

erschienen in: **Immissionsschutz** - Zeitschrift für Luftreinhaltung, Lärmschutz, Anlagensicherheit, Reststoffverwertung und Energienutzung
S. 148 - 153, 4/2004, Erich Schmidt Verlag, Berlin

Übertragung von punktuellen Luftschadstoffmesswerten auf die Fläche – Modul IMMIKART Teil 1 und Teil 2 des Fachinformationssystems IMMIKART-GIS für die Immissionssituation im Freistaat Sachsen

A. Moldenhauer¹, H. Lorentz¹, Th. Becker², U. Wolf³, A. Lohmeyer¹

Einleitung

Auf der Grundlage des § 12 der 22. BImSchV unterrichtet das Land Sachsen, ebenso wie die anderen Bundesländer, die Öffentlichkeit über die aktuelle Immissionssituation in Sachsen. Grundlage der herausgegebenen Daten sind Punktwerte an ca. 30 über das ganze Land verteilt Messstationen.

Seit 1999 wird von der Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG im Auftrag des Sächsischen Landesamts für Umwelt und Geologie (LfUG) das Fachinformationssystem „IMMIKART-GIS“ entwickelt, welches Auskunft über die Luftschadstoffsituation in ganz Sachsen gibt.

IMMIKART-GIS ist unter dem Geografischen Informationssystem (GIS) ArcGIS™ der Firma ESRI™ ansteuerbar. Die Kompatibilität auch zu anderen GIS-Systemen ist durch die Datenhaltung im Geo-Format „Shape“ von ESRI, welches von den meisten GIS-Systemen verarbeitet werden kann, gegeben.

Das o. g. Fachinformationssystem soll ermöglichen, dass auch Aussagen zur Luftschadstoffbelastung für Bereiche getroffen werden können, in denen keine Messdaten vorhanden sind. Es ist modular aufgebaut und beinhaltet unter anderem folgende Module:

- **Modul IMMIKART Teil 1:** ein auf Messwerten basierendes statistisch-empirisches Verfahren zur Übertragung der o. g. punktuellen Messwerte statistischer Kenngrößen (Jahresmittelwerte und 98-Perzentilwerte) auf die Fläche (Rasterauflösung: 2.5 km * 2.5 km).

¹ Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul

² Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Physische Geographie Mitteleuropa

³ Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Bereich Luft, Lärm und Strahlen, Dresden

- **Modul IMMIKART Teil 2:** ein Verfahren, welches ebenfalls der Übertragung der o. g. punktuellen Messwerte statistischer Kenngrößen (Jahresmittelwerte und 98-Perzentilwerte) auf die Fläche (Rasterauflösung: 2.5 km * 2.5 km) dient und aus einer Kombination aus o. g. statistisch-empirischen Vorgehen und Ausbreitungsrechnungen mit dem Ausbreitungsmodell LASAT unter Zuhilfenahme von Emissionen aus dem Emissionskataster Sachsen besteht.

Diese Module sind im LfUG zum Teil seit Jahren erfolgreich im Einsatz. Unter der Adresse http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/luft-laerm-klima_212.html sind im Internet die jeweils aktuellen Immissionsrasterkarten für Sachsen dargestellt. Im Folgenden werden die o. g. beiden Module zur Übertragung der punktuellen Messwerte auf die Fläche näher beschrieben. Hinweis: Ziel dieser beiden Verfahren ist nicht die Berechnung der Belastung am Straßenrand oder in Straßenschluchten, sondern die Ausweisung der Belastungen als Mittelwerte über Rasterflächen einer Größe von 2.5 km * 2.5 km. Für die Berechnungen am Straßenrand oder in Straßenschluchten existieren zusätzliche Module, die im Folgenden jedoch nicht näher beschrieben werden.

Betrachtete Schadstoffkomponenten

In einem überwiegenden Teil des Freistaates stellt der Straßenverkehr eine bedeutsame Emissionsquelle dar, die die bodennahe Schadstoffbelastung entscheidend prägt. Aus diesem Grund werden überwiegend verkehrsrelevante Schadstoffkomponenten betrachtet. Hierzu gehören die auch im Sinne der novellierten 22. BImSchV relevanten Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub (PM₁₀) und Benzol (C₆H₆). Des Weiteren wird Ruß betrachtet, da dieser im Sinne der noch bestehenden 23. BImSchV relevant ist.

Neben den Jahresmittelwerten werden auch 98-Perzentilwerte betrachtet, bei PM₁₀ zusätzlich dazu entsprechend 22. BImSchV der Tagesmittelwert, der an 35 Tagen im Jahr überschritten wird (90.4-Perzentilwert).

Ergänzend zu den verkehrsrelevanten Schadstoffkomponenten werden im Fachinformationssystem IMMIKART-GIS sachsenweite Immissionskarten für Ozon (O₃) und Schwefeldioxid (SO₂) erstellt (jeweils Jahresmittelwerte und 98-Perzentilwerte).

Eingangsdaten

Die Programmmodule IMMIKART Teil 1 und Teil 2 des Programmsystems IMMIKART-GIS benötigen folgende Eingangsdaten:

- Immissionsmessungen an den ca. 30 sächsischen stationären Messstationen, an den Stationen des UBA sowie an den grenznahen Messstationen der angrenzenden Bundesländer und Länder (notwendig für beide Module). Überblick über alle Messstellen: siehe **Abb. 1**.

- Gegebenenfalls weitere Messdaten an temporären Messstationen (nicht zwingend erforderlich, aber bezüglich Aussagesicherheit für beide Module von Vorteil)
- Digitales Geländemodell (DGM) und digitales Landnutzungsmodell (DLM) von Sachsen mit einer Auflösung von 2.5 km x 2.5 km (notwendig für beide Module)
- Flächendeckende Emissionen des Straßenverkehrs (Hauptverkehrsstraßen und Nebenstraßen) aus dem Emissionskataster Sachsen (notwendig für Modul IMMIKART Teil 2)



Abb. 1: Überblick über alle zur Verfügung stehenden Messstationen

Schnittstellen zu bestehenden Dateninformationssystemen

Das Fachinformationssystem IMMIKART-GIS ist so konzipiert, dass es von Mitarbeitern des LfUG eigenständig angewendet werden kann. Für die Lösung routinemäßiger Aufgaben (wie beispielsweise die Erstellung von Immissionsrasterkarten für das jeweils aktuelle Jahr) muss demnach kein Gutachter von außen eingeschaltet werden. Um diesen Standard ermöglichen zu können, wurden eine Reihe leicht bedienbarer Schnittstellen geschaffen.

Die Schnittstelle zu den aktuellen Schadstoffmessdaten ist über einen modellinternen ASCII-Import geregelt. Dieser Importfilter nimmt eine erste Datenprüfung vor und fängt somit bereits vor Beginn der eigentlichen Modellierung eine Reihe von Eingabefehlern ab.

Für die Aufbereitung der Emissionsdaten aus dem Emissionskataster wurde von der TU Dresden, Institut für Verkehrsökologie im dynamischen Emissionskataster Verkehr ein Exportfilter erstellt (TU Dresden, 2003), der den Ansprüchen des Moduls „IMMIKART Teil 2“ entspricht. Mit Hilfe dieses Filters werden die von IMMIKART-GIS benötigten Emissions-Katasterdaten in Form eines Shape-Files exportiert. Dieses Shapefile wird wiederum in IMMIKART-GIS weiterverarbeitet.

Klassifikation der Messstellen

Die Messstellen im Freistaat und in den angrenzenden Ländern weisen zum Teil sehr unterschiedliche Charakteristiken auf. So existieren Stationen, die den großräumigen Hintergrund repräsentieren, die den städtischen Hintergrund repräsentieren sowie Stationen, die sich in unmittelbarer Umgebung von stark emittierenden Quellen mit z. T. eingeschränkter Durchlüftung (z. B. in Straßenschluchten) befinden. Erstgenannte Stationen repräsentieren die Hintergrundbelastung im Freiland in großer Entfernung zu starken Emissionsquellen. Die Messwerte an diesen Stationen sind deshalb für eine große Fläche im Umkreis um die jeweilige Messstelle repräsentativ. Städtische Hintergrundmessstellen weisen im Vergleich zu den großräumigen Hintergrundmessstationen in der Regel eine kleinere räumliche Repräsentativität auf. Messwerte an Stationen, die sich in unmittelbarem Nahbereich von Quellen (z. B. stark befahrene Straßen) befinden, sind zumeist nur für einen sehr kleinen Bereich repräsentativ.

Aus o. g. Gründen wurden alle Messstationen entsprechend ihrer Charakteristik in folgende insgesamt 7 Messstellenklassen eingeteilt:

- Freiland (großräumiger Hintergrund)
- Kleinstadt, geringe Emission in unmittelbarer Nähe (städtischer Hintergrund)
- Kleinstadt, starke Emission in unmittelbarer Nähe
- Kleinstadt, sehr stark befahrene Straße in unmittelbarer Nähe
- Großstadt, geringe Emission in unmittelbarer Nähe (städtischer Hintergrund)
- Großstadt, starke Emission in unmittelbarer Nähe
- Großstadt, sehr stark befahrene Straßen in unmittelbarer Nähe.

Die Einteilung erfolgte in der Regel entsprechend den NO/NO₂-Verhältnissen an den Stationen sowie entsprechend der jeweiligen Stationsbeschreibung.

Modul IMMIKART Teil 1

Dieses Programmmodul stand am Anfang der Entwicklung des Fachinformationssystems IMMIKART-GIS. Bei dessen Aufbau im Jahr 1998 kam es zunächst darauf an, einzelne Punktmesswerte mittels eines vereinfachten statistisch empirischen Algorithmus auf die Fläche zu übertragen, wobei es in diesem ersten Stadium der Bearbeitung weniger auf eine

sehr hohe Genauigkeit als vielmehr auf eine, die tatsächlichen Sachverhalte beschreibende, vernünftige Abschätzung ankam.

Das Modul IMMIKART Teil 1 beruht auf einem einfachen statistisch-empirischen Verfahren. Die Ermittlung der flächenhaften Immissionsbelastung erfolgt programmintern in folgenden 4 Schritten:

- Messwertvorbereitung
- Festlegung „virtueller Stützstellen“
- Erstellung von Basis-Immissionskarten
- Modifizierung der Basis-Immissionskarten durch verschiedene Korrekturen.

Zunächst erfolgt modellintern die Aufbereitung der gemessenen Werte. Hierzu wurden im Rahmen einer Voruntersuchung diverse Abhängigkeiten der Messwerte von bestimmten Parametern (z. B. Höhe der Messstelle über NN, umliegende Landnutzung, Nähe starker Quellen u. ä.) aufgezeigt, wobei die Werte jeweils getrennt nach den o. g. Messstellenklassen betrachtet wurden.

Alle Messstationen, die sich in unmittelbarem Nahbereich von starken bis sehr starken Emissionsquellen (in Sachsen zumeist Straßen) befinden, werden mehr oder weniger von diesen beeinflusst. So ist in der Regel die NO₂-Konzentration an einer Verkehrsmessstelle größer als an einer Messstelle, die den städtischen Hintergrund erfasst, bei Ozon ist dies umgekehrt. Aufgrund der unmittelbaren Beeinflussung dieser Messstellen durch starke lokale Emittenten sind diese in der Regel nicht für 2.5 km * 2.5 km große Flächen repräsentativ. Um solche Messdaten trotzdem für das Verfahren nutzbar zu machen, werden diese Messdaten um den mittleren Beitrag der jeweils nahegelegenen Emissionsquelle korrigiert. Die so angepassten Messwerte der Verkehrsmessstellen gehen dann gleichberechtigt mit den anderen städtischen Hintergrundmessstationen in das Verfahren ein.

Danach werden die Messdaten (ebenfalls entsprechend Ergebnissen aus Datenvorauswertungen) einer sog. Höhenkorrektur unterzogen. Diese ist aus statistischen Gründen notwendig, um vertikale Trends bei der Mittelwertbildung zu beseitigen. Am Ende des Verfahrens wird diese Korrektur wieder rückgängig gemacht.

Kleinstädten, die eine Größe von einer Rasterfläche (2.5 km * 2.5 km) oder mehr aufweisen und in denen keine Immissionsmessungen durchgeführt werden, werden modellintern „virtuellen Stützstellen“ zugeordnet, welche die Mittelwerte an den vorhandenen städtischen Hintergrundmessstationen zugeordnet bekommen. Die nachfolgend beschriebenen Prozeduren zur Übertragung der Messwerte auf die Fläche sehen diese „virtuellen Stützstellen“ ebenso als Messstelle an wie diese, an denen tatsächlich gemessen wurde. Dies bewirkt, dass sich

die Kleinstädte, die o. g. Bedingungen erfüllen, in den Immissionskarten mit den mittleren Belastungen vergleichbarer Städte wieder finden.

Zum Verfahren zur Übertragung der Messwerte auf die Fläche werden ebenfalls modellintern jeder Messstellenklasse Repräsentativitätsradien zugeordnet, die für Freilandstationen deutlich größer sind als für städtische Messstationen. Letztgenannte Stationen (einschließlich der o. g. Stützstellen in Kleinstädten, die im Folgenden auch als Messstationen bezeichnet werden), weisen einen inneren und einen äußeren Radius auf. Außerhalb des äußeren Radius bestimmen hauptsächlich die Messwerte der Freilandstationen das Immissionsbild (Umlandwerte). Diese Umlandwerte jeder städtischen Messstation werden als entfernengewichtetes Mittel aller Freilandstationen berechnet, deren Repräsentativitätsradien in das jeweils betrachtete Stadtgebiet hinein reichen. Innerhalb des inneren Radius wird eine konstante Konzentration entsprechend des Messwertes festgelegt.

Mit Hilfe der jeweils gemessenen Stadtkonzentrationen und dem zugehörigen Umlandwert wird ein neuer Wert definiert, der im folgenden als „Abklingwert“ bezeichnet wird. Dieser Konzentrationswert wird für den Bereich zwischen innerem und äußerem Radius von Stadtstationen bestimmt. Er ist abhängig von der Entfernung zu diesen beiden Radien. Auf dem inneren bzw. äußeren Radius nimmt dieser Wert den gemessenen Stadtwert bzw. den ermittelten Umlandwert an. Zwischen beiden Radien wird angenommen, dass der Abklingwert vom inneren zum äußeren Radius linear in Abhängigkeit von der Entfernung zum inneren Radius zu- (z. B. bei Ozon) bzw. abnimmt (z. B. bei NO₂).

Das Verfahren zur Ermittlung der Basis-Immissionskarten erfolgt dann rasterweise, wobei zunächst für jede 2.5 km * 2.5 km große Raster ermittelt wird, innerhalb welcher Radien der Messstationen sie sich befindet. Die Schadstoffwerte aller Raster außerhalb von inneren und äußeren Stadtradien werden als entfernengewichtetes Mittel aller Freiland-Messwerte, in deren Repräsentativitätsradien sich das jeweilige Raster befindet, berechnet. Befindet es sich innerhalb mindestens einem inneren Radius einer Stadtstation, wird ihr der entfernengewichtete Mittelwert aller Stadtstationen zugewiesen, in deren inneren Radien die Rasterfläche platziert ist. Befindet sich das betrachtete Raster innerhalb mindestens einem äußeren Radius einer Stadtstation, dann wird ihr der Mittelwert aller Abklingwerte von Stadtstationen, in deren äußerem Radius sich das Raster befindet, zugeordnet.

Abschließend werden verschiedene Korrekturen der berechneten Basis-Immissionsdaten in Verbindung mit Sekundärdaten [Höhenlage, Anteil emissionsprägender Landnutzungen (Siedlung, Großstadt, Wald) und Anteil Wald] vorgenommen, u. a. wird die oben geschilderte Extrapolation auf ein einheitliches Höhenniveau wieder rückgängig gemacht. Dies erfolgte für jeden Schadstoff differenziert entsprechend den Ergebnissen der Datenvorauswertung, vorliegenden Messergebnissen von Immissionskatastern verschiedener sächsischer Städte (wie zum Beispiel Dresden, Chemnitz, Leipzig und Aue), Erfahrungswerten und Literaturdaten.

Die **Abb. 2** zeigt als Beispiel die Immissionskarte für den Ozon-Jahresmittelwert in Sachsen im Jahr 2002.

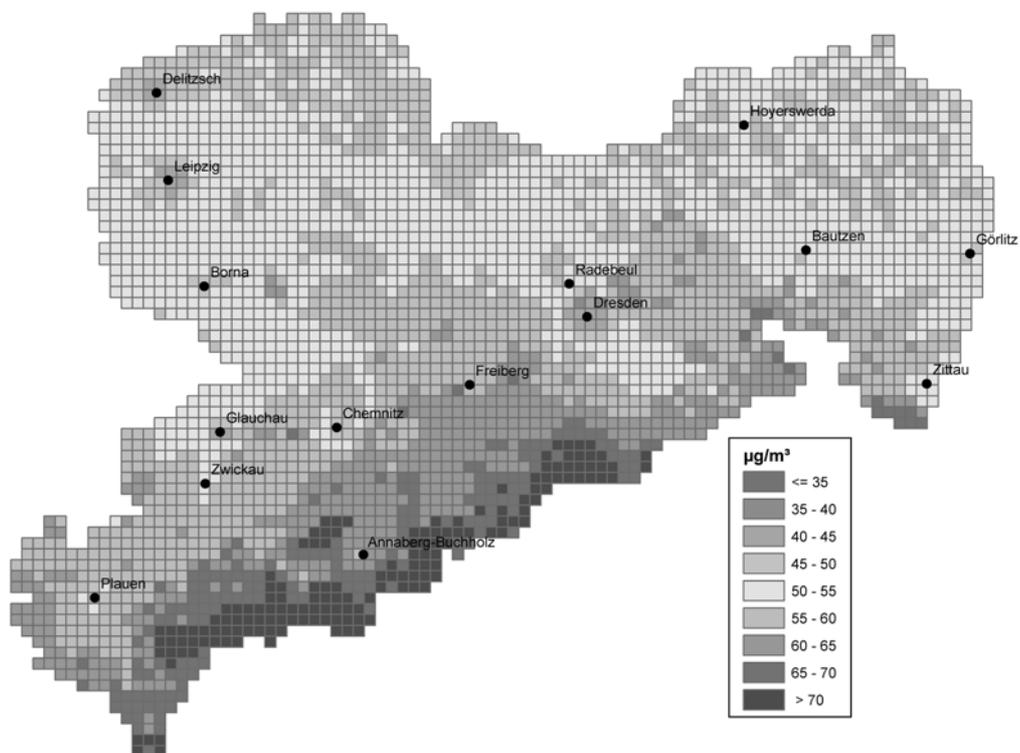


Abb. 2: Immissionsrasterkarte für den Ozon-Jahresmittelwert in Sachsen im Jahr 2002 berechnet mit dem Fachinformationssystem IMMIKART-GIS, Modul IMMIKART Teil 1

Der Vorteil der dem Modul IMMIKART Teil 1 zugrunde liegenden Methodik besteht darin, dass mit relativ wenig Eingangsinformationen Immissionsrasterkarten berechnet werden können. So werden beispielsweise keine Angaben zu Emissionsmengen benötigt. Gleichzeitig kann bei Bedarf ohne großen Aufwand die Messwertdatei um zusätzliche Messstellen oder um Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen erweitert werden. Die Unsicherheiten des Verfahrens liegen darin, dass horizontale Variationen der Emissionen nur sehr pauschal (über die Landnutzung) in die Berechnungen eingehen. Außerdem findet die charakteristische Windverteilung in Sachsen keine Berücksichtigung (Repräsentativitätsbereiche sind für die Messstellen gleicher Messstellenklasse immer gleich und kreisförmig). Des Weiteren beruhen die dem Verfahren zugrunde liegenden Zusammenhänge z. T. auf fachlichen Erfahrungen des Programmierstellers und fachliche Annahmen.

Das Modul IMMIKART Teil 1 wird in der aktuellen Version des Fachinformationssystems IMMIKART-GIS für die Berechnung der Immissionskarten für die Schadstoffkomponenten SO₂ und O₃ (jeweils Jahresmittelwert und 98-Perzentilwert) angewendet. Dabei kommen bei der Anwendung auf SO₂-Messwerte einige Vereinfachungen zum Tragen, da anhand der aktuellen Messwerte dieser Schadstoffkomponente in Sachsen keine Abhängigkeit von der

Höhe und von der Lage der Messstelle in Bezug auf Quellen zu verzeichnen ist. Deshalb werden bei SO₂ alle Stationen wie großräumige Hintergrundmessstationen behandelt.

Zu Beginn der Entwicklung von IMMIKART-GIS wurden auch die NO₂-Karten auf o. g. Weise berechnet. Letztgenannte Schadstoffkomponente wird jedoch inzwischen durch die im Folgenden beschriebene detaillierte Methodik unter Zuhilfenahme von Ergebnissen aus Ausbreitungsrechnungen abgedeckt.

Modul IMMIKART Teil 2

Im Rahmen der Fortschreibung des Fachinformationssystems IMMIKART-GIS des Freistaates Sachsen erfolgte eine Erweiterung auf die Schadstoffe Benzol, Ruß und PM₁₀. Für diese Schadstoffe bot sich die o. g. Vorgehensweise entsprechend Modul IMMIKART Teil 1 nicht an, da dafür die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte zu gering ist. Außerdem wurde im Rahmen von Datenvoranalysen festgestellt, dass an den stark von umliegenden Emittenten beeinflussten Messstationen sehr unterschiedliche Belastungen auftreten. Dies bedeutet, dass sich der den Stationen nahe liegende Verkehr individuell sehr verschieden auf die Belastungen an der Station auswirkt. Die Individualität einzelner Messstellen ist demnach für die hier zu betrachtenden Schadstoffe deutlich größer als beispielsweise für die im Modul IMMIKART Teil 1 betrachteten SO₂-Werte. Deshalb ist es ohne weiterführende aufwändige Untersuchungen für die hier zu betrachtenden Schadstoffe nicht möglich, den unmittelbaren Verkehrsanteil von den Messwerten zu separieren, da er für jede Station stark verschieden ist. Deshalb konnten nur städtische und großräumige Hintergrundmessstationen in die Ermittlung der Immissionskarten einbezogen werden.

Aus diesem Grund wurde eine alternative Vorgehensweise entwickelt, die den in diesem Fall zu betrachtenden Schadstoffkomponenten angepasst wurde (Modul IMMIKART Teil 2).

Das Modul IMMIKART Teil 2 arbeitet programmintern folgende Arbeitsschritte ab:

- Ermittlung der großräumigen Vorbelastung aus Messdaten
- Ermittlung der stadtbedingten Zusatzbelastung aus Messdaten
- Sachsenweite Ausbreitungsrechnung mit LASAT für die Quellgruppe Verkehr (Grundlage: Emissionsdaten aus dem Emissionskataster Sachsen)
- Anpassung Rechenwerte an die Messwerte
- Ermittlung des 90.4-Perzentilwertes für PM₁₀

Die Ermittlung der großräumigen Vorbelastung erfolgt analog zum Modul IMMIKART Teil 1 für jedes betrachtete Untersuchungsrastrer mittels entfernengewichteter Mittelwertbildung aus den Messwerten an den Freilandstationen. Die so berechneten Werte entsprechen an den betrachteten Messstationen in den Städten den Umlandwerten.

Die stadtbedingte Zusatzbelastung (abgeleitet aus Messdaten) wurde an den sächsischen Hintergrundmessstationen ermittelt. Sie ergibt sich aus der Differenz der dort gemessenen Belastung und des für die jeweilige Station berechneten Umlandwertes. Diese stadtbedingte Zusatzbelastung entsteht u. a. durch Emissionen der Quellgruppe Verkehr, aber auch andere typische Quellgruppen in der Stadt (z. B. Industrie, Hausbrand) tragen zu dieser Zusatzbelastung bei.

Zur Bestimmung der Luftschadstoffzusatzbelastung infolge Quellgruppe Verkehr wird das Lagrange'sche Ausbreitungsmodell LASAT (Janicke, 2003) angewendet. Im diesem Verfahren werden unter Einbeziehung der Auftretenshäufigkeit aller möglichen Fälle der meteorologischen Verhältnisse (Wind- und Ausbreitungsklassenstatistik sowie vom Modell berechnete dreidimensionale Windfelder) für jedes Rastervolumen (= Rasterfläche x Rasterhöhe) die auftretenden jahresmittleren Zusatzimmissionen berechnet. Das verwendete Ausbreitungsmodell ist in der Lage, sämtliche berücksichtigte Flächenquellen des sächsischen Emissionskatasters Verkehr gleichzeitig mit ihrer jeweiligen Emission emittieren zu lassen. Diese Emissionen sind für die Zusatzbelastung im Untersuchungsgebiet verantwortlich. Die in die LASAT-Berechnungen eingehenden Emissionen des sächsische Emissionskatasters werden vor der Übergabe an LASAT durch IMMIKART-GIS um die nichtmotorbedingten Emissionen infolge Abrieb¹ und Aufwirbelung² für PM10 bzw. infolge Reifenabrieb für Ruß ergänzt. Dies erfolgt bezüglich PM10 entsprechend Lohmeyer (2001) und bezüglich Ruß entsprechend Rauterberg-Wulff (1999a und 1999b). In Zukunft sollen auch die nichtauspuffbedingten Partikelemissionen im Emissionskataster Verkehr integriert werden. Dazu läuft derzeit ein Forschungsprojekt.

An den städtischen Hintergrundmessstationen werden die mit LASAT berechneten jahresmittleren Zusatzbelastungen mit denjenigen (ebenfalls jahresmittleren) Zusatzbelastungen verglichen, die aus den Messdaten ermittelt wurden. Für jede Station wird der Quotient aus Messung und Rechnung bestimmt. Für die Erstellung der Immissionskarten für die betrachteten Schadstoffkomponenten werden zunächst die Ergebnisfelder von LASAT mit diesem Quotienten der für alle Raster gleich ist, multipliziert. Danach wird die großräumige Vorbelastung hinzuaddiert. Das entstehende Konzentrationsfeld spiegelt innerhalb der Städte die auftretende Belastung außerhalb des unmittelbaren Nahbereiches der Quellen wider.

Um die gemessenen Freilandwerte mit dem Modell richtig wiederzugeben, wird für die Raster, die außerhalb von Städten liegen, eine neue Vorbelastung berechnet, die sich aus den Messwerten an den Freilandstationen jeweils verringert um den dortigen korrigierten LASAT-

¹ Abrieb: Partikelablösungen, die infolge Reibung entstehen. Man unterscheidet u. a. Straßen-, Kupplungs- und Bremsbelagabrieb.

² Aufwirbelung: Mechanisches Hochwirbeln von auf der Straße liegenden Staubpartikeln durch vorbei fahrende Fahrzeuge.

Rechenwert ergibt. Diese Werte werden auch hier als entfernungsgewichteter Mittelwert ermittelt.

Ergebnis dieses Vorgehens sind flächendeckende Immissionskarten für ganz Sachsen.

Der Vorteil der dem Modul IMMIKART Teil 2 zugrunde liegenden Methodik besteht darin, dass die Emissionen des Straßenverkehrs, die einen Hauptteil zur Zusatzbelastung in Sachsen beitragen, explizit in die Bestimmung der Immissionsrasterkarten eingehen. Des Weiteren werden die Windverhältnisse in Sachsen bei der Berechnung berücksichtigt. Somit spiegeln sich beispielsweise die großen Autobahnen in den Immissionskarten wider, was beim statistisch empirischen Verfahren nicht möglich ist. Auch die Ausprägung von Ballungsräumen (z. B. im Oberen Elbtal rund um Dresden) ist mit dieser Methodik genauer erfassbar als mit IMMIKART Teil 1 (siehe auch Beispiel in **Abb. 3**).

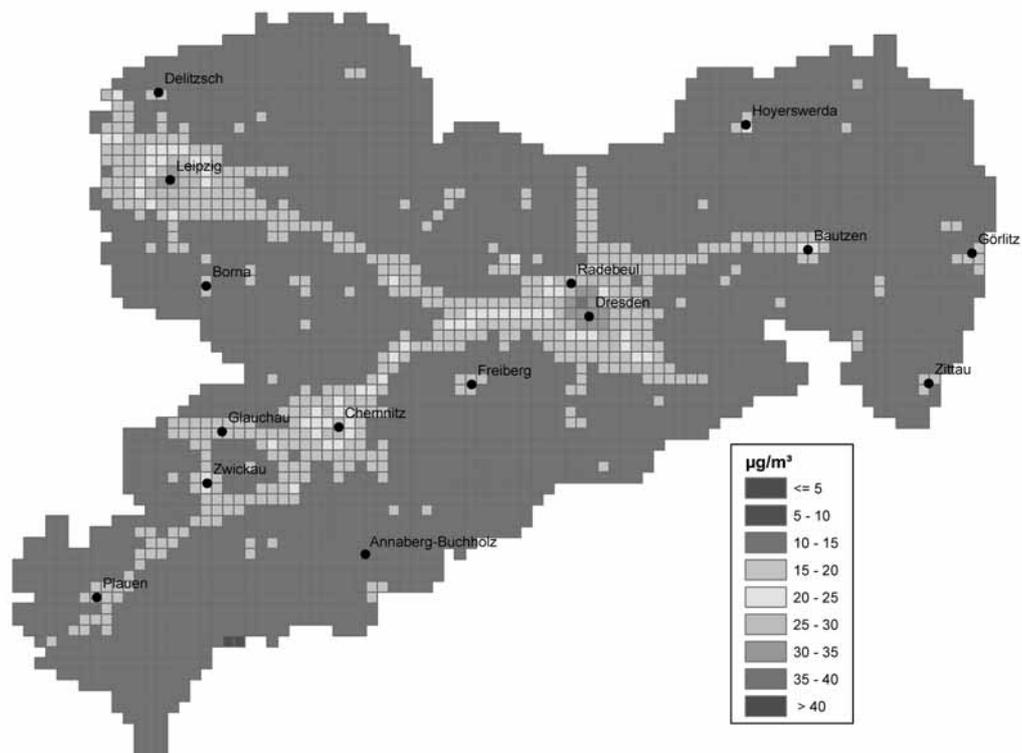


Abb. 3: Immissionsrasterkarte für den NO₂-Jahresmittelwert in Sachsen im Jahr 2002 berechnet mit dem Fachinformationssystem IMMIKART-GIS, Modul IMMIKART Teil 2

Gleichzeitig kann wie bereits bei Modul IMMIKART Teil 1 bei Bedarf ohne großen Aufwand die Messwertdatei um zusätzliche Messstellen oder um Ergebnisse von weiteren Ausbreitungsrechnungen erweitert werden. Die Unsicherheiten des Verfahrens liegen darin, dass das dem Verfahren zugrunde liegende diagnostische Windfeldmodell aus LASAT die Windgeschwindigkeiten in den Gebirgslagen unterschätzt, so dass dort eher zu hohe Konzentrationen berechnet werden. In diesen Bereichen befinden sich jedoch auch weniger Emittenten,

so dass in diesem Bereich das Konzentrationsfeld überwiegend durch die dortigen Messdaten bestimmt wird. Die Aussagen für die sächsischen Ballungsräume (Leipzig, Chemnitz und Dresden) sind davon nicht betroffen, da diese sich nicht im Gebirge befinden. Des Weiteren wird bei der Ermittlung der Immissionsrasterkarten nur die Quellgruppe Verkehr beachtet. Für die Einbindung weiterer Quellen ist die Datenlage im Emissionskataster Sachsen zur Zeit noch nicht ausreichend. Durch eine Anpassung der berechneten Konzentrationen an die gemessenen Immissionswerte wird der durch die fehlenden Emittenten erhaltene Fehler im Mittel ausgeglichen. In Zukunft ist eine Erweiterung der betrachteten Emittentengruppen vorgesehen.

Nachteil des Verfahrens ist, dass die Zahl der Messdaten, mit deren Hilfe die Angleichung der Ausbreitungsrechnung an die Gegebenheiten vor Ort erfolgt, nur auf Hintergrundmessstationen begrenzt ist, deren Zahl relativ gering ist.

Validierung von Modul IMMIKART Teil 2 an einem Beispiel

Die Prüfung der berechneten Immissionsrasterkarten wird im Folgenden für ein Beispiel [NO₂-Karten für den Jahresmittelwert, ermittelt mit dem Modul IMMIKART Teil 2] dargelegt. Dabei werden die Messwerte an den sächsischen Hintergrundmessstationen mit den berechneten Werten an eben diesen Stationen verglichen, wobei zunächst alle Messdaten bei der Modellierung berücksichtigt werden und in einem zweiten Schritt die jeweils betrachtete Station bei der Ermittlung der Immissionsrasterkarten nicht berücksichtigt wird. Letzteres Verfahren wird als Kreuzvalidierung bezeichnet. Das Ergebnis ist in **Tab. 1** dargestellt.

Station	Immissionswerte für NO ₂ im Jahresmittel [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Messwert	Berechnete Werte	
		Ohne Kreuzvalidierung	mit Kreuzvalidierung
Collmburg	13,5	13,5	13,5
Delitzsch	23,3	18,4	16,7
Dresden-Mitte	30,5	35,8	36,8
Hoyerswerda	17,5	19,3	19,7
Leipzig-West	21,1	27,2	28,7
Mittelndorf	13,7	13,5	13,3
Radebeul-Wahnsdorf	18,2	15,4	18,2
Schwartenberg	12,6	12,7	13,0
Zinnwald	12,8	14,3	15,1
Zittau-Ost	15,5	18,0	18,3

Tab. 1: Gemessene und mit Modul IMMIKART Teil 2 berechnete NO₂-Jahresmittelwerte an den sächsischen Hintergrundmessstationen im Jahr 2002 unter Berücksichtigung der jeweiligen Station bei der Modellierung (Spalte „ohne Kreuzvalidierung“) bzw. ohne Berücksichtigung derselben (Spalte „mit Kreuzvalidierung“). Die Freilandmessstationen sind grau hinterlegt, die städtischen Stationen weiß.

Ein Vergleich der alleinigen Konzentrationswerte zwischen Messung und Rechnung ergibt bei beiden Varianten eine überwiegend gute Übereinstimmung. Ein objektivere Einschätzung erlauben die im Folgenden beschriebenen weiteren Betrachtungen.

Im Ergebnis der Kreuzvalidierung wird der mittlere quadratische Fehler oder auch MSE (Mean Square Error) ermittelt. Die Berechnung des MSE erfolgt über die folgende Gleichung.

$$MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T [M_{i,t} - \hat{R}_{i,t}]^2 \right) \quad [1]$$

N = Anzahl der Messstationen

$M_{i,t}$ = gemessener Wert an der Messstation $i=1, \dots, N$ zum Zeitpunkt $t=1, \dots, T$

$\hat{R}_{i,t}$ = berechneter Ergebniswert an der Messstation $i=1, \dots, N$ zum Zeitpunkt $t=1, \dots, T$

Da das Modul IMMIKART Teil 2 auf die Berechnung von statistischen Kenngrößen ausgerichtet ist, liegt nur jeweils ein Mess- und Ergebniswert pro Messstation vor (im betrachteten Beispiel der NO₂-Jahresmittelwert im Jahr 2002). Dadurch vereinfacht sich die Gleichung 1 auf die im Folgenden dargestellte Gleichung 2, wobei der hier dargestellte MSE der Varianz v entspricht. Die Wurzel aus der Varianz entspricht wiederum der Standardabweichung σ .

$$MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [M_i - R_i]^2 \quad [2]$$

M_i = gemessener Wert an der Messstation $i=1, \dots, N$

R_i = berechneter Ergebniswert an der Messstation $i=1, \dots, N$

Die Anwendung auf den hier betrachteten Fall ergibt folgende Ergebnisse (siehe **Tab. 2**):

Schadstoff	Stationen	MSE in $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2]$	MRA in [%]	σ in $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$
NO ₂	10	15,85	14,03	3,98

Tab. 2: Mittlerer quadratischer Fehler (MSE) und Mittlere Relative Abweichung (MRA) bei der Kreuzvalidierung für den NO₂-Jahresmittelwert (Verfahren: IMMIKART Teil 2)

Das Modul IMMIKART Teil 2 weißt im Rahmen der Kreuzvalidierung bei der Berechnung der Immissionsrasterkarten für den NO₂-Jahresmittelwert einen mittleren relativen Fehler von ca. 14 % (bei einer Standardabweichung von ca. 4 $\mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$) auf. Dies liegt innerhalb der Fehlerspannweite von Ausbreitungsmodellierungen (siehe hierzu z. B. Schädler et al., 1996) und ist demnach akzeptabel.

Weiterführende Arbeiten (für das Verfahren IMMIKART Teil 1 sowie für weitere Schadstoffkomponenten) sind bei Becker (2004) dokumentiert.

Ausblick

Das Fachinformationssystem IMMIKART-GIS befindet sich weiterhin im Ausbau, u. a. wurde bereits ein zusätzliches Modul integriert, welches die Abschätzung der Schadstoffbelastungen an Außerortsstraßen in Sachsen ermöglicht. In der Entwicklungsphase befindet sich das Modul IMMIKART-Ballungsräume (Berechnung von Luftschadstoffkonzentrationen an innerstädtischen Straßennetzen u. a. unter Berücksichtigung der Randbebauung), welches dem LfUG als Werkzeug zur Luftreinhalteplanung zunächst für die Ballungsräume Leipzig und Dresden dienen soll.

Des Weiteren ist in Zukunft geplant, die Emissionen weiterer Quellgruppen (z. B. Industrieanlagen oder landwirtschaftliche Quellen) in das Modul IMMIKART Teil 2 einzubinden.

Literatur

22. BImSchV (2002): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte). In BGBl I Nr. 66 vom 17.09.2002, S.3626
- Becker, T. (2004): Interpolationsverfahren für die Übertragung umweltmeteorologischer Parameter auf die Fläche. Überblick über verfügbare Systeme, Sensitivitätsstudie und Anwendungsprogrammierung für das System IMMIKART-GIS in ArcGIS. Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Geograph. TU Dresden, 7. Januar 2004.
- Janicke (2003): Ausbreitungsmodell LASAT. Referenzbuch zu Version 2.12. Ingenieurbüro Dr. Lutz Janicke. Dunum, September 2003.
- Lohmeyer (2001): Validierung von PM10-Immissionsberechnung im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Feinstaubausbildung von Straßen. Ingenieurbüro Dr.-Ing. Achim Lohmeyer, Radebeul. Projekt 2286C, Juni 2001. Gutachten im Auftrag von: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, Berlin und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden. Herunterladbar unter www.Lohmeyer.de/literatur.htm
- Schädler, G., Bächlin, W., Lohmeyer, A. und van Wees, T. (1996): Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. Forschungsbericht FZKA-PEF 138, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. In: Berichte Umweltforschung Baden-Württemberg.
- Rauterberg-Wulff, A. (1999a): Determination of Emission Factors for Tire Wear Particles up to 10 µm by Tunnel Measurements. Paper presented at 8 International Symposium Transport and Air Pollution, Graz, Österreich 31. Mai - 2. Juni 1999.
- Rauterberg-Wulff, A. (1999b): Beitrag des Reifen- und Bremsenabriebs zur Rußemission an Straßen. Fortschrittsberichte des VDI, Reihe 15: Umwelttechnik Nr. 202.
- TU Dresden (2003): Entwicklung einer Schnittstelle zur Datenübergabe ausgewählter Ergebnisse des Emissionskatasters aus IMMIKART zur weiterführenden Immissionsberechnung. TU Dresden, Institut für Verkehrsökologie.