

Tiefgaragenabluft - Analyse der Luftqualität sowie Entwicklung eines Modells zur Prognose der Emissionen

**A. Zenger, N. van der Pütten, Mainz,
Th. Gritsch, M. Sinn, P. Rabl, H. Gabler, München**

Erschienen in VDI-Berichte 1443: Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität , International Symposium, April 27 to 29, 1999

Zusammenfassung

In der im Rahmen dieser Untersuchung analysierten Tiefgarage mit 240 Stellplätzen wurden als toxikologisch wichtigste Schadstoffkomponenten identifiziert: Ruß, Benzol, Feinstaub, NO₂ und CO mit maximalen 1½-Mittelwerten von 50, 290, 180, 180 µg/m³ und 40 mg/m³. Für die Geruchsbelastung ist weiterhin H₂S von Bedeutung. Leitkomponenten konnten nicht ermittelt werden, da die üblicherweise in der Außenluft gefundenen Korrelationen in der Tiefgaragenluft nicht zutreffen.

Um die Relevanz von Emissionen und Immissionen in Tiefgaragen im Einzelfall abschätzen zu können, wurde ein Prognosemodell für die Schadstoffkomponenten CO, NO_x, NO₂, HC, Benzol, Feinstaub und Ruß entwickelt, mit dem ausgehend vom Garagenvolumen, der Zahl der Parkplätze, der Luftwechselrate und dem Verkehrstagesgang eine Vorhersage der zeitlichen Variation der Innenraum- und damit auch der Abluftkonzentration durchgeführt werden kann.

1 Einleitung

Für geschlossene Kfz-Garagen gelten lufthygienische Sicherheitsvorschriften. Nach den Gesetz- und Verordnungsblättern der Bundesländer muß in Kfz-Garagen gewährleistet sein, daß die Kohlenmonoxid-Konzentration nicht mehr als 100 ppm beträgt. Dies gilt für einen Zeitraum von einer halben Stunde, und zwar auch bei den zu erwartenden Verkehrsspitzen. Kohlenmonoxid (CO) wird bei der Auslegung der Garagen als Leitsubstanz betrachtet. Bei der Einhaltung des CO-Richtwertes von 100 ppm wird davon ausgegangen, daß auch andere, von den Kfz emittierte Schadstoffe in unbedenklichen Konzentrationen vorliegen. Eine einfache Abschätzung zeigt, daß in Tiefgaragen sehr hohe Konzentrationen von Benzol, Ruß und NO_x möglich sind, auch wenn der CO-Grenzwert eingehalten wird [12]. Hierbei muß jedoch berücksichtigt werden, daß der CO-Grenzwert für Kurzzeitbelastungen gilt, Benzol- und Rußgrenzwerte sich wegen des kanzerogenen Effekts

jedoch auf Langzeitmittelwerte beziehen. Im Hinblick auf den Benutzer der Tiefgarage, der sich nur wenige Minuten innerhalb der Parkzone aufhält, sind daher selbst hohe Benzol- und Ruß-Immissionen kaum relevant. Für Personen, die in der Tiefgarage arbeiten (Kassenbereich u.ä.), vor allem aber für alle, die der Abluft ausgesetzt sind (Läden im Einfahrtsbereich, Fenster in der Nähe der Abluftöffnungen), sind die Benzol-, Ruß- und NO_x -Emissionen und Immissionen jedoch sehr relevant. Aufgrund der möglichen Belastung der Benutzer und der Anwohner von Tiefgaragen ist es notwendig, die Lüftung unter dem Aspekt der Minimierung aller relevanten Schadstoffkonzentrationen zu optimieren. Der erste Schritt zu diesem Ziel ist die Entwicklung eines numerischen Modells, mit dem man ausgehend von einfach zu bestimmenden Parametern wie der Anzahl der parkenden Pkw, dem Tagesgang der Belegung, der Luftwechselrate und den Garagenkenngrößen die Emissionen und anschließend die Immissionskonzentrationen der Luftschadstoffe Kohlenmonoxid, Benzol, Ruß und Stickstoffdioxid in der Tiefgarage berechnen kann. Ausgehend von den ermittelten Abluftmengen und -konzentrationen können dann notwendige Luftwechselraten vorgegeben und Abluftaustritte im Hinblick auf ihre lufthygienische Relevanz für Anwohner untersucht werden.

2 Analyse der Luftqualität in Tiefgaragen

Verbrennungsgetriebene Kraftfahrzeuge emittieren eine Vielzahl unterschiedlicher Schadstoffe. Neben den klassischen, lufthygienisch relevanten Schadgasen Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxid (NO_x) und Schwefeldioxid (SO_2) treten in den letzten Jahren wegen der kanzerogenen Wirkung vor allem auch die Abgaskomponenten Benzol und Ruß in den Vordergrund der Betrachtung.

- **CO:** der MIK-Wert (Maximale Immissionskonzentrationen nach VDI 2310) von CO liegt bei 30 mg/m^3 ($\frac{1}{2}$). Der Beurteilungswert für die Luftqualität in Tiefgaragen liegt mit einem maximalen Stundenmittelwert von 100 ppm, entsprechend 116 mg/m^3 verglichen hierzu recht hoch.
- **NO_2 :** der MIK-Wert für Stickstoffdioxid liegt bei $0,2 \text{ mg/m}^3$. In der 23. BImSchV ist der 98-Perzentilwert von NO_2 (der $\frac{1}{2}$ Stundenwerte des Jahres) auf $0,16 \text{ mg/m}^3$ begrenzt.
- **Benzol:** der Länderausschuß für Immissionsschutz [8] hat als Zielvorgabe einen flächenbezogenen Langzeitmittelwert (IW1) für Benzol von $2,5 \text{ µg/m}^3$ vorgeschlagen. Dieser Wert wird in der Regel in fast allen Stadtgebieten deutlich überschritten. Nach der 23. BImSchV sollen verkehrsbeschränkende Maßnahmen geprüft werden, wenn der punktbezogene Jahresmittelwert der Benzolkonzentration 10 µg/m^3 übersteigt.
- **Dieselfuß:** nach der Einschätzung der Arbeitsgruppe „Krebsrisiko durch Luftverunrei-

nigungen,, haben Dieselrußpartikel einen Anteil von mehr als 60 % am immissionsbedingten kanzerogenen Risiko [8]. Seit dem 1.7.1998 gilt nach der 23. BImSchV ein auf das Jahr bezogener, mittlerer punktbezogener Konzentrationswert von $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Beurteilungswert für Dieselruß.

Die Untersuchungen wurden vom Referat für Gesundheit und Umwelt der Stadt München und der FH Mainz, Fachbereich Bauingenieurwesen beauftragt und von der TÜV Ecomplan Umwelt GmbH mit Unterstützung der Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz an einer Tiefgarage eines Bürokomplexes mit 240 Stellplätzen durchgeführt.

2.1 Tagesgänge

Tiefgaragen haben ein ausgeprägtes zeitabhängiges Emissionsverhalten. Besonders ausgeprägt ist dieses bei Tiefgaragen von Bürokomplexen. Hier erfolgt morgens die Belegung mit "warmen" Fahrzeugen in einem Zeitfenster von ca. 3 Stunden. Abends spielt sich der umgekehrte Vorgang ab, nur emittieren nun "kalte" Fahrzeuge mit höheren Emissionen.

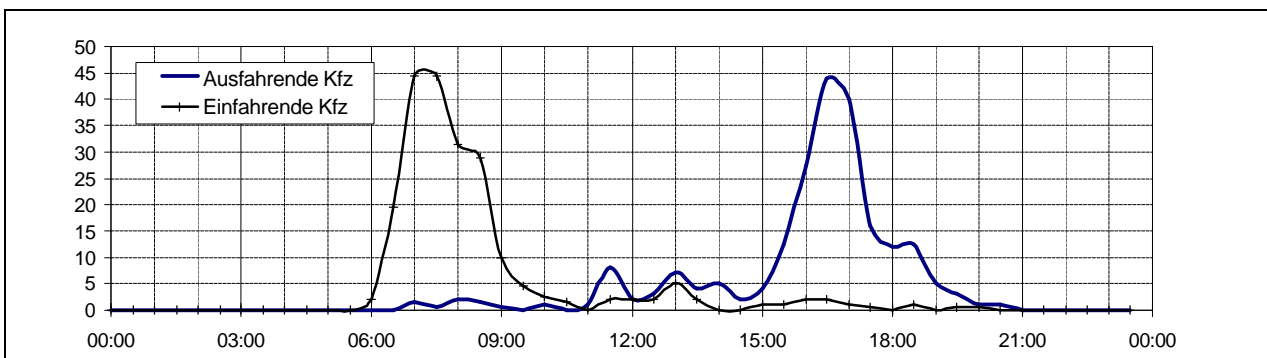


Abb. 1: Fahrzeugbewegungen bezogen auf ein 30 Minutenintervall in der Tiefgarage

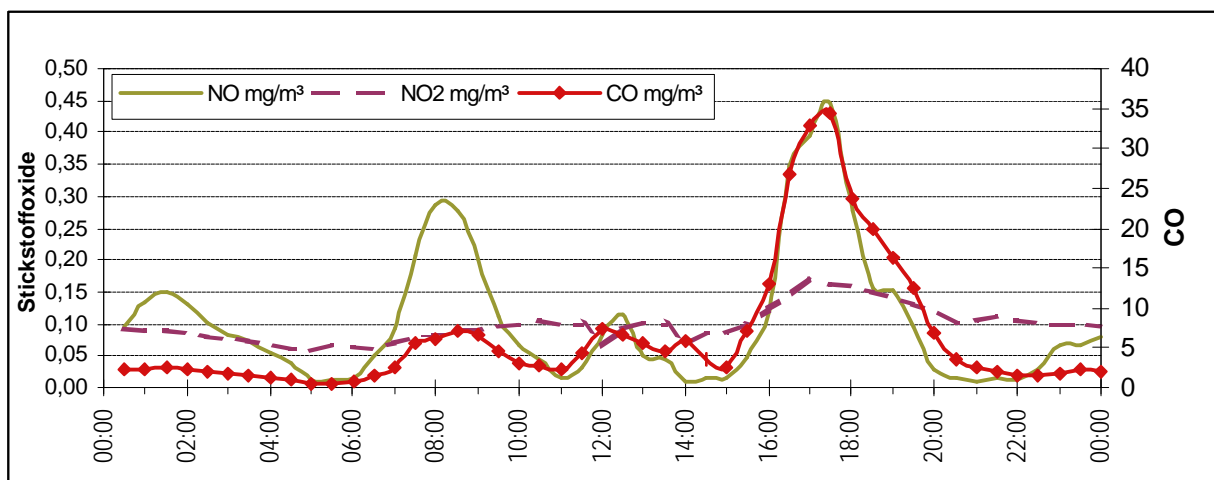


Abb. 2: Tagesgänge von NO, NO2 und CO in der Tiefgarage

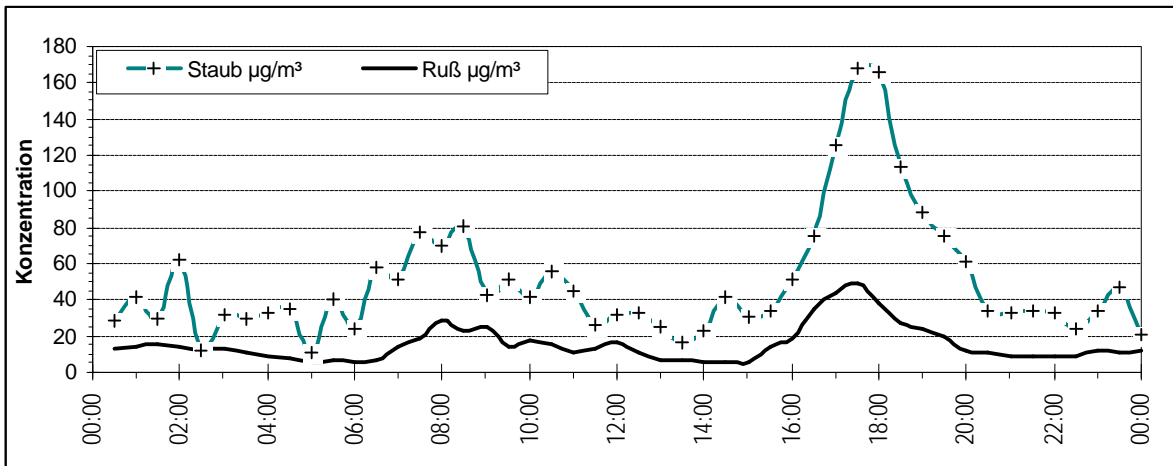


Abb. 3: Tagesgänge für Schwebstaub und Ruß

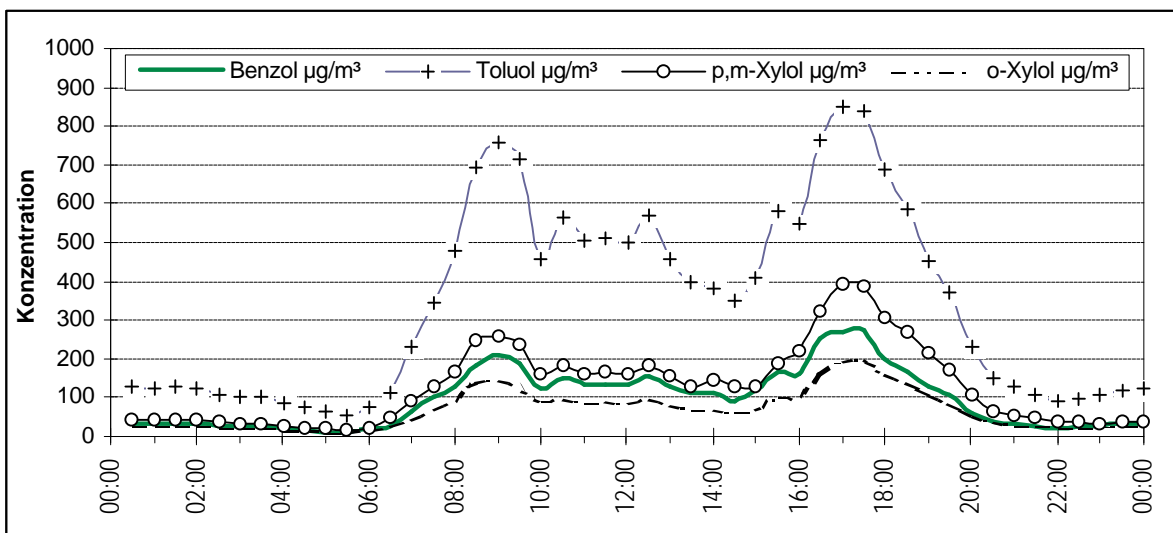
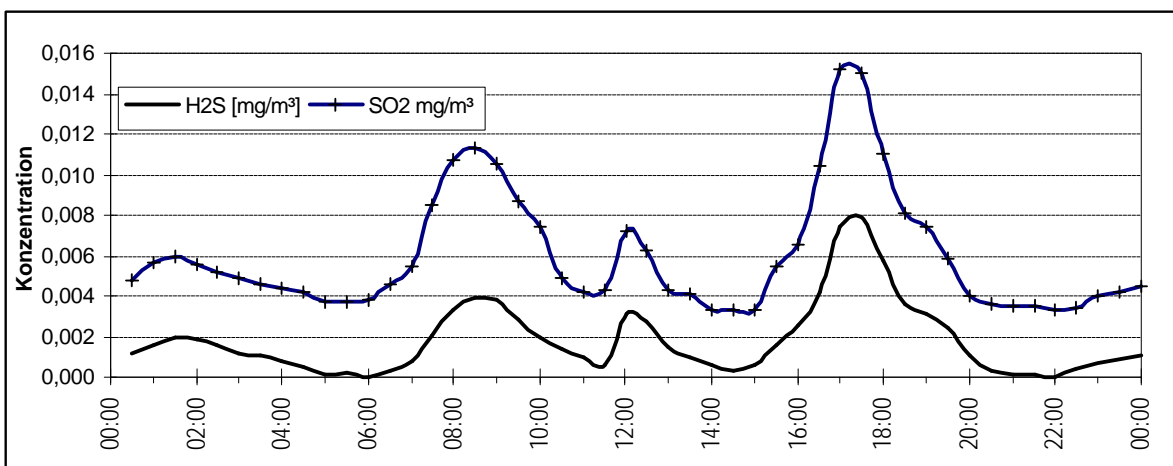


Abb. 4: Tagesgänge der BTX

Abb. 5: Tagesgänge von SO_2 und H_2S in der Tiefgarage

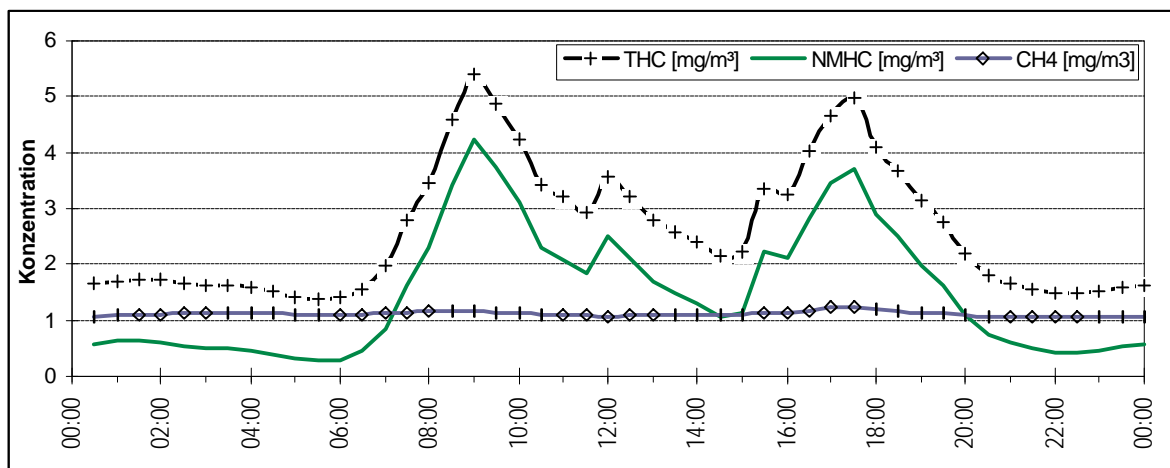


Abb. 6: Tagesgänge der Kohlenwasserstoffkonzentration in der Tiefgarage (THC = Gesamtkohlenwasserstoffe; NMHC = THC ohne Methan)

Besonders deutlich ist dieses Verhalten an den Tagesgängen von CO, Schwebstaub und Ruß in Abb. 2 bis Abb. 3 zu sehen, während die Komponenten NO_x , BTX, SO_2 , H_2S und die HC - Konzentrationen wesentlich schwächer beeinflusst werden.

2.2 Tagesmittelwert, Maximalwerte, 98 - Perzentile

Tabelle 1: Tagesmittelwert, Maximalwerte, 98 - Perzentile in der Tiefgaragenabluft

Komponente		Tagesmittelwert	98 - Perzentil (Meßzeit 45 h)	Max. Halbstundenmittelwerte
CO	mg/m ³	6,4	31,6	39,6
NO	mg/m ³	0,092	0,409	0,495
NO ₂	mg/m ³	0,102	0,168	0,183
Ruß	µg/m ³	14,0	45,2	49,7
Staub	µg/m ³	53	169	183
SO ₂	mg/m ³	0,005	0,015	0,017
H ₂ S	mg/m ³	0,002	0,007	0,008
THC	mg/m ³	2,6	5,3	5,4
CH ₄	mg/m ³	1,1	1,2	1,3
NMHC	mg/m ³	1,4	4,2	4,3
Benzol	µg/m ³	94	279	288
Toluol	µg/m ³	347	828	908
p,m-Xylol	µg/m ³	123	380	487
o-Xylol	µg/m ³	69	192	224

2.3 Korrelationen

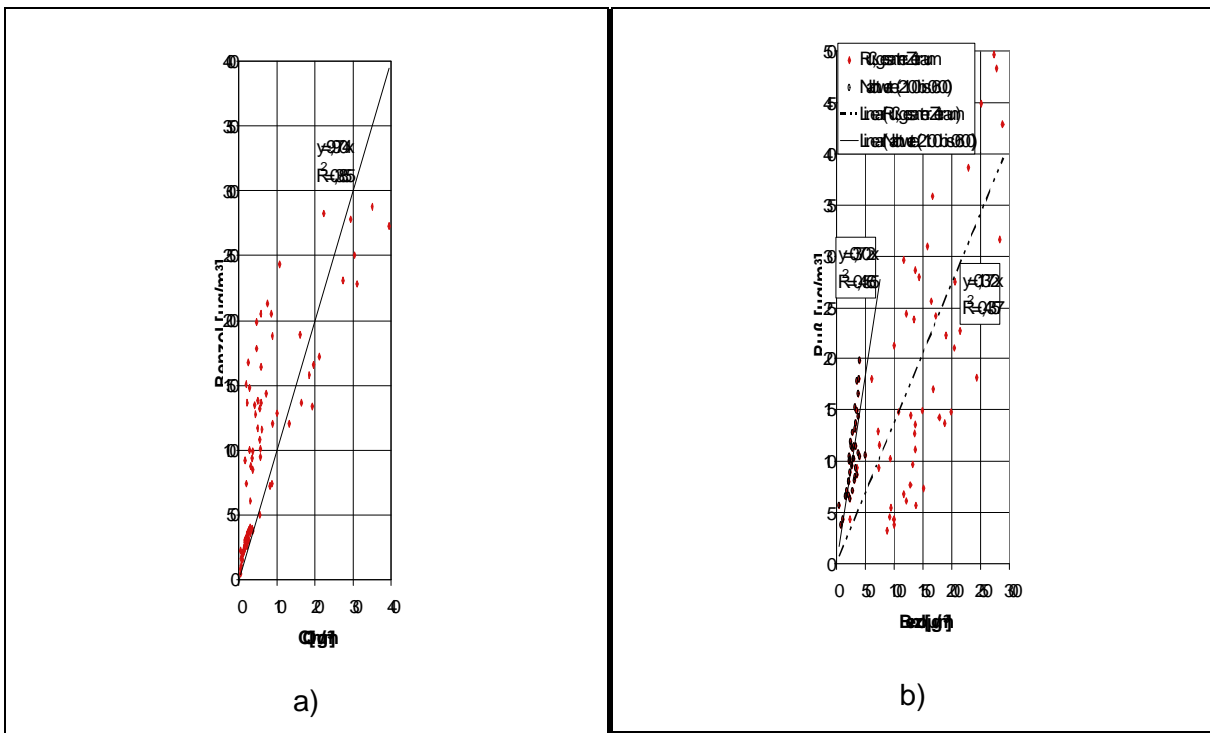


Abb. 7: Korrelationsdiagramme für a) Benzol / CO und b) Ruß / Benzol

Aus verkehrsnah durchgeführten Immissionsmessungen ist bekannt, daß die Schadstoffkomponenten CO und Benzol üblicherweise gut korrelieren. Dies trifft für die Schadstoffe in der Tiefgarage nur für die Nachtstunden von 21:00 Uhr bis 06:00 Uhr morgens zu, d.h. in Zeiträumen in denen keine Fahrbewegungen in der Tiefgarage stattfinden und nur überwiegend die Außenluft umgewälzt wird. Dieser Bereich ist in Abb. 7 a) für Konzentrationen für $\text{CO} < 4 \text{ mg/m}^3$ und $\text{Benzol} < 40 \text{ µg/m}^3$ zu erkennen. Finden während des Tages Fahrbewegungen in der Tiefgarage statt, korrelieren die beiden Schadstoffkomponenten jedoch nicht mehr.

Das gleiche Verhalten ergibt auch die Korrelationsanalyse für die Komponenten Ruß und Benzol. In Abb. 7 b) ist je eine Ausgleichsgerade für den gesamten Meßzeitraum und nur für die Nachtstunden von 21:00 Uhr bis 06:00 Uhr eingezeichnet. Die Steigung der Geraden unterscheidet sich fast um den Faktor 3. Gute Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten besser als 0,94 sind nur innerhalb der BTX über den gesamten Bereich festzustellen. Die relativen Verhältnisse von Benzol, Toluol und den Xylenen zueinander bleiben bestehen, sowohl bei den Emissionen durch den Verbrennungsvorgang, als auch durch Verdunstungsemissionen.

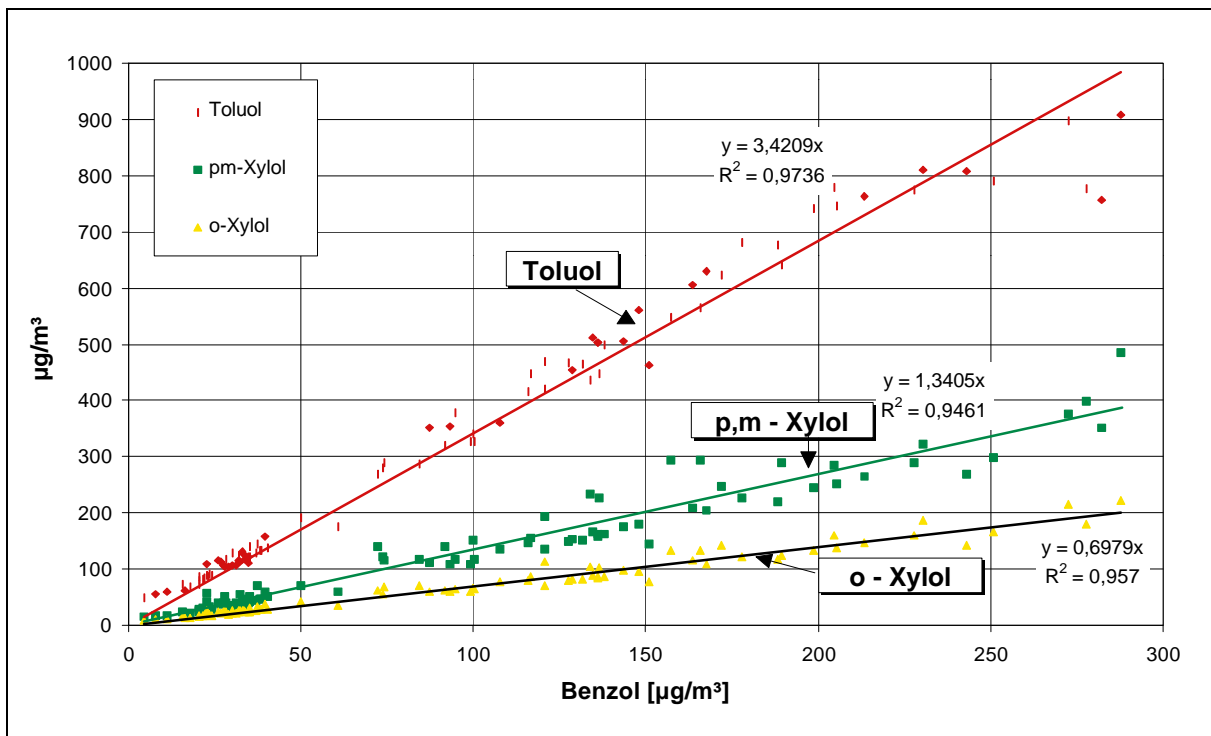


Abb. 8: Korrelationsdiagramme von Toluol, p,m-Xylol und o-Xylol zu Benzol

Die Bestimmung der Luftqualität in Tiefgaragen erfolgt zur Zeit nach der Garagenverordnung nur über die Komponente CO. Die durchgeführten Messungen zeigen jedoch, daß weitere für die Beurteilung der Luftqualität wichtige Größen wie Ruß, BTX und NO_x aufgrund der mangelhaften Korrelation mit CO mit der Messung von nur einer Leitgröße nur unzureichend beschrieben werden können.

2.4 Korngrößenverteilung des Partikelkollektives

Die Schwebstaubkonzentration wurde kontinuierlich mit einem β -Absorptionsgerät gemessen. Zeitgleich wurde die mittlere Korngrößenverteilung mit einem 5stufigem Berner Niederdruckimpaktor (obere Abscheidegrenze 21 μm) bestimmt. Wie Abb. 9 zu entnehmen ist, setzt sich das Kollektiv zu 99 % aus Teilchen kleiner 10 μm zusammen und immer noch 94 % der Partikel sind kleiner 2,5 μm .

Das Partikelkollektiv weist einen sehr hohen Feinstaubanteil auf, der sich jedoch nur zu rund 26 % aus Ruß (EC) und 17 % aus der Fraktion organischer Kohlenstoff (NEC) zusammensetzt. Rund die Hälfte der Partikel kleiner 2,5 μm haben daher eine mineralische Zusammensetzung. Bezieht man den EC - Anteil auf den gesamten partikelförmigen Kohlenstoff, so beträgt er in der Außenluft 46 %, in der Tiefgaragenabluft 62 %.

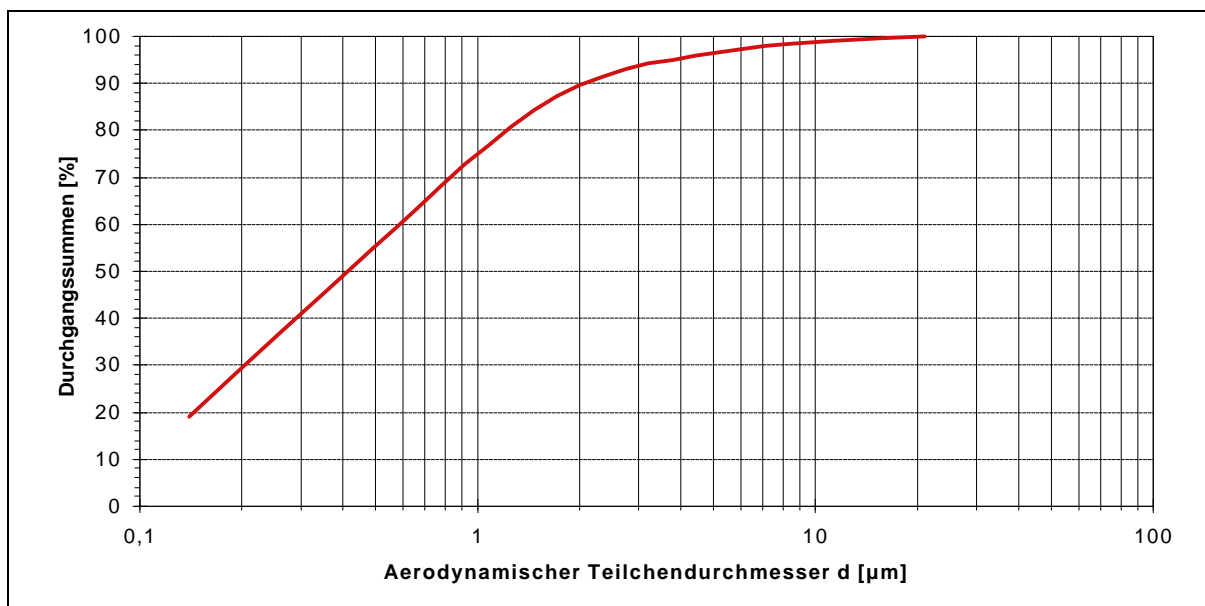


Abb. 9: Summenhäufigkeitsverteilung des Partikelkollektives in der Tiefgarage

2.5 Spurengase und sonstige gasförmige Bestandteile

Neben den kontinuierlich meßbaren Standardkomponenten wurde die Tiefgaragenluft auf eine Reihe von toxischen bzw. kanzerogenen Spurengase untersucht mit folgenden Ergebnis.

- Die über 41 h gemittelte Konzentration von PCDD und PCDF lag mit einem I-TEQ von 0,0032 pg/m³ im üblichen Bereich der Außenluft. Dies trifft auch für die Summe der PAH nach EPA 610 mit 2,95 µg/m³ und insbesondere für Benzo(a)pyren mit 1,1 ng/m³ zu. Bromierte Dioxine und Furane waren nicht nachweisbar.
- Die Konzentration der Summe der PCB nach LAGA mit 7,2 ng/m³, sowie die Summe der Chlorbenzole mit 0,72 ng/m³ und Chlorphenole mit 2,2 ng/m³ ist ebenfalls als unbedenklich zu bezeichnen und wies in der Außenluft übliche Werte auf.
- Die Konzentrationen der in Abb. 10 aufgeführten weiteren gasförmigen Bestandteile in der Tiefgaragenluft¹ sind deutlich erhöht gegenüber den, im Vergleich dargestellten Innenraumluftwerten aus einem 1986/87 in 500 Wohnungen durchgeführten Umwelt-Survey. Jedoch liegen die Meßwerte noch weit unter den jeweiligen MAK - Werten, die im mg/m³ - Bereich angesiedelt sind. Auch die Geruchsschwellenwerte werden für die relevanten Substanzen Acrolein und Butadien bei weitem nicht erreicht.

¹ Probenahme Aldehyde über 4 h von 8:30 bis 12:30, restliche Komponenten über 8 h von 08:30 bis 17:30 Uhr. Die Verkehrsspitzen wurden bei diesen Messungen daher nicht vollständig erfaßt

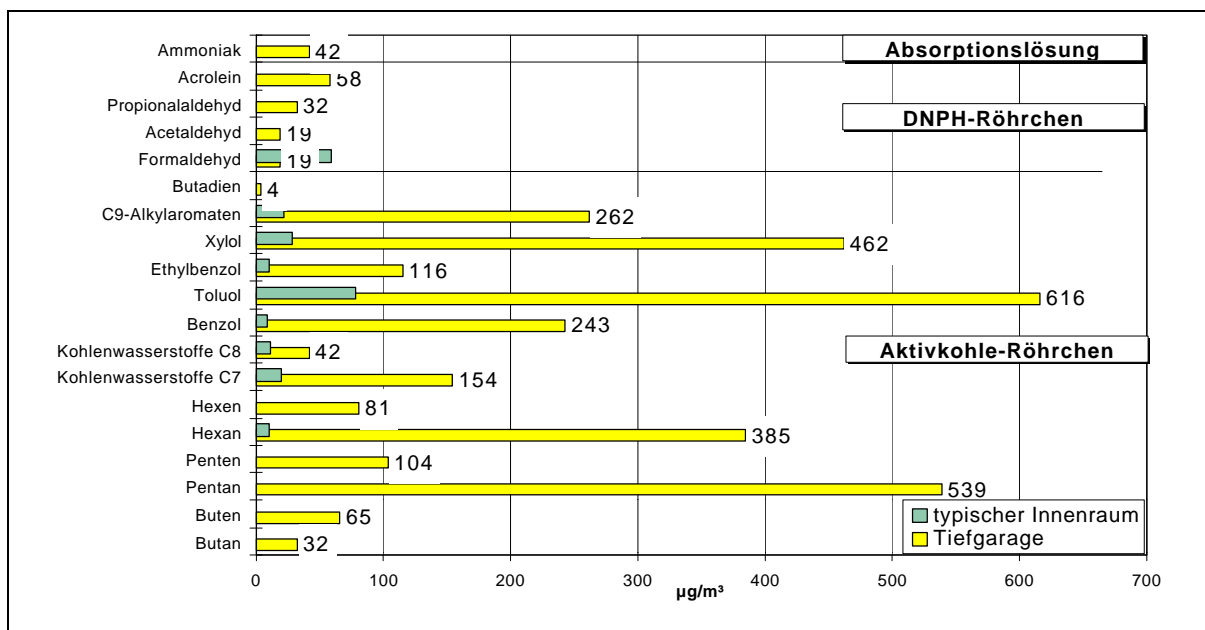


Abb. 10: Konzentration weiterer gasförmiger Bestandteile der Tiefgaragenabluft

2.6 Bewertung der Toxizität

Übliche Benutzer halten sich in der Tiefgarage in der Regel weniger als 10 Minuten auf. Selbst hohe Schadstoffkonzentrationen, denen die Benutzer während ihres Aufenthaltes in der Tiefgarage ausgesetzt sind, sind daher nicht von besonderer Relevanz. Berücksichtigt man allerdings weiterhin, daß die Schadstoffkonzentrationen im Inneren des Kfz nach einer längeren Standzeit in der Tiefgarage aufgrund von Diffusionsvorgängen in etwa der Außenluftkonzentration entspricht, so kann man davon ausgehen, daß der übliche Benutzer etwa 30 Minuten der Tiefgaragenluft ausgesetzt ist. Für den Tiefgaragenbenutzer sind daher die Richtwerte für eine Kurzzeitbelastung ausschlaggebend.

Für Arbeitsplätze in der Tiefgarage bzw. in unmittelbarer Nähe der Tiefgarage müssen allerdings auch längere Zeiträume, wie Jahresmittelwerte betrachtet werden. Dies gilt auch für Anwohner, die der Abluft über längere Zeit ausgesetzt sind. Dabei können die Schadstoffe entweder über naheliegende Be- und Entlüftungsöffnungen durch die Fenster in die Wohnungen gelangen, oder bei im Hause liegende Tiefgaragen auch durch nicht dicht schließende Türen und Treppenhäuser [13 - 15].

Für die Langzeitbelastung sind die Komponenten Benzol, Toluol, Xylol, Ruß, NO₂, CO und Benzo(a)pyren wesentlich. Für die Kurzzeitbelastung sind vor allen die Komponenten NO_x und CO von Bedeutung. Schwefelwasserstoff ist wegen ihrer niedrigen Geruchsschwelle die wichtigste Größe für die Geruchsbelastung durch die Tiefgaragenabluft.

Für das kanzerogene Risiko sind vor allem die Luftschadstoffe Benzol und Ruß bedeut-

sam. Die gesundheitliche Belastung durch die restlichen gemessenen Komponenten ist dagegen eher als niedrig einzuschätzen.

3 Entwicklung eines Prognosemodells

3.1 Kraftfahrzeugemissionen

Die Schadstoffemissionen der Pkw werden durch Emissionsfaktoren beschrieben. Je nach dem Betriebszustand der Pkw wird beim Fahrbetrieb zwischen warmen und kalten Faktoren unterschieden. Aber auch nach dem Abstellen des Fahrzeuges treten Emissionen durch die Verdunstung von Kohlenwasserstoffverbindungen (HC) auf. Bei dieser Art der Emissionen differenziert man zwischen den Emissionsfaktoren für die Verdampfung nach dem Abstellen des betriebswarmen Kfz (Einheit: g/Fahrzeug und Abstellvorgang) und den Emissionsfaktoren für die Verdunstung infolge der Tankatmung (Einheit: g/Fahrzeug und Tag). In der Tabelle 2 sind die verschiedenen Kfz-spezifischen Emissionsfaktoren zusammengefaßt dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht und Abhängigkeiten der Emissionsfaktoren einer Fahrzeugschicht

Bezeichnung der E-Faktoren	"Warm"	„Kalt,, bzw. "Startzuschläge"	"Verdampfung nach Motorabstellen"	"Verdampfung infolge Tankatmung"
Einheit	[g/Fz und km]	[g/Fz und Startvorgang]	[g/Fz und Abstellvorgang]	[g/Fz und Tag]
Abhängig von	Fahrmuster (Längsneigung)	Umgebungstemperatur, Standzeit, Fahrtlänge, Fahrmuster	Motortemperatur Vorausgegangene Fahrlänge	Änderung der Umgebungstemperatur und -druckes
Ein-schränkungen			gilt nur für HC-Emissionen	gilt nur für HC-Emissionen

3.2 Modell zur Bestimmung der Pkw-Emissionen in Tiefgaragen

Zur Berechnung der Pkw-Emissionen in Tiefgaragen wurde im Rahmen dieses Projektes vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg das Rechenmodell T-emi erstellt. Das Modell stützt sich auf die schichtspezifischen Emissionsfaktoren des TÜV Rheinland sowie Faktoren für Fahrzeugschichten, wie sie zwischen dem Umweltbundesamt und dem Verband der Automobilindustrie Anfang 1998 abgestimmt wurden. Da in dem Modul T-emi auf die Grundmenge der Emissionsfaktoren des TÜV Rheinland zurückgegriffen wird, stehen 10 unterschiedliche Fahrmuster sowie deren Linearkombinationen zur Auswahl. Für die vorliegende Untersuchung wurden zwei Fahrmuster ausgewählt, mit

deren Linearkombination das Fahrverhalten in Tiefgaragen näherungsweise beschrieben werden kann. In der Abb. 11 ist eine Grobgliederung des Modells T-emi dargestellt.

Eine Sensitivitätsuntersuchung des Emissionsmoduls zeigt, daß die berechneten Emissionsfaktoren deutlich von der Schichtzusammensetzung der Benutzer-Pkw und dem Fahrmuster geprägt werden. Es ergibt sich weiterhin, daß die durch den Kaltstart bedingten Emissionen sehr stark von der in der Garage zurückgelegten Wegstrecke abhängen.

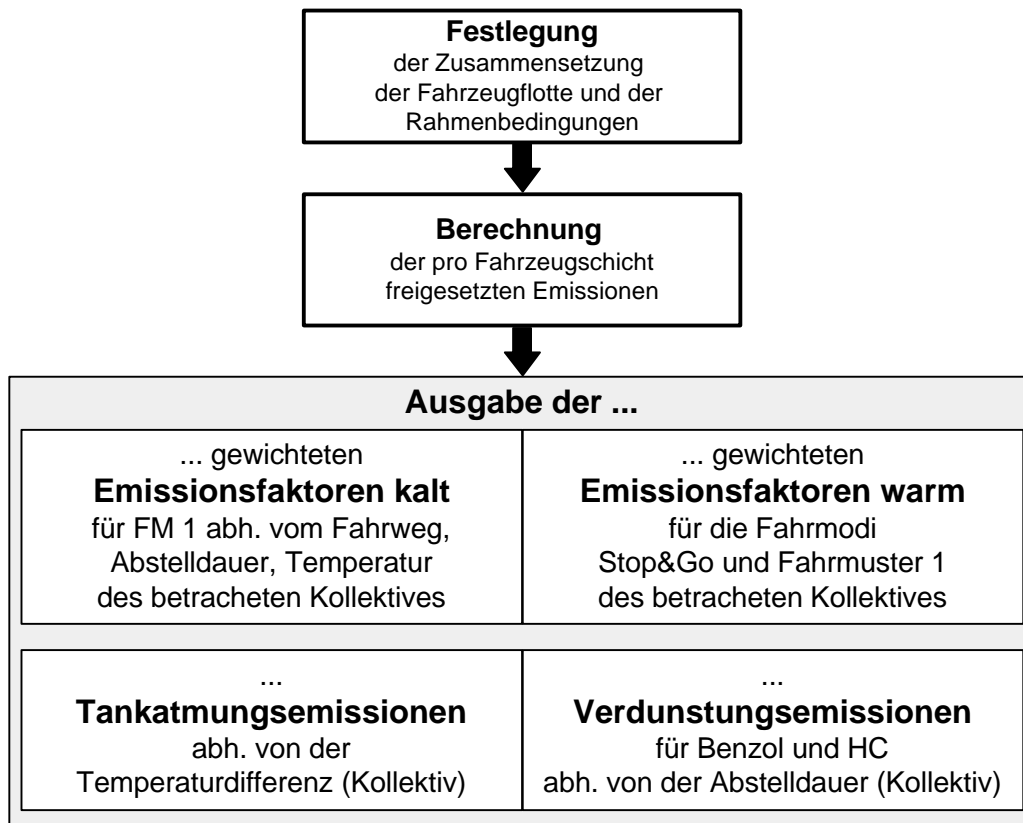


Abb. 11 Grobgliederung des Prognosemoduls T-emi zur Bestimmung schichtspezifischer Pkw-Emissionsfaktoren

Dies ist von zentraler Bedeutung, da hauptsächlich diese Emissionen für die Schadstofffreisetzung in Garagen relevant sind. In der Tabelle 3 **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** sind die kalten und warmen Emissionsfaktoren für eine Schichtverteilung entsprechend der BRD/West 1998 (als Standard bezeichnet) und dem Kollektiv in der untersuchten Tiefgarage für eine Mischung der beiden Fahrmuster im Verhältnis 80 / 20 aufgetragen. Dieses Verhältnis der Fahrmuster wurde gewählt, da es dem Fahrverhalten in der untersuchten Tiefgarage am nächsten kam.

Tabelle 3: Kalte und warme Emissionsfaktoren für eine Schichtverteilung entsprechend der BRD-West 1998 (Standard) und dem Kollektiv in der untersuchten Tiefgarage

Komponenten		Kalte Emissionsfaktoren		Warme Emissionsfaktoren 80/20	
		Standard	Schichtverteilung Tiefgarage	1998 Standard	Schichtverteilung Tiefgarage
Benzol	[mg/(m*Pkw)]	0,28	0,32	0,047	0,048
CO	[mg/(m*Pkw)]	57,5	63	5,8	5,7
HC	[mg/(m*Pkw)]	5,6	6,1	0,7	0,67
NO _x	[mg/(m*Pkw)]	0,55	0,68	0,48	0,42
Partikel	[mg/(m*Pkw)]	0,072	0,051	0,02	0,012

3.3 Modell zur Berechnung der mittleren Immission in der Tiefgarage

Hat man die Emissionsfaktoren der Fahrzeugschicht ermittelt, so kann die mittlere Immissionskonzentration in der Tiefgarage ausgehend von der Anzahl der ein- und ausfahrenden und abgestellten Pkw, der mittleren Wegstrecke, der Luftwechselrate und dem Garagenvolumen bestimmt werden. Das hierfür entwickelte Modell basiert auf einer numerischen Integration der Kontinuitätsgleichung [11].

Die Änderung der Innenraumkonzentration ΔC_i im Zeitintervall Δt ergibt sich dabei zu

$$\Delta C_i / \Delta t \cdot V = \sum Q_i + \Delta V / \Delta t \cdot C_z - \Delta V / \Delta t \cdot C_i - S$$

Hierbei bezeichnet

- C_i die Innenraumkonzentration in g/m^3
- V das Raumvolumen in m^3
- Q_i den Emissionsmassenstrom durch Fahrbewegungen, Kaltstart, Tankatmung und Verdunstung in g/s
- dV/dt den Zu- bzw. Abluftstrom in m^3/s
- t die Zeit in s
- C_z die Konzentration der Zuluft in g/m^3
- S einen Senkenterm wie z.B. den chemischer Abbau u.ä. in g/s

3.4 Überprüfung des Mischungs- Modells und der berechneten Emissions-

faktoren anhand von Messungen in einer ausgewählten Tiefgarage

Zur Verifizierung des Rechenmodells und der berechneten Emissionsfaktoren wurden in einer ausgewählten Tiefgarage eines Münchner Verwaltungs- bzw. Bürokomplexes Luftschadstoffmessungen in der Zu- und Abluft sowie SF₆-Messungen zur Bestimmung der Luftwechselrate durchgeführt. Die Garage zeichnete sich dadurch aus, daß sie über eine zentrale Zu- und Abluftversorgung verfügt und nur minimale diffuse Luftein- und austritte aufweist sowie die Ein- und Ausfahrt der Pkw zeitlich getrennt und jeweils in eng begrenzten Zeiträumen stattfinden. Die Garage ist zweistöckig ausgelegt und weist im oberen Stockwerk 121 und im unteren 120 Stellplätze auf. Die gesamte Fahrstrecke in der Tiefgarage beträgt inklusive des Ein- und Ausparkens 370 m, d.h. bei der Ein- und Ausfahrt im kollektiven Mittel 185 m. Die Fahrstrecke in der Tiefgarage verläuft in jedem Stockwerk bis auf eine 90o-Kurve geradlinig ohne Gegenverkehr. Die Fahrzeuge durchfahren die Tiefgarage im Mittel mit einer Geschwindigkeit von ca. 13 km/h. Für die untersuchte Tiefgarage ist die Schichteneinteilung der parkenden Fahrzeuge bekannt. Um die Luftwechselrate der untersuchten Tiefgarage zu ermitteln wurde das toxikologisch unbedenkliche Tracergas SF₆ [10] über einen Zeitraum von 2 Stunden über die Zuluft in die Tiefgarage eingebracht. Hierdurch stellte sich in der Garage eine Gleichgewichtskonzentration an SF₆ ein. Nach dem Ende des SF₆- Einleitung wurde der Abfall der SF₆-Konzentration in der Abluft der Tiefgarage untersucht.

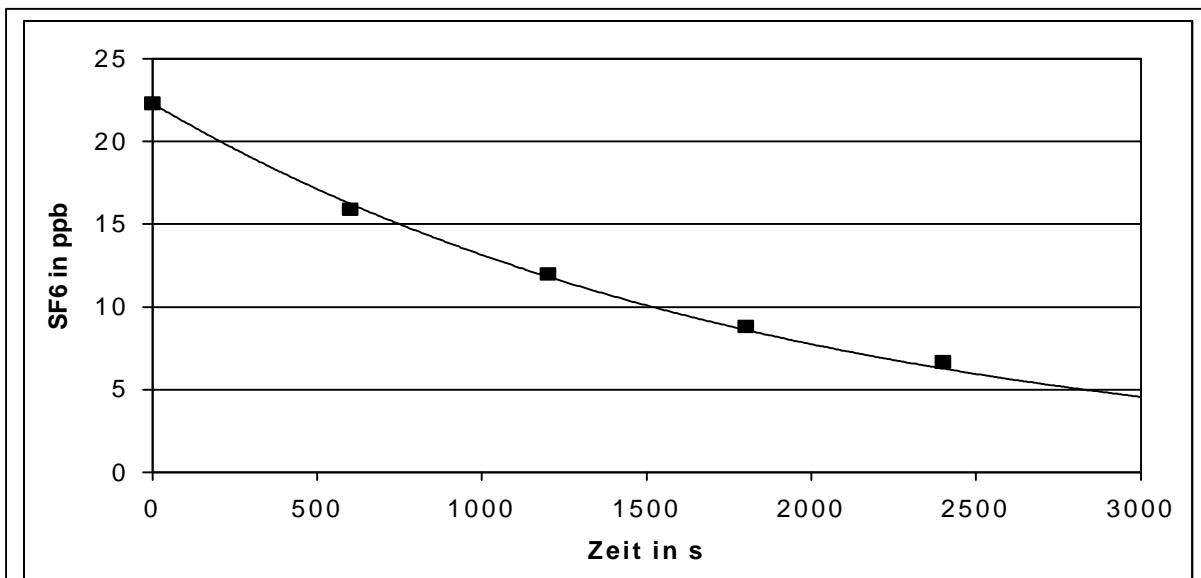


Abb. 12: Abklingfunktion der SF₆-Konzentration in der Tiefgaragenabluft für eine Luftwechselrate von 1,95 h⁻¹ (durchgezogene Linie) sowie die beobachteten SF₆-Konzentrationen (Symbole)

Der zeitliche Rückgang der SF₆ -Konzentration in der Tiefgaragenabluft ist in der Abb.

12 zusammen mit der nach dem Rechenmodell theoretisch zu erwartenden Abklingkurve für eine Luftwechselrate von 1,95 [1/h] dargestellt.

3.5 Ergebnis

Aus der Differenz der Zu- und Abluftkonzentrationen, der Luftwechselrate und dem Verkehrstagesgang kann mit Hilfe des Mischungs-Modells auf die Emissionen der Kfz zurückgeschlossen werden. Als Ergebnis aus den Messungen und der Immissionsmodellierung wurde für die Schadstoffe CO, NO_x, Benzol, HC, Ruß und Feinstaub ein Satz von Emissionsfaktoren (warm, kalt, Verdunstung) abgeleitet, mit dem ausgehend von der Vorbelastung, dem Verkehrstagesgang, der zurückgelegten Wegstrecke und der Luftwechselrate eine optimale Anpassung der gemessenen Immissionen erfolgte. Dies ist in der Abb. 13 beispielhaft für die Schadstoffkomponente CO verdeutlicht. In der Abbildung ist die Zeitserie der in der Tiefgaragenablufte gemessenen (Symbole) und berechneten Kohlenmonoxidkonzentration (durchgezogenen Linie) für die nachfolgenden Emissionsfaktoren dargestellt.

Kaltstartemission 6,5 · 10⁻² g/(m·Pkw)

Warme Emission 7,0 · 10⁻³ g/(m·Pkw)

Wie man der Abb. 13 entnimmt, stimmt die in der Tiefgarage gemessene und die berechnete CO- Immission für den obigen Satz von Emissionsfaktoren sehr gut überein.

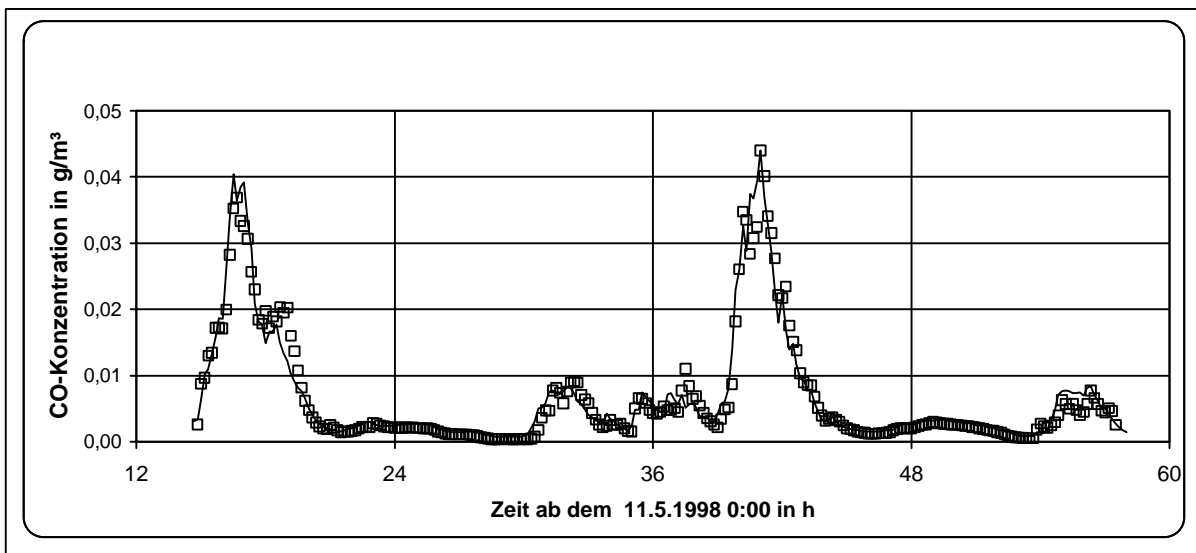
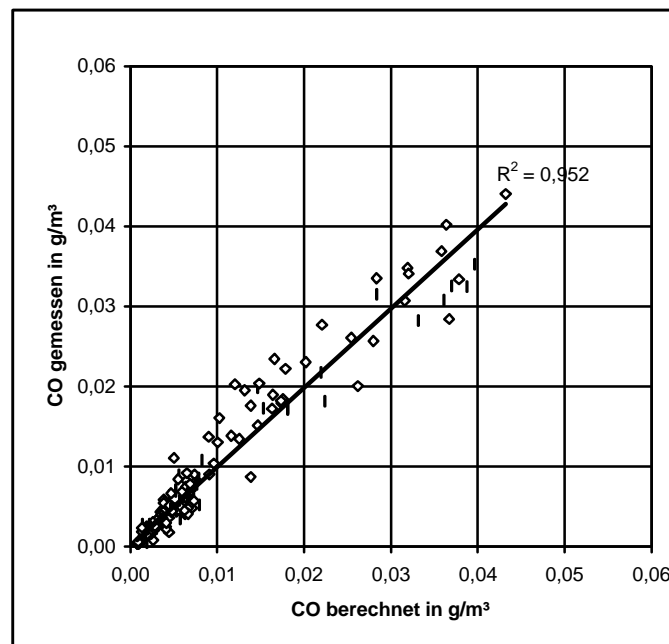


Abb. 13: Zeitserie der CO - Konzentration in der Tiefgarage. Die durchgezogenen Linie stellt die berechneten, die Symbole die Messungen in der Tiefgarage dar

Trägt man die gemessenen und berechneten CO-Konzentrationen gegeneinander auf, so ergibt sich die in der Abb. 14 dargestellte Gerade mit der Steigung 1. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Geraden mit 0,95 bestätigt die sehr gute Übereinstimmung zwischen der Messung und Prognose.

Abb. 14: Vergleich der gemessenen und berechneten CO - Immissionen



3.6 Fehlerabschätzung

Mit Hilfe des beschriebenen Rechenmodells ist es möglich, aus den Immissionsmessungen in der Tiefgarazenzuluft und Abluft die Pkw-Emissionsfaktoren für die untersuchte Tiefgarage abzuleiten. Die hierbei auftretenden Fehler werden im wesentlichen bestimmt durch die

- absoluten Ungenauigkeiten (Garagenvolumen, Luftwechselrate, mittlerer zurückgelegter Weg)
- Fehler bei den Messungen
- Unsicherheiten bei der Optimierung der Parameter für eine Zeitserie

Eine Analyse der Fehler ergibt einen (aufgerundeten) Gesamtfehler bei der Bestimmung der unterschiedlichen Emissionsfaktoren entsprechend der Tabelle 4.

Tabelle 4: Schätzung des Gesamtfehler der Emissionsfaktoren

Komponente	CO	NO _x	Benzol	HC	Feinstaub	Ruß
Fehler der Emissionsfaktoren	± 20 %	± 20 %	± 20%	± 20 %	± 40 % (warm) ± 30 % (kalt)	± 30 %

Nachfolgend werden die mit Hilfe des Moduls T-emi abgeschätzten Emissionsfaktoren mit den aus den Messungen in der untersuchten Tiefgarage abgeleiteten Faktoren verglichen. Hierbei ist weiter zu berücksichtigen, daß auch der Fahrmodus in der Tiefgarage von dem im Modell zugrunde gelegten Fahrmuster abweichen kann.

3.7 Vergleich der berechneten und aus den Messungen abgeleiteten warmen Emissionsfaktoren

In der Tabelle 5 sind die für die untersuchte Tiefgarage aus den Immissionsmessungen abgeleiteten warmen und kalten (bezogen auf eine Wegstrecke von 185 m) Emissionsfaktoren den Werten gegenübergestellt, die mit Hilfe des Moduls T-emi für das angenommene Fahrmuster und die in der untersuchten Tiefgarage beobachtete Pkw- Schichtenverteilungen ermittelt wurden.

Wie man der Tabelle 5 entnimmt, stimmen die mit dem Modell T-emi für die betrachtete Tiefgarage berechneten warmen und kalten Emissionsfaktoren bis auf die Partikelemissionen und die kalten NO_x-Faktoren innerhalb der Fehlergrenzen mit den aus den Messungen abgeleiteten Emissionsfaktoren überein. Es ist zu beachten, daß die berechneten Faktoren für Feinstaub (Partikel) nicht unmittelbar mit den aus den Messungen abgeleiteten Faktoren verglichen werden dürfen, da bei den Rollenprüfstandsmessungen nur die Autoabgase untersucht wurden, bei den Messungen in der Tiefgarage durch das Größenspektrum bis 60 µm aber auch Anteile aus dem Reifenabrieb hinzu kommen können.

Tabelle 5: Für die untersuchte Tiefgarage berechnete Emissionsfaktoren im warmen und kalten Betriebszustand und Vergleich mit den aus den Messungen abgeleiteten Werten.

		T-emi 80/20 Warm	Aus Messung abgeleitet (warm)	T-emi kalt	Aus Messung abgeleitet (kalt)
Komponente	Dim.	Für beobachtete Schichtverteilung		Für beobachtete Schichtverteilung, Wegstrecke 185m	
Benzol	[mg/(m*Pkw)]	0,048	0,045 ± 0,009	0,32	0,4 ± 0,08
CO	[mg/(m*Pkw)]	5,7	7 ± 1,4	63	65 ± 13
HC	[mg/(m*Pkw)]	0,67	0,6 ± 0,12	6,1	6,2 ± 1,2
NO _x	[mg/(m*Pkw)]	0,42	0,55 ± 0,11	0,7	1,55 ± 0,3
Partikel	[mg/(m*Pkw)]	0,012	0,05 ± 0,02	0,051	0,2 ± 0,06 ²
Ruß	[mg/(m*Pkw)]		0,025 ± 0,008		0,09 ± 0,03

Man erkennt, daß die aus den Messungen abgeleiteten Partikel- Emissionsfaktoren um mehr als einen Faktor 3 über den berechneten Werten liegen. Dies deckt sich mit Beo-

² Die Staub-Vorbelastung konnte aufgrund technischer Probleme nicht ausgewertet werden. Deshalb wurde eine zeitlich konstante Vorbelastung von 40 g/m³ zugrunde gelegt. Die Genauigkeit der Emissionsfaktoren wird hierdurch stark beeinträchtigt. Weiter ist zu berücksichtigen, daß nicht PM10 sondern Feinstaub bis 60 µm gemessen wurde.

bachtungen von Israel [3], der in einem Tunnel in Tegel für Pkw um einen Faktor 2,2 höhere Partikel-(PM10-) Emissionsfaktoren ermittelte, als nach den Emissionsfaktoren des TÜV Rheinland [1] zu erwarten gewesen wären. Legt man den (beobachteten) Rußanteil von etwa 40 % zugrunde, so ergibt sich aus dem Ruß-Emissionsfaktor von 0,025 mg/(m*Pkw) ein Partikel-Emissionsfaktor von 0,06 mg/(m*Pkw), was sich mit den aus den Partikelmessungen abgeleiteten Emissionsfaktoren deckt.

3.8 Verdunstungsemissionen

In der Tabelle 6 sind die für die untersuchte Tiefgarage aus den Messungen abgeleiteten Emissionsfaktoren für die Verdunstung durch Warmabstellen und die Tankatmung den Werten gegenübergestellt, die mit Hilfe des Moduls T-emi ermittelt wurden.

Tabelle 6: Verdunstungsemissionen durch Warmabstellen infolge Tankatmung und Verdunstung aus dem kalten Antriebs- Aggregat

Komponente	Dim.	Verdunstung durch Warmabstellen		Dim.	Verdunstung durch Tankatmung (kaltes Aggregat)	
		Schichtverteilung München	nach T-emi Aus Messung abgeleitet		Schichtverteilung München	nach T-emi Aus Messung abgeleitet
Benzol	[g/Stoppp]	0,017	0,04 ± 0,01	[g/Tag+Fz]	0,006 - 0,02	0,16 ± 0,05 ³
HC	[g/Stoppp]	1,15	1,1 ± 0,3	[g/Tag+Fz]	0,43 - 1,3	2 ± 0,6

Wie man der Tabelle 6 entnimmt, stimmen die berechneten HC-Emissionsfaktoren der Verdunstungsemission für das Warmabstellen innerhalb der Fehlerbreite gut mit den aus den Messungen abgeleiteten Ergebnissen überein. Bei Benzol werden jedoch aus den Messungen etwa um einen Faktor 2 höhere Werte abgeleitet. Das könnte dadurch erklärt werden, daß der Benzol- Anteil im Benzin des Pkw-Kollektivs in der untersuchten Garage nicht wie im bundesdeutschen Mittel 1,5 Vol %, sondern 2,5 bis 3 Vol % beträgt. Das bei der Messung beobachtete Benzol / HC-Verhältnis beträgt 4 Gewichts- % . Ein Volumenverhältnis von Benzol/Benzin von 3 Vol % entspricht dabei etwa einem Gewichtsverhältnis von 4 %. Über erhöhte Benzolgehalte im Bereich von 3 Vol % im Benzin in manchen Gegenden im bayrischen Raum wird auch von anderer Stelle berichtet. Wie man der Tabelle 4 entnimmt, liegen die aus den Messungen abgeleiteten Benzol- und HC-

³ Realistische Werte werden eher im unteren Bereich des Wertespektrums liegen

den berechneten Werten. Fremdquellen für HC und Benzol können in der untersuchten Tiefgarage ausgeschlossen werden. Es wäre möglich, daß sich im Kollektiv der parkenden t-

bemerken, daß es sich hierbei nicht um ausgelaufenes Benzin (Bodenverunreinigungen) handelt, da die Quelle unmitte bar nach der Ausfahrt der letzten Pkw verschwunden war.

4 Literatur

- [1] Hassel, D. et al., TÜV Rheinland: Abgas-Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland - Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990; im Auftrag des
- [2] ä-
s-
- [3] m-
hmemethoden. VDI-
- [4] Umwelt Nr. 255 -Luft; herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz (BUWAL); Bern 1995
- Keller, M. et al.: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs; im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft Bern und des Umweltbundesamtes, Berlin 1995
- [6] Knörr, W., Höpfner, U., Lambrecht, U., Nagel, H.-J., Patyk, A. (IFEU): TREMOD: Transport Emission Estimation Model; im Rahmen des Forschungsvorhabens „Daten- und Rechenmodell: 1980 bis 2020,“; im Auftrag des Umweltbundesamtes; Berlin 1998
- [7] Kühling, W.: Planungswerte für die Luftqualität. Entwicklung von Mindeststandards zur Vorsorge vor schädlichen Immissionen als Konkretisierung der belange empfindlicher Raumnutzung. Schriftenreihe Landes und Stadtentwicklung des Landes NRW Band 4.045., 1986
- LAI (1993): Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen. Materialienband II. Länderausschuß für sseldorf.
- Rabl, P.: Schadstoffmessungen in einer Tiefgarage – Rückschlüsse auf das Emissionsverhalten von Pkw. 31. Meßtechnisches Kolloquium, 1996, Wernigrode.

- [10] Zenger A., Rühling A und Bächlin W.: Tracergasuntersuchungen zu naturgetreuen Simulation von atmosphärischen Transport- und Mischungsvorgängen. Staub- Reinhaltung der Luft 54, Springer Verlag, 1994.
- [11] Zenger A.: Einfaches Rechenverfahren zur Abschätzung zeitlicher Variationen der Innenraumkonzentrationen luftgetragener Schadstoffe. Boden, Wasser, Luft 7/8 1997.
- [12] Zenger A.: Luftqualität in und um Tiefgaragen. Immissionsschutz, 4, 1998.
- [13] I. Schaefer, S. Luther: Der Einfluß eingebauter Garagen auf die Innenraumluft von Wohnungen, Gefahrstoffe - Reinh. der Luft 58 (1998) S. 307 - 312
- [14] D. Marchl, P.Plieninger: Verkehrsbedingte Innenraumluftbelastungen, VDI Berichte Nr. 12/1996 S. 469-481
- [15] W. Heinrich: Immissionsuntersuchungen auf Benzol im Nahbereich einer Wohnanlage mit Tiefgarage - eine Fallstudie, Gefahrstoffe - Reinh. der Luft 57 (1998) S. 429 - 431.
- [16] Kühling W. / Peters H.-J., Die Bewertung der Luftqualität bei Umweltverträglichkeitsprüfungen, Verlag Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur, Dortmund, 2. Aufl. 1994.
- [17] Koch E.: Ableitung von Beurteilungswerten für luftverunreinigende Immissionen - aus der Arbeit des Unterausschusses "Wirkungsfragen" des Länderausschusses für Immissionsschutz.

Gefördert mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt