

## **Urban climate modeling (UCM):**

### **Modellierung verkehrlicher Immissionsbelastungen**

## **Einführung in die Ausbreitungsmodellierung**

### **1 Einleitung**

Für die Erfassung, Analyse und Überwachung der Luftschadstoffbelastungen werden Messverfahren, Windkanal-Experimente und Modellrechnungen eingesetzt. Der Einsatz von Modellen wird sich in Zukunft weiter steigern, da die Erfassung von Messdaten und die experimentelle Ermittlung von Daten einen wesentlich höheren zeitlichen und finanziellen Aufwand erfordert. Über den Einsatz von Modellen wird zudem die Durchführung von Simulationen, z.B. für Planungsvarianten, oder die Prognose von zukünftigen Situationen möglich. Im Gegensatz zu Messdaten können darüber hinaus flächendeckende Daten generiert werden. Die Qualität der Modelle ist recht gut. Dennoch unterliegt die Anpassung der Modelle an den aktuellen Stand der Forschung zur Zeit einer sehr dynamischen Entwicklung.

Die vorliegende Einführung in die Ausbreitungsmodellierung bezieht sich auf die Modellierung von Verkehrsemissionen und –immissionen. Für vertiefte und weiterführende Informationen zur Ausbreitungsmodellierung sei insbesondere auf ZENGER (1998) und HELBIG et al (1999) verwiesen.

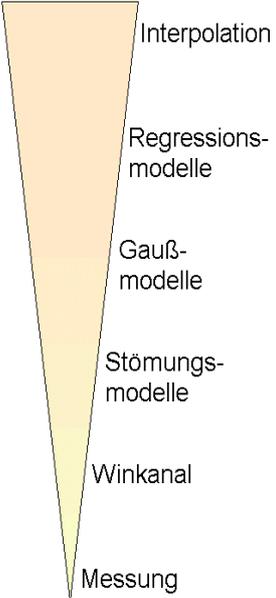
### **2 Angepasste Methoden in verschiedenen Skalenebenen**

Je nach Problemstellung, Zielsetzung, räumlicher Ausdehnung und Datenverfügbarkeit werden einfache statistische Modelle oder physikalisch sehr anspruchsvolle Modelle eingesetzt. Entsprechend der Anwendung bzw. den Anforderungen benötigen die Modelle sehr unterschiedliche Rechenzeiten. In Verbindung mit dem Modelltyp variiert zudem der Datenbedarf und die räumliche und zeitliche Auflösung der Ein- und Ausgabedaten. Im Mesoscale liegt die zu bearbeitende Gitterweite im Bereich von mehreren Dekametern bis hin zu einigen Kilometern. Für die Behandlung kleinräumiger Fragestellungen wird im mikroskaligen Bereich bis zu einer Auflösung von wenigen Metern gearbeitet.

Das im Lehrbaustein UCM verwendete, auf dem Merkblatt für Luftverunreinigungen an Straßen (MLuS) (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (HRSG.) 2002) basierende Modell ist als Screeningmodell einzustufen. Für genauere Abschätzungen, d.h. bei höheren zeitlichen und/oder räumlichen Auflösungen, werden wesentliche aufwendigere Modelle eingesetzt (siehe dazu HELBIG et al 1999, ZENGER 1998). Damit ist vom Screeningmodell auf der Basis der MLuS ein Skalensprung zur meso- oder mikroskaligen Immissionmodellierung notwendig. Neben den bei MLuS genannten Daten gehen dann weitere wesentliche Einflussfaktoren und Modellkomponenten in die Berechnung ein. So werden in einigen Modellen z.B. der Kaltstartanteil der Fahrzeuge, die aktuelle Witterung, das aktuelle räumlich differenzierte Windfeld, die Gebäudestruktur und eine nach Tagesgang, Jahresgang und Wochengang differenzierte Verkehrszusammensetzung berücksichtigt.

Die Modelle unterscheiden sich somit in Bezug auf das Rechenprinzip und die Datenanforderungen. Eine Einordnung in eine auf Maßstabsebenen basierende Modellhierarchie ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Angepasste Methoden in verschiedenen Skalenebenen

Skalenebene	Modelle	Modellhierarchie
Nationale Ebene	Räumliche Interpolation von Messdaten (z.B. über Kriging) oder statistische Modelle (z.B. Regressionsanalyse).	
Regionale Ebene	Einfache Ausbreitungsmodelle (Screening, grobe Abschätzung), einfache Verwendung / Einsatz mit geringen Anforderungen an die Eingabedaten und die Rechenkapazität (MLuS).	
Mittlere Ebene	Empirische Modelle, z.B. Ausbreitungsrechnungen auf der Basis des Gaußmodells (PROKAS).	
Lokale Ebene	Numerische and pyhsikalische Modelle, mit hohen Anforderungen bezüglich der Eingangsdaten und der Rechenkapazitäten, zusätzlich mit Modulen zur Berechnung chemischer Umwandlung etc. (MISKAM, LASAT) oder Daten aus dem Windkanal und Messungen.	

Als Beispiel für eine Berechnung im mikroskaligen Bereich ist in Abbildung 2 eine Berechnung mit dem numerischen Modell MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) dargestellt. MISKAM ist ein dreidimensionales, nicht-hydrostatisches Strömungs- und Ausbreitungsmodell. In der Abbildung sind die Gebäude als Blockmodelle dargestellt. Der Farbverlauf zeigt deutlich die Lage der stark befahrenen und daher stark emittierenden Hauptverkehrsstraßen.

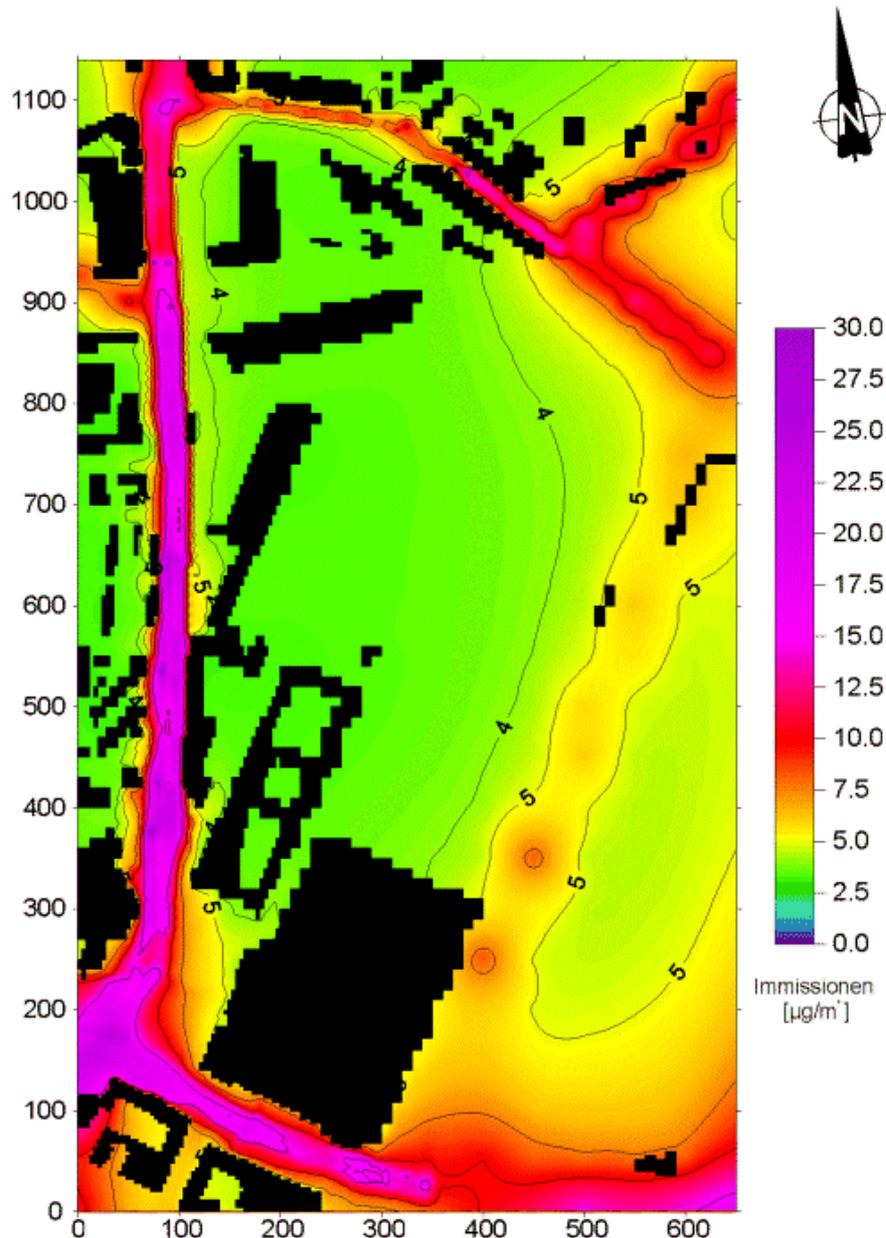


Abbildung 1: Benzol - Gesamtbelastung (Jahresmittelwerte) im Gebiet des Projektes Stuttgart 21 (Berechnet mit MISKAM).

Quelle: BLAZEK et al 1998

### **3 Ausbreitungsmodellierung mit MLuS**

Das Modell MLuS (Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen, FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (HRSG.) 2002) dient der rechnerischen Abschätzung der Schadgasbelastung an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung. Das Verfahren ermöglicht die Berechnung der Jahresmittelwerte und der 98-Perzentile für die Schadstoffe Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffmonoxid (NO), Blei (Pb), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Russpartikel (PM).

Für exakte Berechnungen sind weitergehende Rechenmodelle einzusetzen. Dennoch können die mit diesem Modell gewonnenen Immissionswerte als sogenannte Orientierungswerte im Rahmen der planerischen Abwägung zur Beurteilung der Luftqualität herangezogen werden.

Zur Abschätzung der Schadstoffbelastungen muß die Kausalbeziehung Emission - Transmission - Immission nachgebildet werden. Hierzu werden sogenannte Ausbreitungsmodelle verwendet. Einflußgrößen für diese Modelle sind:

- Emissionen
- Umwandlung und Deposition
- Luftaustauschbedingungen

Als Eingangsgrößen gehen in die Berechnung der Schadstoffbelastungen an Straßen insbesondere die folgenden Daten ein:

- Verkehrsdaten: Verkehrsaufkommen (DTV und Lkw-Anteile), Fahrverhalten und Emissionsfaktoren
- Meteorologische Daten: Windströmung und Ausbreitungsbedingungen
- Geometrischen Randbedingungen: Streckenverlauf und Topographie

#### **3.1 Emissionsmodellierung**

Emissionsdaten bilden die Basis für die Immissionsberechnungen der Luftschadstoffe. Im Modul UCM werden die Emissionen auf der Basis der MLuS mit

Stand 1996 (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (HRSG.) 1996) berechnet. Dies entspricht nicht der in der aktuellen Version der MLuS (Stand 2002) angewendeten Vorgehensweise, war aus Gründen der Implementierung im vorliegenden Modul jedoch notwendig. Die Modellversion in der Ausgabe von 1996 basiert auf Emissionswerten des Jahres 1990. Zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung gehen in das Modell sogenannte Reduktionsfaktoren ein (in fünf-Jahres-Schritten von 1990 bis 2010).

Die Berechnung der Luftschadstoffemissionen erfolgt für alle Streckenabschnitte unter Berücksichtigung von Daten zu Streckenlänge, DTV, Lkw-Anteil und den mittleren Geschwindigkeiten. Für die Anpassung der Berechnung an die sich im Lauf der Jahre verändernde Fahrzeugflotte gehen die bereits genannten Reduktionsfaktoren in das Modell ein. Berechnet wird die spezifische Abgasmenge pro Kilometer. Für die Berechnung der Emissionsfaktoren (in g/km) sind die folgenden Daten notwendig:

- streckenbezogene Daten zum DTV
- streckenbezogene Daten zum Lkw -Anteil (in %)
- streckenbezogene Daten zur Pkw- und Lkw -Geschwindigkeit (in km/h)

Dieses Berechnungsverfahren entspricht nicht dem aktuellen Stand des Wissens und ist daher nur für stark vereinfachte Screeningverfahren einsetzbar. Verbesserte Grundlagendaten können insbesondere auf der Basis des Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (UMWELTBUNDESAMT (UBA) (HRSG.) 1999) erstellt werden.

### **3.2 Immissionsmodellierung**

Die Immissionen werden, ausgehend von den Emissionen des Straßenverkehrs, mit Hilfe eines Screeningverfahrens auf der Basis der MLuS berechnet. Das Modell MLuS ist ein empirisches Modell, bei dem die Abklingfunktionen einzelner Schadstoffe in Abhängigkeit von der Entfernung aus Messungen festgelegt werden. Das Modell dient der groben Abschätzung der Immissionsbelastungen und ist im Rahmen des Lehrmoduls UCM auf die Berechnungen der Schadstoffe NO<sub>x</sub> und Russ reduziert.

Das Modell nach MLuS beinhaltet zwei bedeutsame Einschränkungen:

- Mit dem Modell sind lediglich die Belastungen 200m links und rechts der Straße zu berechnen.
- Die Berechnung ist zudem nur für Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung gültig.

Weitere Randbedingungen des Modells sind:

- Verkehrsstärken über 5000 Kf/24 h
- Geschwindigkeiten über 50 km/h
- Längsneigung der Straße unter 6 %
- Zwei und mehr Fahrstreifen

Für die Berechnung von Immissionsbelastungen an Straßen mit dichter Randbebauung wurden Korrekturfaktoren angelehnt an STRASSER (1979) eingebaut. Das Modell berechnet die streckenbezogenen Immissionswerte (in  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) für die Entfernungen 1, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 und 200m von der Straße. Für die Bewertung werden zudem die Bereiche mit Grenzwertüberschreitungen (Grenz-, Vorsorge- und Zielwert) für jeden einzelnen Schadstoff berechnet. Die Datenanforderungen des Modells sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Datenanforderungen zur Immissionsmodellierung mit MLuS

Emissionsdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DTV-Wert [Kfz/24h] für jeden Streckenabschnitt</li> <li>• Lkw-Anteil [%] für jeden Streckenabschnitt</li> <li>• Emissionsfaktoren (NO<sub>x</sub> und Russ): Pkw [g/km]</li> </ul>
Meteorologische Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund [m/s]</li> <li>• Prozentsatz von Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit unter 3 m innerhalb eines Jahres [%]</li> </ul>
Daten zur Vorbelastung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strecken- bzw. gebietsspezifische Vorbelastung in <math>\text{mg}/\text{m}^3</math></li> </ul>
Geometriedaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Streckenverlauf</li> </ul>

Mit Hilfe des Modells können die Jahresmittelwerte und 98-Perzentile der bodennahen Konzentration (Zusatzbelastung) für die genannten Schadstoffe berechnet werden. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit vom Abstand  $s$  vom Fahrbahnrand. Mit Hilfe der in Formel 1 dargestellten Gleichung kann die bodennahe Konzentration  $K_i(s)$  für einen beliebigen Immissionsort in 1,5 m Höhe und im Abstand  $s$  vom Fahrbahnrand berechnet werden. Für die detaillierte Darstellung des Modells sei an dieser Stelle nochmals auf die Seminarunterlagen und die Veröffentlichung zur MLuS (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (HRSG.) 2002) hingewiesen.

Formel 1:

$$K_i(s) = K_i^* \times g(s) \times f_{vi} \times f_u$$

mit

- $K_i^*$  ... bodennahe Bezugskonzentration am Fahrbahnrand
- $g(s)$  ... Ausbreitungsfunktion der Schadstoffe
- $f_{vi}$  ... Funktion zur Berücksichtigung verkehrsspezifischer Daten
- $f_u$  ... Funktion zur Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit

Bei der Berechnung der Stickstoffdioxid-Konzentration wird ein leicht abweichendes Verfahren angewendet. Während des Ausbreitungsvorgangs der Abgase wird Stickstoffmonoxid teilweise in Stickstoffdioxid umgewandelt. Daher läßt sich die für die inerten Schadstoffe geltende Abklingfunktion hier nicht anwenden. Das Modell zur Berechnung der NO<sub>x</sub>-Konzentration basiert auf statistischen Regressionsansätzen. Da Stickstoffdioxid nicht direkt vom Fahrzeug emittiert wird, werden die Immissionen auf der Basis der Feldmessungen und Korrekturfaktoren auf Basis des DTV ermittelt. Eine Unterscheidung bezüglich der der Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeiten wird nicht vorgenommen.

### 3.3 Berechnung der Gesamtbelastung

Die lufthygienische Gesamtbelastung setzt sich aus den beiden Komponenten Vorbelastung und Zusatzbelastung zusammen (Abbildung 2). Die Zusatzbelastung wird aus dem betrachteten Straßennetz, den darauf fließenden Verkehrsströmen

und den Emissionsfaktoren berechnet. Die Vorbelastung setzt sich aus dem nicht berücksichtigten Verkehr sowie den Belastungen aus Hausbrand und Industrie zusammen. Im Merkblatt MLuS sind dazu typische Vorbelastungswerte enthalten. Alternativ können die Vorbelastungswerte gebietsspezifische auch aus anderen Daten ermittelt werden. So kann beispielsweise aus den in der Folge genannten Datenebenen über Regressionsanalysen ein regionalisierter Datensatz erstellt werden:

- Werte eines Emissionskatasters bzw. eines Immissionsmessnetzes
- Daten zur Bevölkerungs- und Arbeitsplatzdichte
- Daten zur Landnutzung und Straßendaten
- Meteorologische Daten insbesondere zur Windgeschwindigkeit, Inversionshäufigkeit und zum Kaltluftabfluß

Die Vorbelastung geht in Form von drei auf Basis der Landnutzung differenzierten Vorbelastungstypen in das Modell ein:

- geringe Vorbelastung: Freiflächen und Waldgebiete mit geringen Vorbelastungen
- mittlere Vorbelastung: Siedlungsflächen mit mittlere Vorbelastung
- hohe Vorbelastung: Gewerbe- und Industriegebiete mit hoher Vorbelastung

Zusätzlich kann im Lehrmodul UCM die Vorbelastung in Form von drei Belastungsstufen (gering, mittel, hoch) variiert werden. Hiermit können die oben dargestellten räumlich differenzierten Vorbelastungen auf unterschiedliche Belastungsniveaus eingestellt werden.

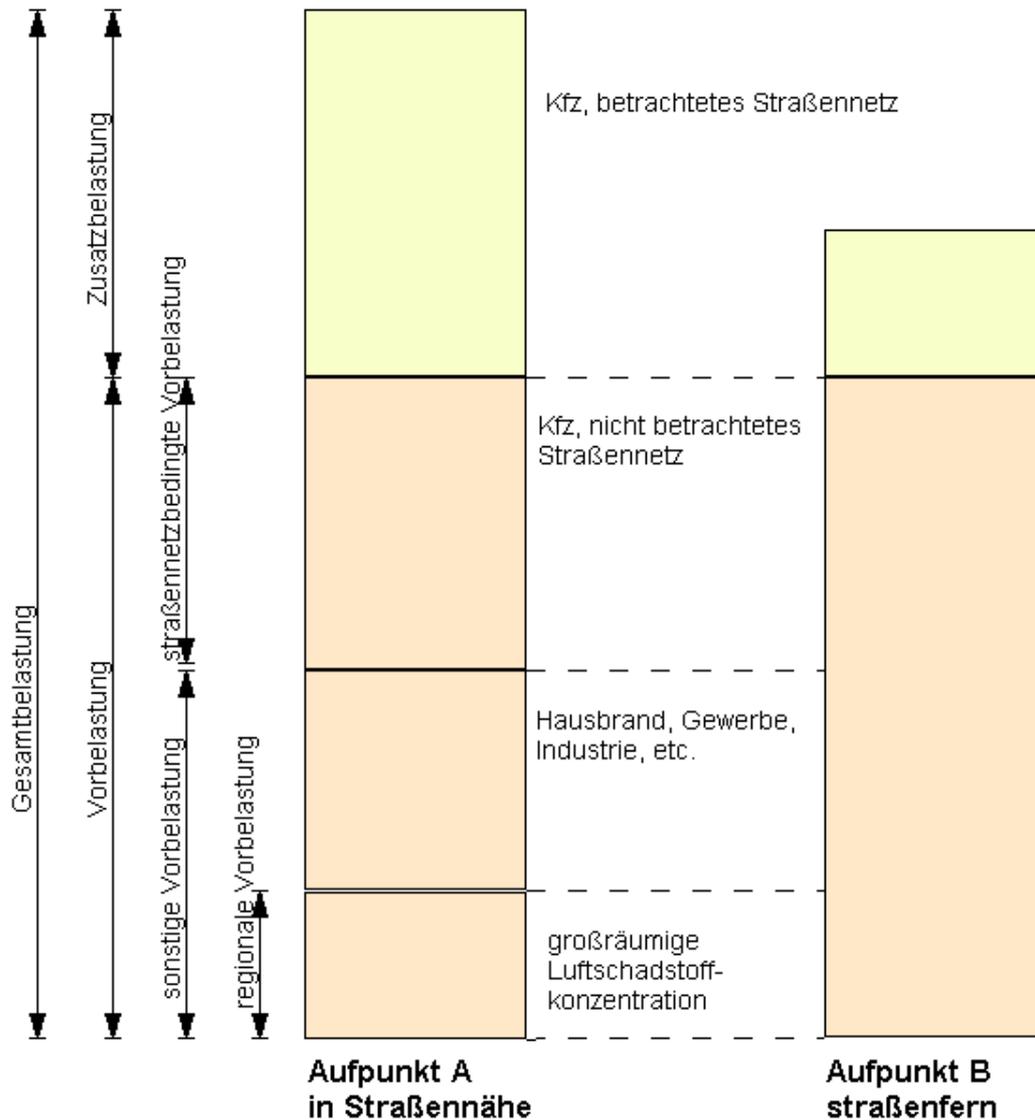


Abbildung 2: Zusammensetzung der Gesamtbelastung

Quelle: eigene Darstellung, nach FLASSAK 1996

## 4 Begriffe

### Ausbreitungsklassen

Beschreiben die dynamische Stabilität der Atmosphäre. Ausbreitungsklassen werden z.B. nach den Vorgaben der TA-Luft (TA LUFT 1986) aus meteorologischen Parametern wie Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad und Sonnenstand berechnet.

### Bezugsjahr

Das Jahr, für welches die Emissionsfaktoren eines Fahrzeugkollektives erhoben wurden.

### Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke (DTV)

Auf alle Tage des Jahres bezogener Mittelwert der einen Straßenquerschnitt täglich passierenden Fahrzeuge in Kfz/24h.

### Emissionsfaktoren

Emissionen eines einzelnen Pkw bzw. Lkw durchschnittlicher Beschaffenheit in g/km. Die Emissionsfaktoren sind insbesondere von der Fahrzeugkategorie (Pkw, Lkw, Busse, Mofas, etc.), vom Bezugsjahr und der Verkehrssituation abhängig. Zusätzlich können auch Straßensteigungen sowie Kaltstartzuschläge berücksichtigt werden. Die aktuellen Emissionsfaktoren sind dem UBA-Handbuch (UMWELTBUNDESAMT (UBA) (HRSG.) 1999) zu entnehmen.

### Gesamtbelastung

Immissionsbelastung, die sich aus der Vorbelastung und der Zusatzbelastung durch die Straße ergibt.

### Grundkonzentration

siehe Vorbelastung

### Immission

Luftverunreinigende Stoffe, die von der offenen Atmosphäre in einen Einwirkungsbereich (Immissionsort) übertreten.

### Immissionswerte IW1 und IW2

Immissionswerte für Langzeitwirkungen (IW1) und Kurzzeitwirkungen (IW2) nach der TA LUFT 1986.

### Jahresmittelwert

Arithmetisches Mittel aller ½ Stunden-, Stunden-, Tagesmittel- oder Monatsmittelwerte einer beobachteten Schadstoffkomponente über ein Jahr.

### Lkw-Anteil

Anteil der Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 2,8 t in Prozent der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV).

### MLuS

Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (HRSG.) 2002)

### Perzentil

Diese Kenngröße ist der zur Summenhäufigkeit in % gehörende Meßwert, der sich ergibt, wenn alle Meßwerte nach der Größe ihres Zahlenwertes geordnet sind.

#### 98-Perzentil

98%-Wert der Summenhäufigkeit. Dient der Beurteilung der Spitzenbelastung.

#### Schadstoffausbreitung

Prozesse, die den Weg von Luftschadstoffen von der Quelle zum Immissionsort bestimmen.

#### Schadstoffe

Alle in der Umwelt vorkommenden Luftverunreinigungen, die auf Menschen, auf andere Lebewesen oder auf Sachgüter schädlich wirken können.

#### Schadstoffemission

Schadstoffe, die in die offene Atmosphäre austreten.

#### Screeningmodell

Vereinfachtes Modell das mit geringem Daten- und Rechenaufwand der Abschätzung von (hier) Schadstoffbelastungen dient.

#### Vorbelastung

Vorhandene Immissionsbelastung ohne den Beitrag der zu beurteilenden Straße

#### Zusatzbelastung

Immissionsbelastung, die ausschließlich durch die zu beurteilende Straße hervorgerufen wird.

## 5 Literatur

BLAZEK, R., NAGEL, T., SCHÄDLER, G., BÄCHLIN, W., und LOHMEYER, A. (1998): Kleinskalige klimatisch-lufthygienische Untersuchungen für das Gebiet A der Planung "Stuttgart 21" - Entwürfe Jodry und Trojan -. LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (HRSG.): Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz: Untersuchungen zur Umwelt - "Stuttgart 21", Heft 8. Stuttgart.

FLASSAK, T. u. a. (1996): Einfluß der Eingangparameter auf berechnete Immissionswerte für Kfz-Abgase – Sensitivitätsanalyse.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (HRSG.) (1996): MLuS-92. Merkblatt über Luftverunreinigungen an

Straßen, Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung, Ausgabe 1992, geänderte Fassung 1996. Köln.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) (HRSG.) (2002): MLuS-02. Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen, Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung, Ausgabe 2002, geänderte Fassung 1992. Köln.

HELBIG, A., BAUMÜLLER, J., und KERSCHGENS, M. J. Hrsg. (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin , 467.

STRASSER, H. (1979): Der Kfz-Immissions-Index - Eine Methode zur Bewertung verkehrsbedingter Immissionen. Oldenburg, Universität Oldenburg, Fachgebiet Verkehr und Städtebau.

TA LUFT (1986): TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - 1. BImSchVwV) vom 27.2.1986, GMBL. 95.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (HRSG.) (1999): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 1.2, Januar 1999. ERARB. DURCH: INFRAS BERN, Bern, 128.

ZENGER, A. (1998): Atmosphärische Ausbreitungsmodellierung. Grundlagen und Praxis. Berlin, 159.