

Luftqualität in und um Tiefgaragen

Prof.Dr.rer.nat. Axel Zenger
FH Mainz
Umweltschutz im Bauwesen

Zusammenfassung

Durch die Emissionen der ein- und ausfahrenden Pkw reichern sich die Schadstoffe CO, NO₂, Benzol und Ruß in der Innenraumluft von Tiefgaragen stark an. Abhängig von der Belegungszahl und der Luftwechselrate können hierdurch hohe Immissionskonzentrationen erreicht werden. Im Rahmen dieses Artikels wird gezeigt, welcher Luftwechsel im Hinblick auf den Schadstoff CO bei verschiedenen Belegungsraten und Garagengrößen gefordert ist, wie hoch die Immissionen anderer Schadstoffe ansteigen können und wie die Luftqualität in der Umgebung von Tiefgaragen durch deren Emissionen beeinflusst werden kann. Es zeigt sich, daß die Luftqualität in Tiefgaragen als bedenklich zu werten ist, wenn Personen der Luft ständig ausgesetzt sind. Aber auch in der näheren Umgebung von den Abluftöffnungen der Tiefgarage muß, je nach Umgebungsbebauung, mit vergleichsweise hohen Immissionskonzentrationen gerechnet werden.

Einleitung

Für geschlossene Pkw-Garagen gelten lufthygienische Sicherheitsvorschriften. Nach den Gesetz- und Verordnungsblättern der Bundesländer muß in Kfz-Garagen gewährleistet sein, daß die Kohlenmonoxid (CO)- Konzentration im Mittel nicht mehr als 100 ppm beträgt. Dies gilt über einen Zeitraum von einer Stunde, und zwar auch bei den zu erwartenden Verkehrsspitzen. Kohlenmonoxid (chemische Abkürzung 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. Um die geforderte Immissionskonzentration für CO von 100 ppm einzuhalten, ist für geschlossenen Garagen eine mechanische Lüftungsanlage vorgeschrieben. Im Rahmen dieses Artikels soll gezeigt werden

- welcher Luftwechsel im Hinblick auf den Schadstoff CO bei verschiedenen Belegungsraten und Garagengrößen gefordert ist um den Wert von 100 ppm sicher zu unterschreiten
- wie hoch die Immissionen anderer Schadstoffe ansteigen können, auch wenn der Kohlenmonoxid-Leitwert eingehalten ist
- wie die Luftqualität in der Umgebung von Tiefgaragen durch deren Emissionen beeinflusst werden kann

Schadstoffe in den Kfz-Abgasen

Verbrennungsgetriebene Kraftfahrzeuge emittieren eine Vielzahl unterschiedlichster Schadstoffe. Neben den klassischen lufthygienisch relevanten Schadgasen Kohlenmonoxid (CO), Stickoxid (NO_x) und Schwefeldioxid (SO₂) treten in den letzten Jahren wegen der kanzerogenen Wirkung vor allem auch die Abgaskomponenten Benzol, Ruß und PAK (polyzyklische aromatische Kohlenstoffe) in den Vordergrund der Betrachtung. Die gesundheitlichen Auswirkungen der einzelnen Abgaskomponenten sind dabei sehr unterschiedlich.

- Maßgeblich für die Toxizität des Kohlenmonoxids (CO) ist seine Reaktion mit dem Hämoglobin zu Carboxyhämoglobin (COHb) und der dadurch gehemmte Sauerstofftransport im Blut. Eine Vielzahl von Agenzien läßt die Toxizität von CO ansteigen. Kombinationswirkungen mit NO_x und Kohlenwasserstoffen werden vermutet. Toxikologisch relevant sind kurzzeitige Konzentrationsspitzen. Der MAK-Wert von CO liegt bei 30 ppm, das sind 35 mg/m³. Als Mindeststandard für die Luftqualität leitet Kühling (1986) einen ½Stundenwert von 20 mg/ m³ ab.

Der Beurteilungswert für die Luftqualität in Tiefgaragen liegt mit 100 ppm, entsprechend 116 mg/m³ verglichen hierzu recht hoch.

- Unter dem Begriff der Stickoxide (NO_x) werden die Verbindungen NO und NO₂ verstanden. Hierbei steht das NO₂ bezüglich der gesundheitlichen Beeinträchtigung im Vordergrund. Das reaktive Reizgas wird zu 80-90% im Atemtrakt absorbiert wodurch es an den Schleimhäuten des Atemtraktes zu Reizungen kommen kann. Erhöhte Empfindlichkeiten bezüglich Infektionen sind im Tierversuch schon bei kurzzeitiger Exposition belegt. Ausgehend von Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation WHO gibt Kühling (1986) einen ½- h Mindeststandard von 200 µg NO₂/m³ an. Nach dem §40.2 des 23. BImSchG ist der 98-Perzentilwert von NO₂ auf 160 µg/m³ begrenzt.
- Benzol beeinträchtigt das blutbildende System, die krebserregende Wirkung ist unumstritten. Da es für kanzerogene Substanzen keine als unbedenklich geltende Immission gibt, existiert für Benzol auch kein MIK- oder MAK-Wert. Als Beurteilungsgrößen für krebserregende Stoffe werden für Benzol, ebenso wie für Ruß wegen des Summationseffektes Langzeitmittelwerte und nicht kurzzeitige Spitzen herangezogen. Im Hinblick auf den Benutzer einer Tiefgarage, der sich nur wenige Minuten innerhalb der Parkzone aufhält, sind hohe Benzol- und Rußimmissionen nur wenig relevant. Für Personen, die jedoch im Bereich der Tiefgarage arbeiten (Kassen) und für alle, die der Abluft häufig ausgesetzt sind (Läden im Einfahrtsbereich, Fenster in der Nähe der Abluftöffnung) haben die Benzol Immissionen jedoch eine große Bedeutung. Der Länderausschuß für Immissionsschutz (LAI, 1991) hat als Zielvorgabe einen flächenbezogenen Langzeitmittelwert für Benzol von 2,5 µg/m³ vorgeschlagen. Dieser Wert wird in der Regel in fast allen Stadtgebieten überschritten. Nach dem 23 BImSchG, §40.2 sollen verkehrslenkende Maßnahmen herangezogen werden, wenn der Jahresmittelwert der Benzolkonzentration 10 µg/m³ übersteigt¹.
- Auch Dieselruß ist eindeutig krebserregend. Es gelten daher die gleichen Aussagen wie bei Benzol. Der LAI (1991) schlägt für Dieselruß einen flächenbezogenen Langzeitmittelwert von 1,5 µg/m³ vor, nach dem 23 BImSchG, §40.2 sind verkehrslenkende Maßnahmen zu prüfen, wenn ein Jahresmittelwert von 8 µg/m³ überschritten wird.

Emissionen der Pkw in der Tiefgarage

Emissionen verbrennungsgetriebener Pkw treten in der Tiefgarage beim Fahrbetrieb, d.h. während des Ein- und Ausfahrens und für Benzol auch während des Parkens auf. Die Emissionen können mit Hilfe des „Handbuches für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (UBA, 1995) für eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrsituationen, Untersuchungsjahre, Fahrzeugkollektive und anderer Parameter ermittelt werden. Für den hier betrachteten Fall, dem Fahren in einer Tiefgarage im kalten und warmen Betriebszustand (Ausfahrt und Einfahrt) wurde aus dem Handbuch der Fahrmodus „Fahrten Innerorts mit Stop and Go“ ausgewählt, da dieses Fahrverhalten dem in der Garage am ähnlichsten ist. Die mittlere Geschwindigkeit der Pkw beträgt bei diesem Fahrmodus 5 km/h. Für das Bezugsjahr 1997, und einer typischen Pkw-Zusammensetzung entsprechend einer Stadt in den alten Bundesländern ergeben sich die in der Tabelle 1 dargestellten Emissionen.

Schadstoff	Emission im warmen Betriebszustand in mg/m	Emissionen im kalten Betriebszustand in mg/m
CO	14,4	17,5
NO _x	0,61	1,1
Partikel	0,044	0,05
Benzol	0,12	0,15

Tabelle 1: Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „Fahrten Innerorts

¹ 10 µg/m³ bzw. 8 µg/m³ gelten ab dem 1.7.1998 für Benzol bzw. Ruß, bis dahin ist ein Prüfwert von 15 µg/m³ bzw. 14 µg/m³ festgeschrieben.

mit Stop and Go“ im warmen und kalten Betriebszuständen

Für die Fahrzeuge, die aus der Tiefgarage wegfahren und länger als ca. 2 h standen, müssen kalte Betriebszustände zugrunde gelegt werden, da der Katalysator in diesem Fall aufgrund der niedrigen Temperatur nur eingeschränkt arbeitet. Werden diese „Kaltstartzuschläge“ auf eine Fahrtlänge von 4 km umgelegt², so ergeben sich die in der Tabelle 1 in der rechten Spalte dargestellten Emissionen.

Für den Schadstoff Benzol tritt neben der Emission beim Fahren auch noch eine Stillstand - Freisetzung auf. Sowohl durch die Tankatmung als durch die Verdampfungsemission (Abstellen des Fahrzeugs mit warmen Motor) treten Benzolfreisetzungen auf. Die Tankatmung wurde für den betrachteten Fall mit Hilfe des Handbuches für Emissionsfaktoren mit 0.028 g/d/Fahrzeug, die Verdunstungs - Emission des warm abgestellten Pkw mit 0.022 g pro Abstellvorgang angesetzt.

Beispiel

Betrachtet wird eine Tiefgarage mit 360 Stellplätzen die auf 5 Ebenen untergebracht sind. Die Grundfläche der Garage soll 8100 m², die Höhe 2,3 m betragen. Das zu be- und entlüftende Volumen beträgt 19000 m³. Im Schnitt legt jeder Pkw im Parkhaus eine Fahrtstrecke von 250 m zurück.

Die CO Emission ergibt sich in der morgendlichen Stoßzeit, wenn 360 Fahrzeuge pro Stunde einfahren, mit den obigen Werten (warmer Betriebszustand) zu 360 mg/s³. Legt man eine CO- Vorbelastung von 8 mg/m³ und eine Luftwechselrate⁴ von 1 zugrunde, so ergibt sich in der Tiefgarage die in der Abb. 1 dargestellte zeitliche Entwicklung der CO - Immissionskonzentration. Der zeitliche Konzentrationsverlauf wurde mit Hilfe einer numerischen Integration der Kontinuitätsgleichung (Zenger, 1997) ermittelt.

Abb.1: Zeitlicher Verlauf der berechneten CO-Konzentration

Man erkennt, daß nach einer Stunde eine Immissionskonzentration von 53 mg/m³, das entspricht 45 ppm erreicht wird. Dies ist jedoch nicht der Gleichgewichtswert. Das heißt, bei länger andauerndem Ein- und Ausfahren mit einer Rate von 360 Pkw/h steigt die Innenraumkonzentration weiter an.

Bei einer Luftwechselrate von 1 müssen bei dem Volumen von 19.000 m³ pro Sekunde 5.3 m³ Luft abgeführt werden. Realistischer ist eine Luftwechselrate von 0.5, dann sind ca. 2.6 m³ Luft pro Sekunde auszutauschen und die Immissionskonzentration erreicht nach einer Stunde 65 mg/m³ CO, das sind 56 ppm⁵. Das bedeutet, daß der Beurteilungswert für CO von 100 ppm in Zeiten mit vielen Einfahrten auch bei einer Luftwechselrate von 0.5 weit unterschritten wird. Der MAK- und der Vorsorgewerte sind jedoch deutlich überschritten.

Es stellt sich die Frage, wie die Immissionskonzentrationen anderer Schadstoffe zu beurteilen sind. Mit einer Emission von 3 mg/s Benzol durch den Fahrbetrieb, einer mittleren Emission durch die Tankatmung von 0.06 mg/s⁶ bzw. das Warmabstellen von 0.3 mg/s⁷ erhält man eine Benzolfreisetzung in der Tiefgarage von etwa 3,4 mg/s. Mit einer Luftwechselrate von 1 ergibt sich ein zeitlicher

² Dies ist eine konservative Annahme

³ bei der Ausfahrt aller Pkw würde die Emission aufgrund des Kaltstartzuschlags um ca. 15 % höher liegen.

⁴ Eine Luftwechselrate von 1 bedeutet, daß durch die Lüftung pro Stunde einmal das gesamte Luftvolumen der Garage ausgetauscht wird.

⁵ Der Gleichgewichtswert unterscheidet sich bei den Luftwechselraten 0,5 und 1 um einen Faktor 2, Durch die unterschiedlichen Luftwechselraten wird dieser Wert jedoch zu unterschiedlichen Zeiten erreicht, so daß die Immission nach einer Stunde nur um etwa 20% differieren.

⁶ In dieser Stunde im Mittel 180 Fahrzeuge a 0,028 g/Fahrzeug/d

⁷ In dieser Stunde im Mittel 180 Fahrzeuge a 0,022 g/Pkw/Abstellvorgang. Die Emission bezieht sich auf einen Zeitraum von 4 h.

Konzentrationsanstieg entsprechend der Abb. 2. Nach einer Stunde wird eine Benzolimmission von ca. 0.4 mg/m^3 erreicht.

Abb.2: Zeitlicher Verlauf der berechneten Benzol-Konzentration in der Tiefgarage

Dies liegt deutlich über den Vorgabewerten eines Langzeitmittelwertes von $10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Im Hinblick auf den Benutzer der Tiefgarage, der sich nur wenige Minuten innerhalb der Parkzone aufhält, sind derart hohe Benzolimmissionen jedoch nur wenig relevant. Dies gilt hingegen nicht für Bedienstete oder andere, der Abluft ständig ausgesetzte Personen. Die Gleichgewichtskonzentration liegt z.B. für den Fall, daß im Mittel nur 45 Pkw pro Stunde ein- und ausfahren und die Garage halb besetzt ist, bei einer Luftwechselrate von 1 bei ca. $230 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Für NO_x ergeben sich die Emissionen für den beschriebenen Fall zu 15 mg/s . Mit einer Luftwechselrate von 1 stellt sich nach einer Stunde eine Immissionskonzentration von $1,8 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ ein. Emittiert wird von den Pkw im wesentlichen NO , das sich zu dem toxikologisch relevanten NO_2 umwandelt. Die Umwandlungsrate ist vor allem von der NO_x -Konzentration abhängig und ergibt sich im vorliegenden Fall zu etwa 0.1 (Romberg et al., 1996). Das bedeutet, daß man in der Tiefgarage mit einer NO_2 -Konzentration von ca. $180 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ rechnen muß.

Sehr hohe Innenluft-Immissionen ergeben sich auch für Dieselruß. Mit einer Emission von $1,1 \text{ mg/s}$, einer Vorbelastung von 0.005 mg/s und einer Luftwechselrate von 1 muß man nach einer Stunde Immissionskonzentrationen von ca. 0.14 mg/m^3 erwarten.

Abluft der Tiefgarage

Nachfolgend soll gezeigt werden, daß die aus einer Tiefgaragen freigesetzten Emissionen auch in der näheren Umgebung des Freisetzungsortes zu relevanten Immissionen führen können. Betrachtet wird das schon beschriebene Beispiel einer Tiefgarage mit 360 Stellplätzen und einer mittlere Fahrlänge der Pkw von 250 m innerhalb der Garage. Es wird angenommen, daß die gesamte Abluft aus einem $4 \times 3 \text{ m}$ großen Portal in eine 10 m breite und 13 m tiefe Straßenschlucht abgeleitet wird. Die Lage des Portals sowie die Form der Straßenschlucht ist in der Abb. 3 dargestellt. Untersucht wird erneut die Stunde in der 360 Pkw pro Stunde einfahren. Die Benzol-Emission beträgt dann, wie im vorigen Abschnitt abgeleitet, $3,4 \text{ mg/s}$.

Abb. 3: Lageplan der Straßenschlucht und des Portals der Tiefgarage. Das Untersuchungsgebiet wird aus südwestlicher Richtung mit einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s angeströmt

Für die Windrichtung Südwest (diagonal zur positiven x- und y-Achse in der Abb.3) und eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s in 10 m Höhe wurde die Umströmung der Gebäude und anschließend die Ausbreitung der Tiefgaragenabluft in der Straßenschlucht berechnet. Hierfür wurde das prognostische Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKM⁸ (Eichhorn, 1989) verwendet. In Straßenschluchten finden sich, verglichen zu einer freien Anströmung sehr ungünstige Verdünnungsverhältnisse, besonders wenn sich die Quelle, wie im vorliegenden Fall, an der Luvseite der Schlucht befindet. Der Grund hierfür ist, daß sich in der Schlucht ein Strömungswirbel ausbildet, der einen Teil der Luft mehrfach zirkulieren läßt wobei sich die Schadstoffe anreichern. Die Strömung ist dabei bodennah entgegen der freien Anströmung gerichtet (Abb.4).

⁸ Version 3.4 1997

Abb.4: Strömungsfeld innerhalb der Straßenschlucht. Anströmung von links.

Das Strömungsfeld bestimmt die Ausbreitung und Verdünnung der aus dem Portal (bei $x=28$ m) freigesetzten Abluft. In der Abb.5 ist die räumliche Verteilung der Benzolimmissionen in der horizontalen (x,y-) Ebene in 2 m Höhe dargestellt.

Abb.5: Flächenhafte Darstellung der Benzolkonzentration in der Straßenschlucht in 2 m Höhe. Die Lage des Portals ist mit Pfeilen verdeutlicht.

Wie man aus der Abb. 5 erkennt, treten bei der untersuchten Anströmrichtung und –geschwindigkeit bis in 20 m nördlich der Ausfahrt noch Konzentrationen von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und mehr auf. Die höchsten Immissionen finden sich aufgrund des Strömungs-Wirbels bodennah auf der Luv⁹- , d.h. auf der Westseite der Straßenschlucht. Durch die Südkomponente des Windes (225 Grad) setzen sich die höheren Konzentrationen auf der Westseite der Straße in nördlicher Richtung fort. Um die Konzentrationsverteilung im Bereich der Maxima zu analysieren, sind in der Abb. 6 die Immissionen in der Straßenschlucht in einer vertikalen (y,z-) Ebene direkt hinter dem luvseitigen Gebäude dargestellt. Diese Untersuchungsebene ist in der Abb.3 mit eingezeichnet.

Abb.5: Flächenhafte Darstellung der Benzolkonzentration in einer vertikalen Ebene in der Straße direkt neben dem westlichen Gebäude.

Das Portal der Tiefgarage erstreckt sich in der y-Richtung von $y=40$ m bis $y=44$ m. In diesem Bereich treten verständlicherweise die höchsten Immissionen auf. Durch das Strömungssystem in der Straßenschlucht wird die Abluft nach Norden (Südkomponente des Windes) und in die Höhe verfrachtet. Wie man aus der Abbildung erkennt, wird die gesamte nördlich angrenzende Fassade des Gebäudes beaufschlagt. Bis in 10 m Höhe wurden Benzolkonzentrationen von mehr als $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet.

Die angegebenen Ergebnisse gelten für den Fall in der morgendlichen rush hour, wenn innerhalb von einer Stunde 360 Pkw in die Tiefgarage einfahren. Geht man davon aus, daß im Mittel nur 45 Pkw pro Stunde ein- und ausfahren und die Garage durchschnittlich nur zu 50% besetzt ist, so berechnet sich die Benzol-Emission wie folgt:

$$\begin{aligned}
 45 \text{ Pkw/h} * 0,12 \text{ mg/m/Pkw} * 250 \text{ m} / 3600 \text{ s} &= 0,375 \text{ mg/s} \\
 45 \text{ Pkw/h} * 0,15 \text{ mg/m/Pkw} * 250 \text{ m} / 3600 \text{ s} &= 0,47 \text{ mg/s} \\
 180 \text{ Pkw} * 0,028 \text{ g/24 h} / 3600 \text{ s} &= 0,06 \text{ mg/s} \\
 4 \text{ h} * 45 \text{ Pkw} * 0,022 \text{ g/h} // 4 \text{ h} / 3600 \text{ s} &= 0,27 \text{ mg/s}
 \end{aligned}$$

Die Gesamtemission ergibt sich als Summe zu 1.2 mg/s . Die Benzol Innenraum-Gleichgewichtskonzentration in der Tiefgarage beträgt bei einer Luftwechselrate von 0.5 nun $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Den in den Abb. 5 und 6 dargestellten Ergebnissen lag eine Emission von 3.4 mg/s zugrunde. D.h. im Mittel wird die Emission und damit auch die Immission maximal nur ein Drittel so hoch sein, wie in Abb. 5 und 6 dargestellt. Berücksichtigt man weiterhin, daß nordwestliche bis südwestliche Winde, je nach Standort, in nicht mehr als etwa 60 % der Zeit auftreten, so reduzieren sich die Immissionen zusätzlich. Die Emissionen der Tiefgarage sind in der unmittelbaren Umgebung der Abluftöffnung dennoch als sehr relevant einzuschätzen. Da in Stadtgebieten durch den Kfz-Verkehr eine hohe Benzol -

⁹ die Luvseite ist die dem Wind zugewandte, die Leeseite die dem Wind abgewendete Seite

Vorbelastung von ca. $5\mu\text{g}$ bis etwa $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ besteht, ist eine Überschreitung der Richt- und Grenzwerte in der näheren Umgebung der Abluftportale von Tiefgaragen sehr wahrscheinlich. Das gleiche gilt auch für die NO_2 - und Ruß- Immissionen. Eine genaue Aussage kann für jeden Einzelfall jedoch nur durch eine Detaillanalyse unter Berücksichtigung der bestehenden Bebauung, Belegungszahlen und Meteorologie getroffen werden.

Literatur:

- J.Eichhorn, 1989: Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima – Modells. Dissertation Universität Mainz. 1989.
- W. Kühling, 1986: Planungsrichtwerte für die Luftqualität. Schriftenreihe Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Band 4.045, 1986
- LAI, 1991: Beurteilungsmaßstäbe zur Begrenzung des Krebsrisikos durch Luftverunreinigungen. Abschlußbericht der Arbeitsgruppe „Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen“ des Länderausschusses für Immissionsschutz.
- E.Romberg, R.Bösinger, A.Lohmeyer, R.Ruhnke, E-P.Röth, 1996: NO-NO₂-Umwandlung für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 56. 215-218. Springer 1996.
- UBA , 1995: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Umweltbundesamt Berlin
- A.Zenger, 1997: Einfaches Rechenverfahren zur Abschätzung zeitlicher Variationen der Innenraumkonzentrationen luftgetragener Schadstoffe. Boden, Wasser, Luft 7/8 1997