mit einem an der Universität Karlsruhe entwickelten dreidimensionalen, diagnostischen, massenkonsistenten Modell (*Moussiopoulos, Flassak und Knittel* 1988, 85-94) aus den Messungen von 50 in der Umgebung von Basel stationierten Windmessstationen generiert. Die Stationen wurden im Rahmen des Projekts MISTRAL aufgestellt (siehe Beitrag von *Kamber/Kaufmann* in diesem Heft; *Megariti* 1991, 6f). Zusammen mit zwei in Basel und in Wallbach stationierten Sodar-Messgeräten, die halbstündlich eine Vertikalsondierung der Windgeschwindigkeit und -richtung durchführen, liefern diese Stationen Daten mit einer sehr hohen räumlichen und zeitlichen (2.5 Min.-Mittelwerte) Auflösung. Das Windfeld wurde mit Messdaten vom 16. August 1991 (Mittelwerte für die Dauer von 12.00 bis 18.00) berechnet und hat eine Auflösung von 1 km x 1 km. An diesem Tag herrschte eine sommerliche Hochdrucklage; der grossräumige geostrophische Wind wehte allerdings von Osten nach Westen – und nicht in umgekehrter Richtung, wie man auf Grund der Abbildung vermuten würde. Das vom Modell berechnete Windfeld ändert in grösseren Höhen tatsächlich auch seine Richtung, so dass

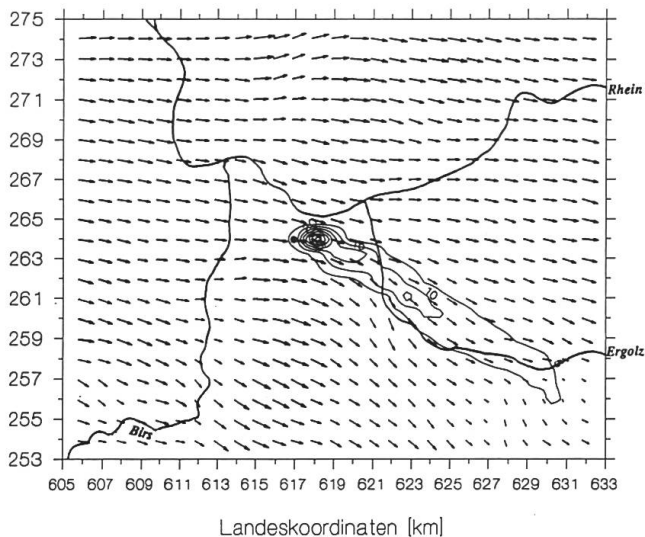


Abb. 2 Berechnete Konzentrationen einer Punktquelle mit konstanten Emissionen zwischen Pratteln und Muttenz (LK:617/264) in einer Höhe von 20 m.

eine typische Windscherung vorliegt. Diese vertikale Inhomogenität ist in der Abbildung nicht sichtbar, man erkennt dafür sehr gut die horizontalen Inhomogenitäten des Windfeldes.

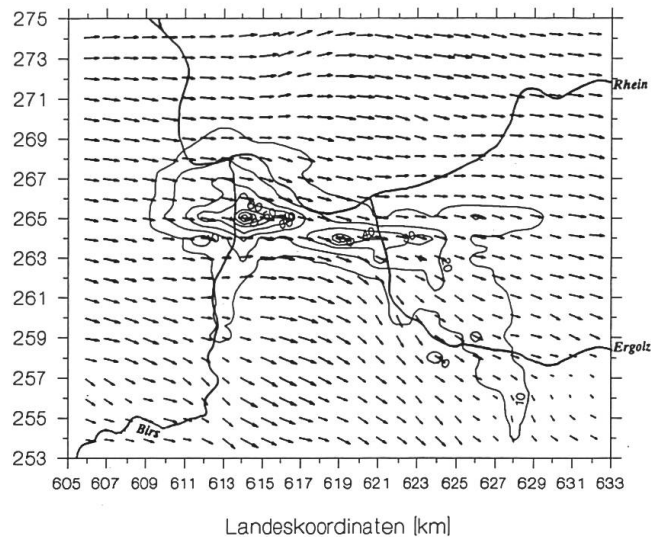
Mit diesem Windfeld wurden erste Berechnungen durchgeführt. Zuerst wurde eine Punktquelle mit konstanten Emissionen zwischen Pratteln und Muttenz (Landeskoordinaten: 617/264) in einer Höhe von 20 m über Grund placiert. Als Depositionsgeschwindigkeit wurde 0.3 cm/s (Kolar 1990, 216) eingesetzt, was dem Wert für Stickoxide entspricht. Abb. 2 zeigt die Isolinien der berechneten Konzentrationen in Bodennähe, denen zur Verdeutlichung des Ausbreitungsvorgangs das Windfeld aus Abb. 1 überlagert worden ist. Das Resultat zeigt den Kanalisierungseffekt des Ergolztales, der eine eher schwache laterale Diffusion zur Folge hat und zu einer weiterreichenden Wirkung der Punktquelle führt. Der Vorteil des Partikel-Trajektorien-Modells gegenüber dem Gauss-Modell ist an diesem Beispiel besonders gut erkennbar.

Aus dem Quotienten der verschiedenen Immissionen und der Emissionen kann nun direkt eine Spalte der Transfermatrix bestimmt werden. Führt man die analoge Rechnung mit weiteren an anderen Orten befindlichen Quellen durch, so kann man nach jeder Berechnung die dem Windfeld und der meteorologischen Situation entsprechende Transfermatrix durch eine weitere Spalte ergänzen. Es ist nicht notwendig, dass die Quellstärken der verschiedenen Emittenten im voraus bekannt sind; eine Berechnung der Transfermatrix kann auch mit Einheitsquellen durchgeführt werden, jedoch müssen alle drei Koordinaten der Quellen als Eingabegrößen vorliegen, insbesondere die Höhe über Grund. So liegt das Maximum der Konzentrationen in Abb. 2 bereits mehr als einen Kilometer östlich vom Emissionspunkt, obwohl die Höhe der Quelle über Grund mit 20 m noch nicht besonders gross ist.

4 Ausblick

Da kein einziges Windfeld genau gleich ist wie ein anderes und die Zahl der Quellen im betrachteten Gebiet sehr gross ist, müsste man eigentlich fast unendlich viele Matrizen mit sehr vielen Elementen berechnen. Das Partikel-Trajektorien-Modell hat

Abb. 3 Mit einem vorgegebenen Emissionskataster berechnete Stickoxid-Konzentrationen für die Region Basel, wobei die Isolinien die Konzentrationen in Prozenten des im betrachteten Gebiet grössten Werts angeben.



auf der einen Seite den Vorteil, die Orographie und Inhomogenitäten der meteorologischen Situationen zu berücksichtigen, ist auf der andern Seite aber auch sehr rechenintensiv: Die Aufgabe wird ohne Vereinfachungen praktisch unlösbar.

Eine erste und zugleich die bedeutendste Vereinfachung besteht darin, dass man versucht, die beobachteten Windfelder in eine überblickbare Anzahl von Windfeldklassen einzuteilen und so auf dem Computer mit relativ wenigen Rechendurchgängen den grössten Teil der möglichen Ausbreitungssituationen modellieren zu können. Diese Windfeldklassen sollen zusammen mit einer zugehörigen Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmt werden, wobei eine zusätzliche Unterscheidung nach Tages- und Jahreszeiten notwendig ist, da die Emissionen ebenfalls tages- und jahreszeitenabhängig sind.

Eine zweite Vereinfachung besteht darin, dass die Berechnungen nur für wichtige Standorte durchgeführt werden. Dazu werden Orte gezählt, an denen sich bereits jetzt schon Emittenten mit grosser Emissionsstärke befinden, aber auch solche, die in Zukunft als Standort eines grösseren Emittenten in Frage kommen könnten. Eine zusätzliche Vereinfachung ohne starke Beeinträchtigung des Resultats könnte das Zusammenlegen von mehreren Quellen an einen gemeinsamen Standort liefern. Diese Frage steht in engem Zusammenhang mit der räumlichen Auflösung, die die Berechnungen haben sollen.

Eine dritte Vereinfachung besteht darin, dass das Rechenprogramm genauer auf die Bedürfnisse der Fragestellung angepasst wird. Da keine hohe zeitliche Auflösung, wie zum Beispiel die Bestimmung von Kurzzeitspitzen der Konzentrationen an einzelnen Orten, berechnet werden soll, sondern ein Zusammenhang für Jahresmittelwerte mit grösserem Ausbreitungsbereich angestrebt wird, soll versucht werden, den Zeitschritt für die Berechnungen zu vergrössern und so den Rechenaufwand zu verkürzen.

Sobald die Windfeldklassen vorliegen, und die wichtigsten Emissionspunkte festgelegt sind, können die Matrixelemente berechnet werden. Zu jeder Matrix gehört ein bestimmtes Windfeld. Die Transfermatrix und ihr Windfeld haben daher die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit, so dass aus diesen Matrizen durch gewichtete Mittelung eine Transfermatrix für Jahresmittelwerte bestimmt werden kann.

Mit den einzelnen Transfermatrizen besitzt man ein Instrument, das zwar eine sehr zeitaufwendige Entwicklung hinter sich hat, in der Anwendung aber sehr einfach und rasch einsetzbar ist.

Wie bereits erwähnt, lässt das Modell auch beliebige Emittentenkombinationen zu. So kann ein vorliegendes Emittentenfeld verwendet werden, wobei die Anzahl Partikel für jede Quelle der jeweiligen Quellstärke angepasst werden. Wiederum werden einige Tausend Trajektorien bestimmt, die Partikel haben in diesem Fall aber unterschiedliche Startpunkte. Diese Berechnung führt jedoch nicht zur Bestimmung einer Transfermatrix, da man dabei nur die Gesamtkonzentration an einem bestimmten Punkt, nicht aber die Anteile der verschiedenen Quellen an dieser Gesamtkonzentration erhält. Eine solche Berechnung kann also bei dieser Fragestellung höchstens als Vergleichsrechnung zur Bestätigung anderer Resultate herangezogen werden. Abb. 3 zeigt als Beispiel eine mit einem Emissionskataster für Stickoxide (*Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG EWI* 1989, 31 ff. und Anhang A) durchgeführte Berechnung. Als Grundlage diente das gleiche Windfeld wie oben. Die Konzentrationen sind jedoch nicht als Absolutwerte, sondern in Prozenten des im betrachteten Gebiet grössten Werts angegeben, da mit Ausnahme des Windfeldes exakte Angaben über vom Modell verlangte meteorologische Eingabegrössen fehlten.

Literatur

- Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG 1989. *Untersuchungen der Schadstoffbelastung mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen*. Im Auftrag des Lufthygieneamts beider Basel. Liestal.
- Hanna, S.R. 1982. Applications in air pollution modelling. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*, chapter 7. F.T.M. Nieuwstadt, H. van Dop (eds.), Reidel, Dordrecht, 253-310.
- Kolar, J. 1990. *Stickstoffoxide und Luftreinhaltung*. Berlin.
- Lamprecht, R. 1990. Modelling of Air Pollution Dispersion with a Monte Carlo Diffusion Model, *PSI General Energy Technology Newsletter* 1989, 29-33. Villigen-PSI.
- Megariti, V. 1991. *The MISTRAL Network in the Basel Area*. REKLIP-Arbeitsbericht CH-3. Villigen-PSI.
- Moussiopoulos, N., Flassak, Th., Knittel, G. 1988. A refined diagnostic wind model, *Environ. Software*, 3(2), 85-94.
- Zanetti, P. 1991. *Air Pollution Modelling*. New York.