

# **STAND UND AKTUELLE ENTWICKLUNG BEI DER LÜFTUNG UND ENTRAUCHUNG VON STRASSEN- UND BAHNTUNNELN IN MITTELEUROPA**

STUVA-Tagung '03 Westfalenhalle Dortmund 8. bis 11. Dezember 2003

*Dr. Matthias Wehner  
HBI HAERTER AG  
Heinrich-Maier-Str. 13  
D - 89518 Heidenheim  
Deutschland*

*Dr. Peter Reinke  
HBI HAERTER AG  
Thunstrasse 9  
CH - 3000 Bern 6  
Schweiz*

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Die Anforderungen an Lüftungsanlagen in Straßen- und Bahntunneln sind für den Tunnelbau und -betrieb bedeutsam. Ausgehend von den Randbedingungen und Funktionen der Belüftung werden die Eigenschaften der Belüftungssysteme erläutert. Die Anforderungen und Entwicklungstendenzen in Deutschland werden zusammengefasst und mit dem Stand in benachbarten europäischen Ländern verglichen.

Der Verbesserung der Sicherheit im Brandfall durch eine Tunnellüftung wird heute eine weit- aus höhere Bedeutung zugemessen als noch vor wenigen Jahren. Dem gegenüber verliert im Straßentunnel die für den Normalbetrieb installierte Lüftung aufgrund der abnehmenden Fahrzeugemissionen an Bedeutung. Wurden Bahntunnel bis vor kurzem kaum mit Tunnellüftungen ausgerüstet, so sind diese bei vielen internationalen Neubauprojekten von vornherein vorgesehen. In komplexen Nahverkehrstunneln werden zunehmend Lüftungs- und zum Teil Kühleinrichtungen zur Verbesserung des Klimas in den Haltebahnhöfen und Tunneln installiert.

## **RANDBEDINGUNGEN UND FUNKTIONEN DER TUNNELLÜFTUNG**

Ein zunehmender Anteil des Personen- und Gütertransportes findet in Tunneln und geschlossenen Verkehrsanlagen statt. Systembedingt ist in diesen Bauwerken der Luftwechsel mit der freien Umgebung begrenzt. Er muss häufig durch bauliche und/oder ausrüstungstechnische Maßnahmen verbessert werden. Die Aufgaben und die Ausführung einer natürlichen oder mechanischen Tunnellüftung werden durch viele Randbedingungen beeinflusst.

Die Auswahl des jeweils günstigsten Lüftungssystems für einen bestimmten Bahn- oder Straßentunnel hängt ab von:

- den betrieblichen Erfordernissen,
- der Lage und Baumethode,
- den Platzverhältnissen für Lüftungsanlagen und -zentralen,
- den Sicherheitsaspekten,
- den Unterhaltsanforderungen und
- den Investitions- und Betriebskosten.

Unter den genannten Randbedingungen hat die Tunnellüftung verschiedene übergeordnete Funktionen zu erfüllen. Zum einen soll diese die Gesundheit und die Sicherheit der Tunnelnutzer, des Unterhaltspersonals und der Umgebung gewährleisten. Zum anderen soll die Verfügbarkeit des Tunnelsystems durch den Schutz der Ausrüstung verbessert werden. Auch sollen ausreichend sichere Flucht- und Rettungswege (ausreichende Sichtweite, geringe Toxizität, niedrige Temperaturen) bereitgestellt und die Rettungsdienste geschützt werden. Schließlich sollen Sachwerte insbesondere vor langzeitiger Unbenutzbarkeit geschützt werden.

Bei den verschiedenen Betriebszuständen des Tunnelsystems sind aufgrund der genannten Funktionen die Anforderungen gemäß Tabelle 1 zu erfüllen.

## **LÜFTUNGSPRINZIPIEN UND TYPISCHE ANWENDUNGEN**

Zum Erreichen der Lüftungsanforderungen kommen verschiedene Lüftungsprinzipien zum Einsatz, die in Abbildung 1 skizziert sind.

### **Natürliche Belüftung**

#### ***Lüftungsprinzip***

Im Normalbetrieb wird der Luftaustausch durch natürliche Wirkungen (Wind, Temperatur, Kolbenwirkung der Fahrzeuge) sichergestellt. Im Brandfall findet eine Entrauchung durch den natürlichen Auftrieb des Brandes statt.

#### ***Typische Anwendungen im Straßentunnel***

Im Normalbetrieb kann insbesondere in richtungsgetretenen Straßentunneln mit einer Länge von z.B. mehr als 8 km der natürliche Luftwechsel ausreichen (z.B. Seelisbergtunnel CH). Im Brandfall kommt die natürliche Belüftung für Gegenverkehrstunnel bis 400 m und für Tunnel mit Richtungsverkehr bis 600 m in Betracht.

### ***Typische Anwendungen im Bahntunnel***

Im Normalbetrieb kann bei Einspurröhren mit Richtungsverkehr auch mit mehr als 50 km Länge ein ausreichender Luftwechsel erzeugt werden (z.B. Gotthard Basistunnel CH). Je nach Projekt kann die Tunnellänge mit ausreichender natürlicher Lüftung wesentlich kürzer sein.

Die natürliche Belüftung kommt je nach Beurteilung der Sicherheitslage prinzipiell für Bahntunnel bis ca. 20 km in Betracht. Gemäß UIC-Vorgaben sind typischerweise ab ca. 20 km Länge aufgrund der Notlaufeigenschaften der Züge belüftete Nothaltestellenbereiche zu schaffen.

### **Mechanische Längslüftung durch Strahlventilatoren oder Saccardo-Düsen**

#### ***Lüftungsprinzip***

Bei diesem Lüftungsprinzip erhalten die Luftsäulen einen Impuls, wodurch diese im Tunnel bewegt werden. Schadstoffe bzw. Rauchgase werden einseitig abgeführt. Üblicherweise werden die Strahlventilatoren reversibel ausgeführt, so dass beide Strömungsrichtungen realisiert werden können.

Durch Betrieb von Strahlventilatoren oder Saccardo-Düsen in Gegenrichtung kann eine Luftsäule gegenüber der Umgebung oder einer parallelen Tunnelröhre auf Überdruck gesetzt werden. Durch diesen Lüftungsbetrieb können geöffnete Querschläge sowie Flucht- und Rettungsstollen belüftet und im Brandfall rauchfrei gehalten werden.

### ***Typische Anwendungen im Straßen- und Bahntunnel***

Dieses einfache und kostengünstige Lüftungssystem wird insbesondere in kurzen Straßentunneln mit Richtungsverkehr und für Bahntunnelstrecken eingesetzt.

Generell besteht bei Längslüftungen die Problematik, dass in Gegenverkehrstunneln im Brandfall der Rauch in die ungünstige Richtung abdrängt werden kann, d.h. in Tunnelbereiche, in denen sich Personen befinden.

### **Mechanische Längslüftung durch Mittenabsaugung oder Mittenzuluft**

#### ***Lüftungsprinzip***

Die Luftsäule im Tunnel wird durch lokalen Ab- oder Zuluftbetrieb über einen Schacht bewegt. Die anfallenden Schadstoffe bzw. Rauchgase werden bis zur Mitte befördert und dort in die Umgebung ausgestoßen. Bei Mittenzuluft ist die Strömungsrichtung umgekehrt. Bei mehreren parallelen Röhren kann durch gleichzeitigen Zu- und Abluftbetrieb in den verschiedenen Röhren eine Druckdifferenz geschaffen werden, um geöffnete Querschläge sowie Flucht- und Rettungsstollen im Brandfall rauchfrei zu halten.

### ***Typische Anwendungen im Straßentunnel***

Die Längsbelüftung durch eine Mittenabsaugung stellt eine Alternative zum Längslüftungssystem mit Strahlventilatoren dar. Ein Nachteil gegenüber der Längsbelüftung mit Strahlventilatoren ist, dass bei asymmetrischen Richtungsanteilen des Fahrzeugverkehrs ein Tunnelast überlüftet wird, während der andere unterlüftet sein kann.

### ***Typische Anwendungen im Bahntunnel***

Eine Mittenabsaugung kommt bei den Bahnen in den Tunnelstrecken und innerhalb der Stationen zum Einsatz. Durch kombinierte Zu- und Abluft lassen sich bei zwei parallelen Bahnröhren Differenzdrücke zwischen den Röhren schaffen und somit in offenen Querschlägen Luftströmungen in die gewünschte Richtung herstellen.

## **Mechanische Längslüftung und Rauchabsaugung im Brandfall**

### ***Lüftungsprinzip***

Die Luftsäule wird im Normalbetrieb mit Hilfe von Strahlventilatoren bewegt. Im Brandfall kann durch geregelte Leistung der Längslüftung die Geschwindigkeit der Luftsäule stabilisiert und brandnah der Rauch abgeführt werden.

### ***Typische Anwendungen im Straßentunnel***

Dies ist ein heute aktuelles Standardlüftungssystem für Straßentunnel mittlerer Länge. Im Normalbetrieb werden die Schadstoffe einseitig über die Portale abgeführt. Im Brandfall kommt die Rauchabsaugung über ansteuerbare Brandfallklappen in der Zwischendecke zum Einsatz. Die Rauchabsaugung wird üblicherweise auf einen Bereich von 200 bis 300 m begrenzt. Durch den Einsatz der Strahlventilatoren werden symmetrische Anströmungsbedingungen im Fahrraum von beiden Seiten angestrebt.

### ***Typische Anwendungen im Bahntunnel***

Eine Rauchabsaugung mit Hilfe von Kanälen im Bahntunnel ist unüblich. In Stationen sind bei einzelnen Neubauprojekten verzweigte Kanalsysteme zur möglichst brandnahen Rauchabsaugung vorgesehen. Der Absaugort wird durch entsprechende Steuerung von Klappen festgelegt. In thermisch belasteten U-Bahnstationen kann ebenfalls eine verteilte Luftabsaugung vorgesehen werden.

## **Mechanische Halb- oder Vollquerlüftung**

### ***Lüftungsprinzip***

Die Frischluft wird über den Fahrraum, einen separaten Kanal oder einen Schacht in den Tunnel gefördert. Die Abluft oder der Rauch wird ortsnah abgesaugt und über einen separaten Kanal oder Schacht aus dem Tunnel abgeführt.

### ***Typische Anwendungen im Straßentunnel***

Dieses traditionell für lange Straßentunnel, insbesondere mit Gegenverkehr, vorbehaltene System ermöglicht einen Austausch der Luft weitgehend unabhängig von der Längsgeschwindigkeit im Tunnel. Die verteilt eingebrachte Luft wird wiederum verteilt abgesaugt. Je nach Verhältnis der Zuluftmenge zur Abluftmenge sind Zwischenlösungen bis zur reinen Halbquerlüftung ohne Absaugung realisierbar. In diesem Fall strömen die Schadstoffe über die Portale ab.

### ***Typische Anwendungen im Bahntunnel***

Querlüftungssysteme werden in Bahntunnelstrecken nicht eingesetzt. Für Stationsbelüftungen hingegen werden Halbquerlüftungen mit möglichst brand- oder abluftnahen Absaugorten vorgesehen

In klimatisch warmen Regionen der Welt kommt die Querlüftung in den Stationen z.B. von U-Bahnen zum Einsatz. Kühle Luft wird zum Beispiel im Bodenbereich der Züge bzw. unterhalb der Bahnsteige zugeführt und Warm- und Abluft (Kühlluft der Züge) im Deckenbereich der Stationen wieder abgezogen. Die Luftabsaugung dient ebenfalls zur Rauchabfuhr im Brandfall.

Gemäss Abbildung 1 sind a) die natürliche und b) bis e) die mechanische Lüftung und Entrauchung zu unterscheiden. In Tabelle 2 sind die zu erwägenden Vor- und Nachteile einer mechanischen gegenüber der natürlichen Lüftung insbesondere im Hinblick auf den Ereignisfall aufgeführt.

## **AKTUELLE ENTWICKLUNGEN FÜR NORMAL- UND EREIGNISBETRIEB VON STRAßENTUNNELN IN DEUTSCHLAND UND MITTELEUROPA**

### **Normalbetrieb**

Die Auslegung der Tunnellüftung für den Normalbetrieb ist in den letzten Jahren durch die stark sinkenden Fahrzeugemissionen gekennzeichnet. Gemäß Abbildung 2 ist dieser Trend auch für die kommenden Jahre absehbar. Dargestellt sind die Kohlenmonoxid- und Sichttrübe-Emissionen eines durchschnittlichen Einzel-Fahrzeuges bei einer Fahrt mit 60 km/h in der Ebene. In das durchschnittliche Fahrzeug ist ein Anteil von 20 % dieselbetriebenen Pkw und ein Anteil von 10 % Lastwagen mit einem mittleren Gewicht von 30 t eingerechnet. Es wird die voraussichtliche Entwicklung der Emissionen nach der Neufassung der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) von 2003 [1], den aktualisierten Emissionen in der neuen schweizerischen Richtlinie [2] und der österreichische Emissionsbasis [3] aufgezeigt. Nach diesen Prognosen kann für die heute maßgebenden Sichttrübeemissionen eine Reduktion in den nächsten 10 Jahren um rund 60 % (Deutschland und Schweiz) bzw. um 40 % (Österreich) vorausgesagt werden.

Für die Beurteilung der Luftqualität in Straßentunneln wird heute meist die Sichttrübung durch Partikel verwendet. Hierbei wird neuerdings neben dem Dieselruß auch der Reifenabrieb berücksichtigt. Die CO-Konzentrationen als Bemessungswert verlieren demgegenüber zunehmend an Bedeutung. So werden in schweizerischen und deutschen Tunneln üblicherweise erst ab einer Meereshöhe von 800 m CO-Messstellen vorgesehen. Ab dieser Höhe ist der Anstieg der CO-Emissionen markant. Dieses wird in Abbildung 2 deutlich, in der die Höhenfaktoren für die CO-Emissionen von Pkw und Lkw nach RABT 2003 [1] dargestellt sind.

Die für den Normalbetrieb notwendige Frischluftmenge zur Verdünnung der Schadstoffe ist in den meisten Fällen bereits heute deutlich kleiner als die im Brandfall notwendige Luftmenge. Diese Differenz wird in Zukunft noch zunehmen. Damit verbunden ist eine mögliche deutliche Reduktion der installierten Lüftungsleistung für den Normalbetrieb. Bei Systemen, in denen für den Brandfall und den Normalbetrieb die gleichen Einrichtungen verwendet werden, ist die für den Normalbetrieb erforderliche Lüftungsleistung normalerweise durch die Brandfalllüftung abgedeckt. Durch diese Tendenz werden immer einfachere Lüftungssysteme für den Normalbetrieb in immer längeren Tunneln möglich.

Bisher war häufig eine stationäre Betrachtungs- und Berechnungsweise üblich. Mit abnehmenden Luftmengen muss allerdings den instationären Vorgängen mehr Beachtung geschenkt werden. Insbesondere gewinnen die vom Verkehr ausgehenden Druckwirkungen eine größere Bedeutung. Treten über längere Zeit in einem Tunnelabschnitt zu kleine pendelnde Längsgeschwindigkeiten im Fahrraum auf, so können sich so genannte Sichttrübungszapfen bilden. In der RABT 2003 werden diese Fragestellungen durch eine Faustformel abgedeckt, indem für Längslüftungen eine erreichbare Mindestgeschwindigkeit der Längsströmung im Fahrraum von 1 m/s und für Halbquer- und Querlüftung mindestens vier Luftwechsel pro Stunde gefordert werden.

### **Sicherheit im Brandfall**

Die Sicherheitsanforderungen für den Brandfall wurden nach den gravierenden Tunnelbränden in den Straßentunneln Montblanc (24.3.1999), Tauern (29.5.1999) und Gotthard (24.10.2001) in den Richtlinien in Deutschland [1], Österreich [4] und der Schweiz [2] deutlich angehoben.

Dieses hat eine unmittelbare Auswirkung auf die Dimensionierung der Lüftungstechnischen Einrichtungen. Insbesondere hat die Planungstiefe stark zugenommen. So wird neben der Planung der Ausrüstung insbesondere die Ansteuerung der Anlagen im Brandfall aufgrund von Lüftungstechnischen Überlegungen detailliert spezifiziert und im Rahmen von Szenarien-Untersuchungen verifiziert.

### **Aktuelle Anforderungen im Brandfall in deutschen Straßentunneln**

Der Ablauf eines Brandes kann hinsichtlich des Einsatzes der Lüftung in zwei Phasen eingeteilt werden (vgl. PIARC 1999 [5]).

1. Rettungsphase: Während der Selbstrettung flüchten die Betroffenen selbstständig vom Brandort. Nach dem Eintreffen der Feuerwehr und Rettungskräfte vor Ort unterstützen diese die Personenrettung, insbesondere von Verletzten und behinderten Personen.
2. Brandbekämpfungsphase: Die Rettung von Personen im Tunnel ist abgeschlossen. Der automatische Lüftungsbetrieb der Rettungsphase wird durch den manuellen Betrieb abgelöst.

Während der Personenrettung wird eine kleine Luftgeschwindigkeit im Fahrraum ohne Strömungsumkehr angestrebt, um eine vorhandene Luft-/Rauchschichtung möglichst lange zu erhalten. Strahlventilatoren im Bereich der Luft-/Rauchschichtung dürfen nicht eingeschaltet werden.

In der Brandbekämpfungsphase soll der Feuerwehr der einseitige Zugang zum Brandherd ermöglicht werden. Hierzu ist eine Mindestgeschwindigkeit der Luft im Tunnel notwendig, die ein Rückströmen von Rauch ausschließt. Diese wird als "kritische Geschwindigkeit" bezeichnet.

## **AKTUELLE ENTWICKLUNGEN FÜR NORMAL- UND EREIGNISBETRIEB VON BAHNTUNNELN IN DEUTSCHLAND UND MITTELEUROPA**

### **Allgemeine Bemerkungen zu Bahntunnellüftungen**

Generell werden Bahntunnel seltener mechanisch belüftet als Straßentunnel. Dieser Unterschied erklärt sich damit, dass im Normalbetrieb aufgrund der üblicherweise elektrifizierten Strecken weniger Schadstoffe aus dem Bahntunnel abzuführen sind. Wird die Sicherheit im Brandfall beurteilt, so fällt bei den Bahntunneln die geringe Häufigkeit von Brandereignissen ins Gewicht (z.B. aufgrund der Spurführung, dem Fahren im Raumabstand, technischen Sicherheitseinrichtungen, Brandschutzanforderungen an das neuere Reisezugrollmaterial, etc.). Im Bahntunnel stehen somit Maßnahmen zur Ereignisverhinderung im Vordergrund, während in Straßentunneln gleichermaßen die Maßnahmen zur Ausmaßminderung von Ereignissen geplant werden müssen.

Die geringeren Eintrittswahrscheinlichkeiten für Brandereignisse in Bahntunneln sind mit den hier ungünstigeren Fluchtwegen abzuwägen (breite, ebene Fahrbahn bei Straßen und schlechter beleuchtete, stolperanfälliger, schmalere Fluchtwege bei Bahnen). Außerdem sind die deutlich höheren Personendichten zu berücksichtigen, die in Bahntunneln auftreten können (mehr als 400 Personen / 100 m). Schließlich stellt der zunehmende Anteil des Huckepackverkehrs (Lastwagen und deren Fahrer auf Shuttlezügen) ein zunehmendes Risikopotential dar.

### **Beispiele von Bahntunnellüftungen in Europa**

In Deutschland, Österreich und der Schweiz waren Tunnelsysteme der Fern- und Nahverkehrsbahnen bisher kaum mit mechanischen Lüftungsanlagen ausgestattet. Bei Projekten, die sich gegenwärtig in der Planungs- oder Bauphase befinden, sind vermehrt mechanische Entrauchungsanlagen, insbesondere für unterirdische Haltebahnhöfe, vorgesehen. International und bei neueren Projekten ergibt sich ein gemischtes Bild. Anhand der Beispiele in Tabelle 3 werden die Lüftungstechnischen Einrichtungen bei reinen Fernbahnen im Längenbereich 5 bis 30 km veranschaulicht.

Wie aus der Gegenüberstellung hervorgeht, werden in der Regel mechanische Längslüftungen vorgesehen, die insbesondere rauchfreie Fluchtwege über Querschläge und eine definierte Längsströmung der Luft im Bahntunnel gewährleisten sollen. Die derzeit im Bau oder in der Planung befindlichen Alpen-Basistunnel am Brenner (54 km), Gotthard (57 km), Lötschberg (35 km) und Lyon-Turin Basistunnel (53 km) sollen alle eine mechanische Lüftung aufweisen. Die Abbildung 3 zeigt typische Lüftungsprinzipien für die in Tabelle 3 aufgeführten Beispiele.

Bei Straßentunneln ist eine starke internationale Harmonisierung und Standardisierung nicht zuletzt durch das Wirken der PIARC feststellbar. Bei Bahntunneln sind sehr unterschiedliche, projektbezogene Lüftungskonzepte entstanden, da bisher kaum internationale Regelwerke für die Lüftung geschaffen wurden (vgl. [7]). Ungünstig ist hierbei, dass dadurch gewisse Planungsunsicherheiten entstehen können und zuweilen die genehmigungsbedingten Risiken größer sind als z.B. die geologischen Risiken eines Projektes.

Umfassende Maßnahmen zur mechanischen Lüftung fordert die US-amerikanische Richtlinie NFPA130 für Nahverkehrstunnel ([8]). Eine mechanische Lüftung muss vorgesehen werden für:

- jede unterirdische oder geschlossene Station
- Tunnel, die länger als 300 m sind

Ziel der NFPA130-Vorgaben ist es, die Luftbewegungen jederzeit unabhängig von den natürlichen Phänomenen beeinflussen zu können. Aus Mangel an alternativen Normenwerken kommt die Norm in Asien und Australien zur Anwendung: Auch bei europäischen U-Bahnprojekten (z.B. Kopenhagen) wurde diese Richtlinie als eine Grundlage verwendet.

### **WEITERE GENERELLE TRENDS BEI TUNNELLÜFTUNGEN**

Neue Trends in der Tunnellüftung werden momentan primär durch Anforderungen im Brandfall verursacht. Im Folgenden sind einzelne Entwicklungen schlagwortartig zusammengefasst.

- Detektion möglichst frühzeitig und zuverlässig
- Steuerung der Lüftung in Abhängigkeit von der Ereignisphase (Steuerungskonzepte für unterschiedliche Szenarien)
- Frühzeitige und vollständige Kontrolle über die Luftbewegung (Begrenzung der Luftgeschwindigkeit in Selbstrettungsphase, Rauchabfuhr in Rettungs- und Brandbekämpfungsphase)
- Möglichst brandnah und konzentriert den Rauch absaugen (steuerbare Rauchklappen, Wirbelstromabsaugung)

- Separate Flucht- und Rettungsstollen belüften
- Insbesondere bei U-Bahnen Rauchabsaugung aus Haltestellenbereichen und zuverlässige Rauchfreihaltung der Flucht- und Rettungswege
- Zunehmende Komplexität der Steuerung (Vernetzung von Tunnelleitsystem, der Stellwerktechnik, den Nebeneinrichtung wie Klappen, Türen und Toren sowie den Außenklimadaten mit den eigentlichen Lüftungsanlagen wie Ventilatoren und Klappen; Koppelung der Steuerung z.B. mit einer dynamischen Fluchtwegsignalisation)
- Mit Hilfe der Steuerung möglichst automatischer Ereignisablauf für verschiedene Szenarien
- Kombination der Lüftungsanlagen mit Einrichtungen zur Wasserverdüsung und Sprinklern
- Mobile Löschgeräte und Gebläse
- Einsatz von Rauchschürzen, Vorhängen und Toren in den Tunnelstrecken
- Intensivere Schulung des Betreiberpersonals, der Feuerwehren, der Rettungskräfte und der Tunnelnutzer

Weitere Entwicklungen betreffen:

- Lüftung bei Stausituationen zur Wärmeabfuhr (U-Bahnen mit Klimaanlage im Sommer)
- Klimatisierung unterirdischer Haltestationen; Verringerung des Energiebedarfes des Gesamtsystems
- Gezielte Abluftabfuhr in Richtung unproblematisches Portal zur Begrenzung der Immissionsbelastungen auf der gegenüberliegenden Seite
- Problematik beschlagene Scheiben
- Vernetzung mit Lüftungssteuerung der Verkehrsleittechnik / Stellwerktechnik

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei den zukünftigen Tunnellüftungen insbesondere Anforderungen aus den Bereichen Sicherheit, Reisekomfort und Betriebsvereinfachung mehr Gewicht erhalten werden.

**LITERATUR**

- [1] Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, RABT 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- [2] Lüftung der Straßentunnel; Systemwahl, Dimensionierung und Betrieb; Bundesamt für Straßen; Schweizerische Richtlinie Bereich Tunnel und Elektromechnik, Ausgabe 2001, Entwurf, Version 6.1, August 2001
- [3] Österreichische Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen, Projektierungsrichtlinien Lüftungsanlagen, Grundlagen RVS 9.261 und RVS 9.262, Ausgabe Februar 1997
- [4] Österreichische Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen, Projektierungsrichtlinien Lüftungsanlagen, Grundlagen RVS 9.261, 1. Abänderung vom 25. Januar 2001
- [5] PIARC - World Road Association, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels (C5), 1999
- [6] Eureka-Project EU 499: FIRETUN, Fires in Transport Tunnels, Report of Full Scale Tests. Ed.: Studiengesellschaft Strahlanwendung e.V. Düsseldorf, November 1995
- [7] European Thematic Network on Fires in Tunnels (FIT): [www.etnfit.net](http://www.etnfit.net)
- [8] National Fire Protection Association; NFPA 130 - Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems; 2000 Edition, 2000

## ABBILDUNGEN UND TABELLEN

<b>Betriebsart</b>	<b>Einzuhaltende Anforderungen hinsichtlich</b>
<b>Normalbetrieb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sichtweite</li> <li>- Schadstoffe (Abgase, Methan)</li> <li>- Staubgehalt (Reifenabrieb, Eisenstaub)</li> <li>- Immissionen an den Portalen und Schächten</li> <li>- Temperatur/Luftfeuchtigkeit</li> <li>- Vermeiden von beschlagenen Frontscheiben bei Einfahrt</li> <li>- Druckkomfort und aerodynamische Fragestellungen</li> </ul>
<b>Erhaltung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wie Normalbetrieb, jedoch unter Berücksichtigung der arbeitsrechtlichen und –medizinischen Anforderungen</li> </ul>
<b>Ereignisbetrieb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufrechterhaltung der Sichtweite</li> <li>- Rauchkontrolle (Erhalten der Rauchgasschichtung, Begrenzung der Rauchausbreitung)</li> <li>- Rauchverdrängung</li> <li>- Rauchabfuhr bzw. Abfuhr gefährdender Gase</li> <li>- Rauchverdünnung bzw. Verdünnung gefährdender Gase</li> <li>- Rauchfreihaltung der Rettungswege und der Notausstiege im Tunnel</li> </ul>

Tabelle 1: Wesentliche Anforderungen an die Tunnellüftung

a) **Natürliche Belüftung durch thermische, meteorologische oder fahrzeuginduzierte Strömung**

Normalbetrieb



Brandfall



b) **Längslüftung mit Strahlventilatoren**

Normalbetrieb



Brandfall

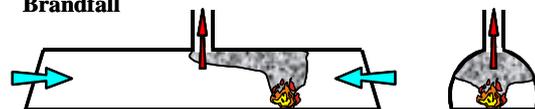


c) **Längslüftung durch Mittenabsaugung**

Normalbetrieb



Brandfall

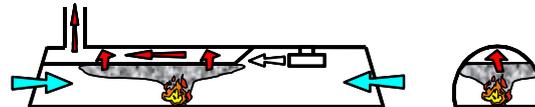


d) **Längslüftung und Rauchabsaugung**

Normalbetrieb

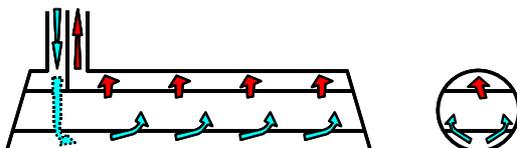


Brandfall



e) **Querlüftung**

Normalbetrieb



Brandfall

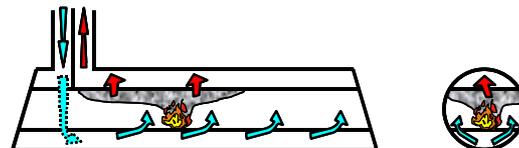
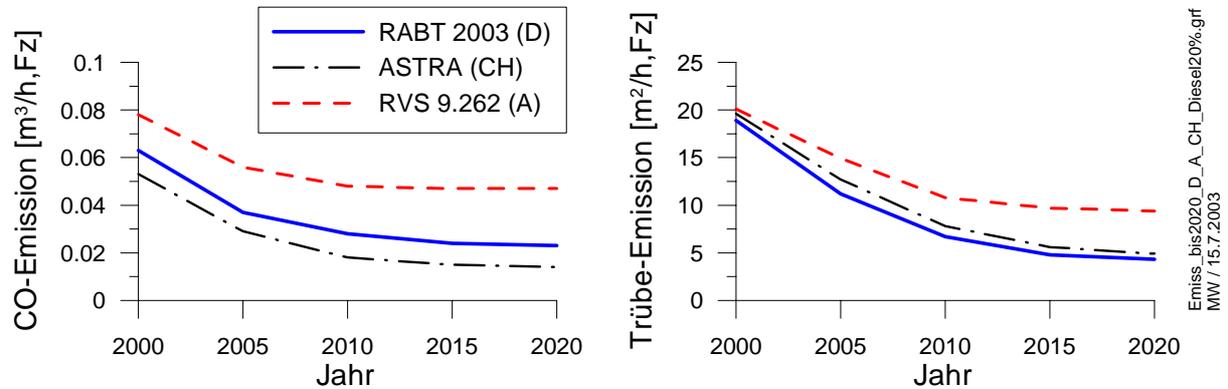


Abbildung 1: Wesentliche Belüftungs- und Entrauchungskonzepte: a) natürliche Belüftung; b) Längslüftung mit Strahlventilatoren; c) Längslüftung durch Mittenabsaugung; d) Längslüftung und Rauchabsaugung im Brandfall; e) Querlüftung.

<b>Vorteile der mechanischen Belüftung</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. kontrollierbare Rauchausbreitung unabhängig von Randbedingungen wie thermischer Auftrieb, Wetterverhältnisse, fahrzeugbedingten Strömungsverhältnissen; wirksam auch bei Kaltrauch bzw. toxischen Gasen</li> <li>2. eindeutig definierte, rauchfreie Rettungswege insbesondere innerhalb von Treppenaufstiegen und möglicher Notausstiege und Rettungswege</li> <li>3. Verkürzung der Fluchtwegdistanzen, d.h. Rettung in sicheren Bereich kann schneller ermöglicht werden - ggf. weniger Notausstiege erforderlich</li> <li>4. wirksame Unterstützung der Evakuierung großer Personendichten möglich</li> <li>5. definierter Zugang der Einsatzdienste, d.h. angenommene Zeiten bis zum Beginn der Brandbekämpfung können mit großer Zuverlässigkeit eingehalten werden</li> <li>6. effiziente Rauchabsaugung, d.h. im Gegensatz zu rein konvektiven Abluftschächten sind kleinere rauchführende Kanäle möglich, weniger Raumbedarf in innerstädtischer Lage</li> <li>7. weiträumige Rauchableitung möglich; keine Rauchrezirkulation; geringere Gefahr der Versperrung der Außenöffnungen von Kanälen (z.B. parkende Fahrzeuge)</li> <li>8. mehr architektonische Flexibilität bzgl. Anordnung von Schächten und Rauchauslässen</li> <li>9. temporärer Einsatz der Brandlüftung auch zur Verbesserung der Luftqualität in Strecken möglich (im Normal- und Unterhaltsbetrieb)</li> <li>10. hohe und erprobte Zuverlässigkeit der Lüftungsanlagen</li> <li>11. zuverlässigerer Schutz von Sachwerten (schnellere Brandbekämpfung, geringere, örtlich begrenzte Beschädigungen)</li> <li>12. geringere Temperaturbelastungen des Bauwerkes aufgrund der größeren Wärmeabfuhr</li> <li>13. in Übereinstimmung mit den geltenden Vorschriften (z.B. RABT, NFPA 130) und in der Regel unkomplizierterer Wirksamkeitsnachweis möglich</li> </ol>
<b>Nachteile der mechanischen Belüftung</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Investitionskosten für Anlagen</li> <li>2. Unterhaltskosten (Wartung, Ersatz, laufende Schulung, Strom)</li> <li>3. bauliche Investitionskosten bzw. Platzbedarf für Anlagen (Ventilatorenstationen)</li> <li>4. Gefahr der Nichtfunktion (z.B. bei Stromausfall)</li> <li>5. Gefahr der Fehlfunktion (z.B. Rauchführung in Richtung Hauptfluchtwege und Rettungsdienste)</li> <li>6. Anfachung des Brandes möglich, d.h. Erhöhung der Brandleistung denkbar; Anfachung wird allerdings in der Regel durch größere Wärmeabfuhr durch erzwungene Luftströmung kompensiert</li> </ol>

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der mechanischen Belüftung (Einsatz von Ventilatoren statt z.B. thermisch betriebenen Schächten)

1. Durchschnittliches Fahrzeug (20 % Diesel-Pkw und 10 % Lkw mit 30 t eingerechnet) bei einer Fahrt mit 60 km/h in der Ebene. Vergleich Deutschland: RABT 2003, Schweiz: ASTRA und Österreich: RVS 9.262



2. Einfluss der Höhe über Meer auf die CO-Emissionen von Pkw und Lkw nach RABT 2003 [1]

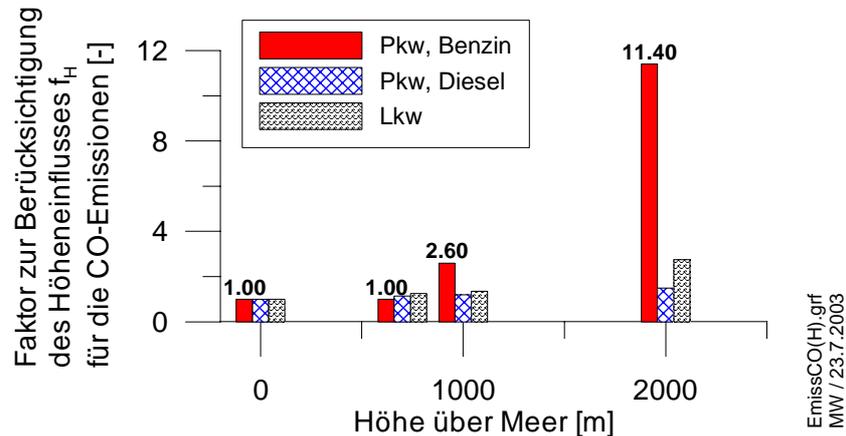
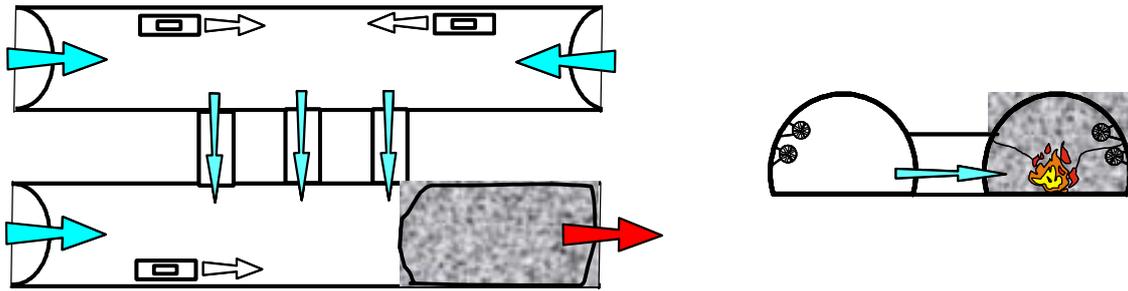


Abbildung 2: Entwicklung der Fahrzeugemissionen

	<b>Bahntunnel / Länge / System</b>	<b>Wesentliche Lüftungsmaßnahmen</b>
1.	Ceneri Basistunnel (CH) 15 km 2 x Einspurröhre für gemischten Verkehr	Gleichzeitig Mittenzu- und -abluft über Zugangsstollen und Lüftungszentrale in Tunnelmitte möglich, max. 500 m <sup>3</sup> /s Zuluft bzw. 400 m <sup>3</sup> /s Abluft; redundante Lüftung; Lüftungsziel: Erreichen der kritischen Geschwindigkeit in Brandröhre bei einem bis zu 250 MW Güterzugbrand
2.	Groenehart Tunnel (NL) 7 km 1 x Doppelspurröhre mit perforierter Trennwand für reinen Hochgeschwindigkeitsverkehr	Längslüftung durch Strahlventilatoren; belüftete Notausstiege; Lüftungsziel: Erreichen der kritischen Geschwindigkeit in Brandröhre bei einem 40 MW Reisezugbrand; Rauchfreihaltung der Fluchttüren
3.	Guadarrama Tunnel (E) 28 km 2 x Einspurröhre für reinen Hochgeschwindigkeitsverkehr	Luftzu- oder Luftabfuhr über Lüftungszentralen an beiden Tunnelseiten; Bahntunnel Tore an allen 4 Portalen der Röhren; Lüftungsziel: Erreichen einer Längslüftung bei einem 50 MW Reisezugbrand; Rauchfreihaltung der Querschläge
4.	Katzenbergtunnel (D) 10 km 2 x Einspurröhre für gemischten Verkehr	keine mechanische Lüftungsanlagen; 2 Schächte in der Nähe des Scheitelpunktes zur natürlichen Entrauchung; Lüftungsziel: Rauchabfuhr mit thermischem Auftrieb, sofern dieser zur Verfügung steht
5.	Le Perthus Tunnel (F – E) 8 km 2 x Einspurröhre für Hochgeschwindigkeitsverkehr und Güterverkehr	Strahlventilatoren in den Bahnrohren; Lüftungsziel: Erreichen der kritischen Luftgeschwindigkeit in der Bahnröhre mit 100 MW Brand; Rauchfreihaltung der Querschläge
6.	Stoerebaelt Tunnel (DK) 8 km 2 x Einspurröhre für gemischten Verkehr	Strahlventilatoren in den Bahnrohren; Lüftungsziel: Erreichen der kritischen Luftgeschwindigkeit in der Bahnröhre; Rauchfreihaltung der Querschläge
7.	Wienerwald Tunnel (A) 11 km 2 x Einspurröhre für gemischten Verkehr	Rauchfreihaltung des sicheren Bereiches im Übergangsbereich zum Doppelspurtunnel; Lüftungsziel: Erreichen der kritischen Luftgeschwindigkeit im Übergangsbereich für 20 MW-Reisezugwagenbrand

Tabelle 3: Beispiele von aktuellen europäischen Bahntunnelprojekten in der Planungs- oder Bauphase (ohne Gewähr hinsichtlich des aktuellen Planungsstands der Maßnahmen)

1. Mit Strahlventilatoren wie im Le Perthus Tunnel (F – E); Erzeugung einer Längsströmung in der Brandröhre und Gewährleistung rauchfreier Querschläge



2. Mit Mittenabsaugung über Lüftungszentralen wie im Ceneri Basistunnel (CH); Rauchabsaugung und Erzeugung einer Längsströmung in der Brandröhre und Gewährleistung rauchfreier Querschläge

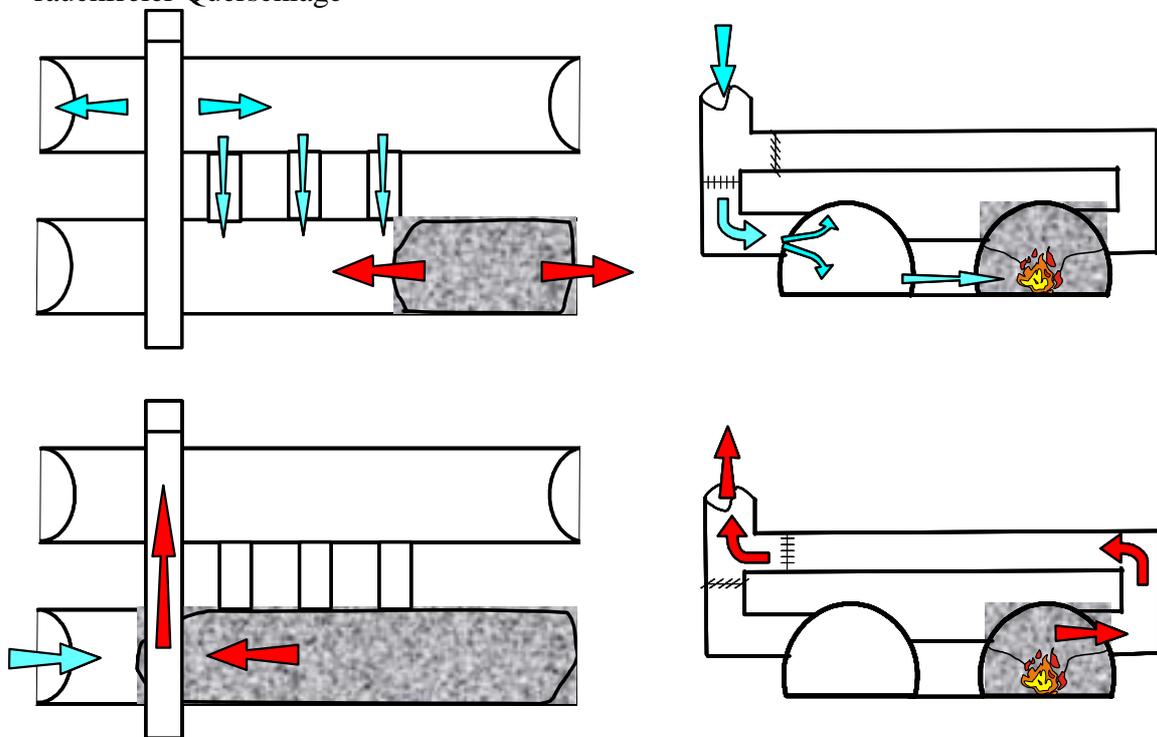


Abbildung 3: Lüftungsprinzipien für Bahntunnel - Längslüftungen

Abbildung 1: Wesentliche Belüftungs- und Entrauchungskonzepte: a) natürliche Belüftung; b) Längslüftung mit Strahlventilatoren; c) Längslüftung durch Mittenabsaugung; d) Längslüftung und Rauchabsaugung im Brandfall; e) Querlüftung .....	11
Abbildung 2: Entwicklung der Fahrzeugemissionen .....	13
Abbildung 3: Lüftungsprinzipien für Bahntunnel - Längslüftungen .....	15
Tabelle 1: Wesentliche Anforderungen an die Tunnellüftung.....	10
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der mechanischen Belüftung (Einsatz von Ventilatoren statt z.B. thermisch betriebenen Schächten) .....	12
Tabelle 3: Beispiele von aktuellen europäischen Bahntunnelprojekten in der Planungs- oder Bauphase (ohne Gewähr hinsichtlich des aktuellen Planungsstands der Maßnahmen) .....	14