

# Luftschadstoffbelastung in Straßentunneln: Einsparung einer Abluftzentrale durch Einsatz der vorhandenen Längslüftung in einem Richtungsverkehrstunnel mit Zu-/Abfahrten am Beispiel Karlsruhe

In Richtungsverkehrstunneln ist die Umkehr der Strömung gegen die Fahrtrichtung energetisch sehr aufwendig. Bisher wurde vor dem Austritt am Portal ein Großteil des Volumenstroms abgesaugt und über einen Kamin ausgestoßen, wenn zur Einhaltung der Luftschadstoffgrenzwerte am Portal die Abluft reduziert werden musste. Liegen Zu- oder Abfahrten vor, kann die Einhaltung der Grenzwerte gegebenenfalls durch Einsatz vorhandener Strahlventilatoren und Ausleiten eines Teilvolumenstroms erreicht werden. Da hierfür die Strömung nicht umgekehrt werden muss, liegen die Betriebskosten unter denen einer Abluftzentrale. Dieses Prinzip erlaubte am Tunnel Kriegsstraße in Karlsruhe den Wegfall des Abluftbauwerks und zugehöriger Abluftanlage mit erheblichen Einsparungen bei Investitions- und Betriebskosten. Die Erkenntnisse lassen sich auch auf andere Tunnel mit oder ohne Zu- und Abfahrten übertragen, um die laufenden Kosten einer für den Immissionschutz betriebenen Abluftzentrale zu reduzieren.

## 1 Straßentunnel Kriegsstraße in Karlsruhe

Der innerstädtische Tunnel Kriegsstraße in Karlsruhe ist mit zwei Haupttröhen geplant. Er wird im Richtungsverkehr befahren und jede Röhre hat eine Zu- und Abfahrt. In der Nordröhre befindet sich außerdem ein Anschluss an eine Tiefgarage. Mit einer Länge von rund 1,4 km erhält er nach den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) [1] eine Längslüftung, die der Kontrolle der Rauchausbreitung im Brandfall dient. In Bild 1 sind der Streckenverlauf und die Positionen der Lüftungstechnischen Einrichtungen schematisch dargestellt.

## 2 Immissionssituation

Während die Immissionsbelastung durch Luftschadstoffe an der Oberfläche entlang eines Tunnels im Vergleich zur offenen Strecke unauffällig ist, treten im Bereich der Portale erhöhte Konzentrationen auf. Befindet sich Wohnbebauung in diesem Einflussbereich, können die gesetzlichen Grenzwerte der Luftschad-

### Air Pollutant Impacts in Road Tunnels: Dispensing with an Air Extraction Centre by Deploying the Existing Longitudinal Ventilation System in a One-Way Tunnel with Accesses/Exits Taking the Example of Karlsruhe

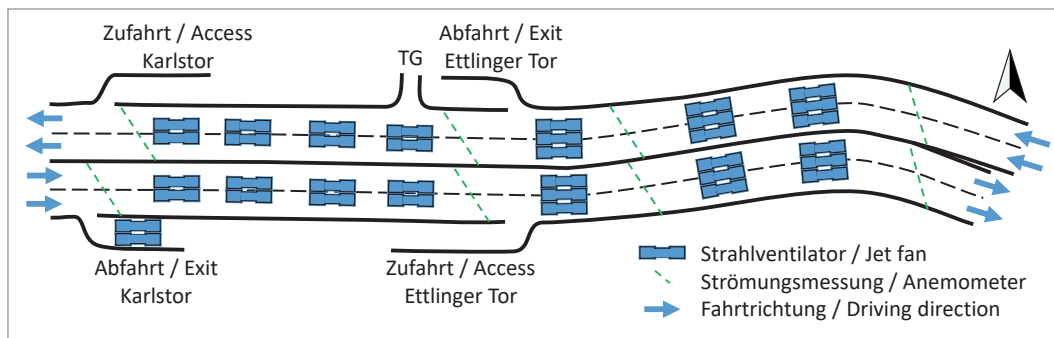
Reversing the flow against the direction of travel in twin-tube tunnels is very energy-intensive. As of now, a large part of the exhaust air has been extracted and discharged via a chimney, when in order to comply with the air pollution limit regulations the exhaust at the portal had to be reduced. If there are entrances or exits, compliance with the limit values may be achieved by using the existing jet fans and diverting a partial volume flow there. Given that the flow does not have to be reversed to do this, the operating costs are lower than is the case with an air extraction centre. This concept has enabled the air extraction structure and the associated air extraction centre at the Kriegsstraße tunnel in Karlsruhe to be eliminated with considerable investment and operating cost savings. These findings can be transferred to existing tunnels with and without entrances and exits, in order to reduce the running costs of an air extraction centre operated for emission control.

stoffe überschritten werden. Dies macht eine Reduktion der frei aus den Tunnelportalen austretenden Abluft erforderlich.

Beim Tunnel Kriegsstraße wurde für das Eröffnungsjahr am Westportal eine geringe Überschreitung des Jahresmittelgrenzwerts an Stickstoffdioxid prognostiziert. Durch die erwartbare Reduktion der Emissionen des Fahrzeugstroms (Bild 2) wird der Grenzwert nach wenigen Jahren unterschritten.

### 2.1 Portalluftabsaugung

Bisher wurden bei einer prognostizierten Grenzwertüberschreitung meist Abluftventilatoren eingesetzt, die einen Großteil der mit Schadstoffen angereicherten Luft aus dem Tunnel absaugen

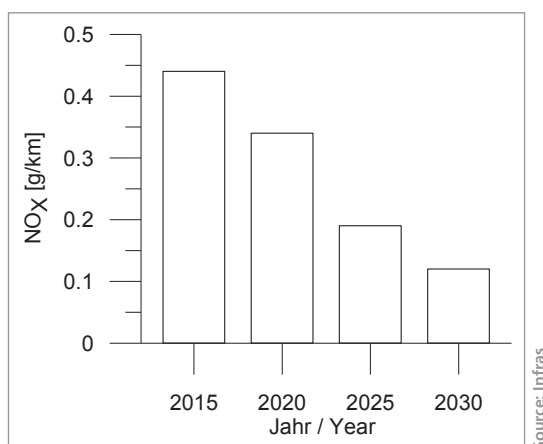


**Bild 1** Streckenverlauf und Positionen von Strahlventilatoren und Strömungsmessstellen  
Traffic routing and positions of jet fans and anemometer

und über einen Kamin in höhere Luftschichten befördern. Dadurch kann die Situation am Portal so weit verbessert werden, dass keine Grenzwertüberschreitungen mehr eintreten. Die Immissionsbelastung in der Umgebung durch die Kaminabluft erhöht sich nur unwesentlich.

Nachteile der Portalluftabsaugung sind hohe Investitionskosten und bei Richtungsverkehrstunneln zusätzlich hohe Betriebskosten durch große erforderliche Volumenströme. Der Verkehr induziert in den Tunnelröhren eine starke Längsströmung, die abhängig von der zu reduzierenden Immissionsbelastung abgesaugt werden muss. Beim Tunnel Kriegsstraße kommt hinzu, dass sich kurz vor dem Westportal eine Zufahrt befindet, durch die Frischluft angesaugt wird, die den Volumenstrom zusätzlich erhöht. Bei einem Betrieb der Abluftventilatoren mit hohen Volumenströmen entstehen große Druckverluste in den Abluftkanälen. Zur Überwindung der Druckverluste müssen leistungsstarke Axialventilatoren eingesetzt werden. Für den Tunnel Kriegsstraße ergab eine Grobauslegung eine erforderliche Leistung von rund  $2 \times 100$  kW, die über einen Zeitraum von 15 Stunden pro Tag betrieben werden müssten.

Aufgrund der stetigen technischen Weiterentwicklung der Fahrzeuge sinkt die Immissionsbelastung durch den Verkehr kontinuierlich (Bild 2). Somit müssen die Abluftventilatoren nach einigen Jahren nicht mehr zur Verhütung einer Grenzwertüberschreitung eingesetzt werden. Die Aufwendungen zur Errichtung der Abluftzentrale sind daher, auf die relativ kurze notwendige Betriebsdauer gesehen, sehr hoch.



**Bild 2** Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Emissionen eines durchschnittlichen Fahrzeugs  
Trend of NO<sub>x</sub>-emissions of an average vehicle

## 2.2 Gezielte Verteilung der Tunnelluft

In Richtungsverkehrstunneln mit Zu- oder Abfahrten, die für den Brandfall eine mechanische Längslüftung besitzen, kann das vorhandene Lüftungssystem zur gezielten Abluftverteilung im Normalbetrieb eingesetzt werden.

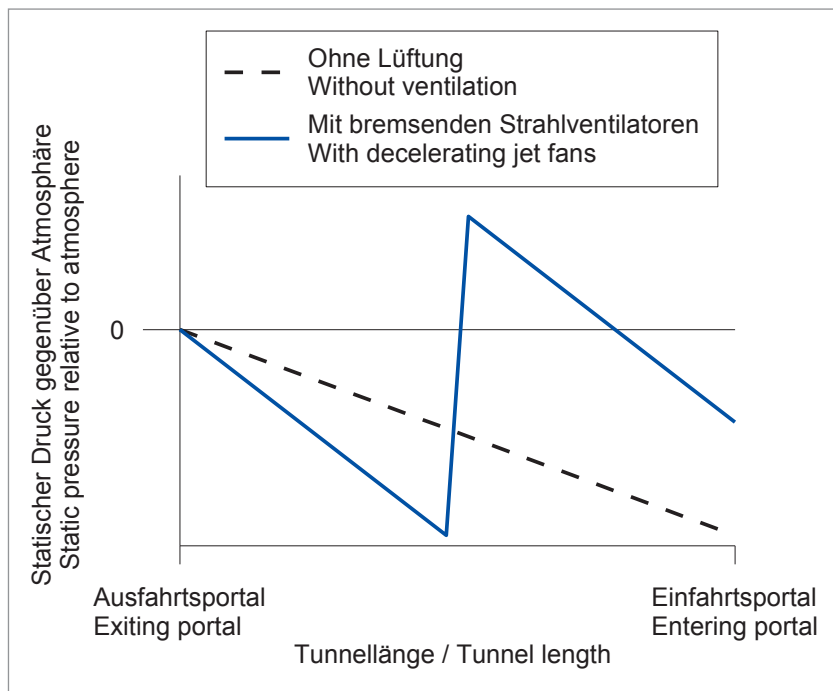
Durch den Kolbeneffekt der Fahrzeuge im Haupttunnel stellt sich in Zu- oder Abfahrten ohne Zutun tendenziell eine einwärts gerichtete Strömung ein. Damit werden alle Luftschadstoffe am Ausfahrtportal des Haupttunnels freigesetzt, wo es infolgedessen zu Grenzwertüberschreitungen kommen kann. Um die im Tunnel anfallenden Luftschadstoffe auf mehrere Portale zu verteilen bzw. hin zu unproblematischeren Portalbereichen zu verschieben, werden Strahlventilatoren eingesetzt. Da dazu nur ein Teil der an einer Abzweigung ankommenden Strömung ausgeleitet werden muss und keine komplette Strömungsumkehr stattfindet, sind dafür wenige Strahlventilatoren ausreichend.

Die Immissionsreduktion am Hauptportal führt zu einer Erhöhung im Bereich des Portals, durch das Teile der Tunnelluft geleitet werden. Mithilfe einer Ausbreitungssimulation ist nachzuweisen, dass die Luftschadstoffgrenzwerte dadurch nicht überschritten werden.

Anhand von Ausbreitungssimulationen wurde für den Tunnel Kriegsstraße ermittelt, dass eine Reduktion der Tunnelemissionen am Ausfahrtportal der Nordröhre um 25 % zur Einhaltung der Luftschadstoffgrenzwerte führt. Da der Schadstoffgehalt der Tunnelluft zwischen Einfahrt- und Ausfahrtportal stetig steigt, hängt das Verhältnis zwischen Schadstoff- und Volumenstrom vom Ort der Ausleitung ab. Um an der Abfahrt, die sich etwa in Tunnelmitte befindet, 25 % der Schadstoffe aus dem Tunnel zu entfernen, müssen etwa 50 % des Volumenstroms abgeführt werden. In Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen ist hierfür der Betrieb von mehreren Strahlventilatoren erforderlich. Prognosen haben ergeben, dass im Mittel zwei Strahlventilatoren mit 20 kW rund 15 h/d ausreichen.

## 3 Regelung der Längslüftung

Um über den Beurteilungszeitraum im Durchschnitt die geforderte Menge der im Tunnel anfallenden Schadstoffe auszuleiten, ist eine Regelung der vorhandenen Strahlventilatoren notwendig. Der Volumenstrom, der sich ohne Betrieb der Lüftung im Tunnel einstellt, ist außer von meteorologischen Bedingungen hauptsächlich vom Verkehr abhängig. Ohne Zutun wird die Strömung an Abzweigungen durch den Verkehr, der hauptsächlich durch die Haupttröhre fährt, tendenziell zur Haupttröhre hin gerichtet sein. Um eine Verteilung zu erreichen, müssen Strahlventilatoren



**Bild 3** Qualitativer Verlauf des statischen Drucks entlang einer Tunnelröhre mit und ohne bremsende Strahlventilatoren  
Qualitative gradient of static pressure along tunnel with and without decelerating jet fans

eingesetzt werden. Diese werden in der Hauptröhre nach der Abzweigung aktiviert, um die Strömung abzubremsen und gleichzeitig an der Abzweigung einen Überdruck aufzubauen. Dadurch wird eine nach außen gerichtete Strömung erzielt.

In Bild 3 ist der qualitative Verlauf des statischen Drucks entlang einer Tunnelachse dargestellt, der sich bei reiner verkehrsinduzierter Strömung bzw. bei zusätzlichem bremsenden Einsatz der Strahlventilatoren einstellt. Bei gleicher Verkehrsstärke sinkt beim Ventilatoreinsatz die Strömungsgeschwindigkeit, wodurch gegenüber dem Betrieb ohne Ventilatoren der Druckverlust bei Eintritt in den Tunnel reduziert ist. Durch die höhere Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge zur Tunnelluft steigt der Druck mit Ventilatoren in Fahrtrichtung stärker an. Im Wirkungsbereich des Strahlventilators findet ein Drucksprung statt. Am Ausfahrtsportal entspricht der statische Druck im Tunnel dem der umgebenden Atmosphäre. Der Einsatz der Strahlventilatoren führt dazu, dass in Teilen des Tunnels ein Überdruck gegenüber der Umgebung herrscht. Liegt eine Zu- oder Abfahrt in diesem Bereich, wird ein Teil der Luft nach außen strömen.

### 3.1 Anforderungen an die Regelung

In Tunneln darf die Luftverschmutzung während des Betriebs einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Steigt diese über einen Grenzwert mit einer CO-Konzentration von 200 ppm bzw. einem Extinktionskoeffizienten von  $12 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$  [1], muss der Tunnel gesperrt werden. Um dies zu vermeiden, wird eine mechanische Lüftung bereits dann eingesetzt, wenn deutlich geringere Werte vorliegen. In Richtungsverkehrstunneln mit Längslüftung wird in diesem Fall mit Strahlventilatoren in Fahrtrichtung der betroffenen Röhre gelüftet und eine Verdünnung der mit Schadstoffen angereicherten Tunnelluft erreicht. Eine Verteilung der Tunnelluft auf mehrere Portale durch Abbremsen der Strömung wirkt dieser Vorgehensweise entgegen, wodurch sehr hohe Konzentrationen auftreten können. Um dies zu verhindern, darf eine gewisse Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel nicht unterschritten werden.

Bei der Regelung ist zu berücksichtigen, ob die Strahlventilatoren im Tunnel stufenlos über Frequenzumrichter oder ganz-

zählig geschaltet werden. Während bei stufenloser Ansteuerung auf kleinste Abweichungen reagiert werden kann, ist bei der Schaltung ganzer Strahlventilatoren eine ausreichend große Hysterese zu berücksichtigen, um häufige Schaltvorgänge zu vermeiden.

### 3.2 Regelung anhand der Strömungsgeschwindigkeit

Prinzipiell ist die Schadstoffverteilung auf die Portale die maßgebliche Größe für die Regelung. Höhere Priorität als eine kontinuierliche Einhaltung der Schadstoffverteilung haben jedoch die Anforderungen an die Strömungsgeschwindigkeit. Daher wird die Strömungsgeschwindigkeit als Schaltwert herangezogen.

Die Strahlventilatoren im Tunnel Kriegsstraße werden ganzzählig geschaltet. In Abhängigkeit von der Wirkung eines Strahlventilators wird ein Einschaltwert ermittelt, der bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen nicht zu einer Unterschreitung einer Mindestgeschwindigkeit führt. Um kurzzeitige Schwankungen auszugleichen, ist ein gleitender Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit zu verwenden. Außerdem ist nach jedem Schaltvorgang abzuwarten, bis die Wirkung des Strahlventilators umgesetzt ist, bevor erneut geprüft wird, ob ein weiterer Schaltvorgang erforderlich ist.

### 3.3 Überprüfung und automatische Anpassung der Regelung

Da es unter den genannten Voraussetzungen nicht möglich ist, kontinuierlich die zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte erforderliche Volumenstromverteilung zu erreichen, schwankt der Wert im zeitlichen Verlauf um den Sollwert. Um im Mittel dennoch die Verteilung einhalten zu können, ist eine fortlaufende Überprüfung der Volumenströme und automatische Anpassung der Regelung vorgesehen. Dies geschieht mit den im Tunnel vorhandenen Messgeräten. Dabei wird stellvertretend für die Schadstoffbelastung im Tunnel der Sichttrübungswert herangezogen.

Für die Ermittlung des Schadstoffverhältnisses wird außerdem die Volumenstromverteilung an der Abzweigung benötigt. Da in der Abfahrt Ettliger Tor keine Strömungsmessstelle vor-

handen ist (Bild 1), wird die Strömungsmessstelle vor der Abfahrt verwendet und über die Knotenregel die gesuchte Strömungsgeschwindigkeit bzw. mithilfe der Querschnittsfläche der gesuchte Volumenstrom ermittelt. Die Differenz der Volumenströme wird mit dem Sichttrübungswert vor der Abfahrt multipliziert und entspricht dem Schadstoffverhältnis. Das Schadstoffverhältnis wird kontinuierlich über die Zeit integriert und dient als Prüfsumme.

Bei von der Auslegung abweichenden Randbedingungen, z. B. aufgrund einer zusätzlichen natürlichen Strömung oder anderer Verkehrszahlen, kann die Schadstoffaufteilung dauerhaft vom Sollwert abweichen und zu einer zu geringen bzw. zu hohen Schadstoffausleitung führen. Um dem entgegenzuwirken und eine automatische Anpassung der Regelung zu erreichen, wird die Prüfsumme als Korrekturwert für die Ein- und Ausschaltgrenzwerte verwendet.

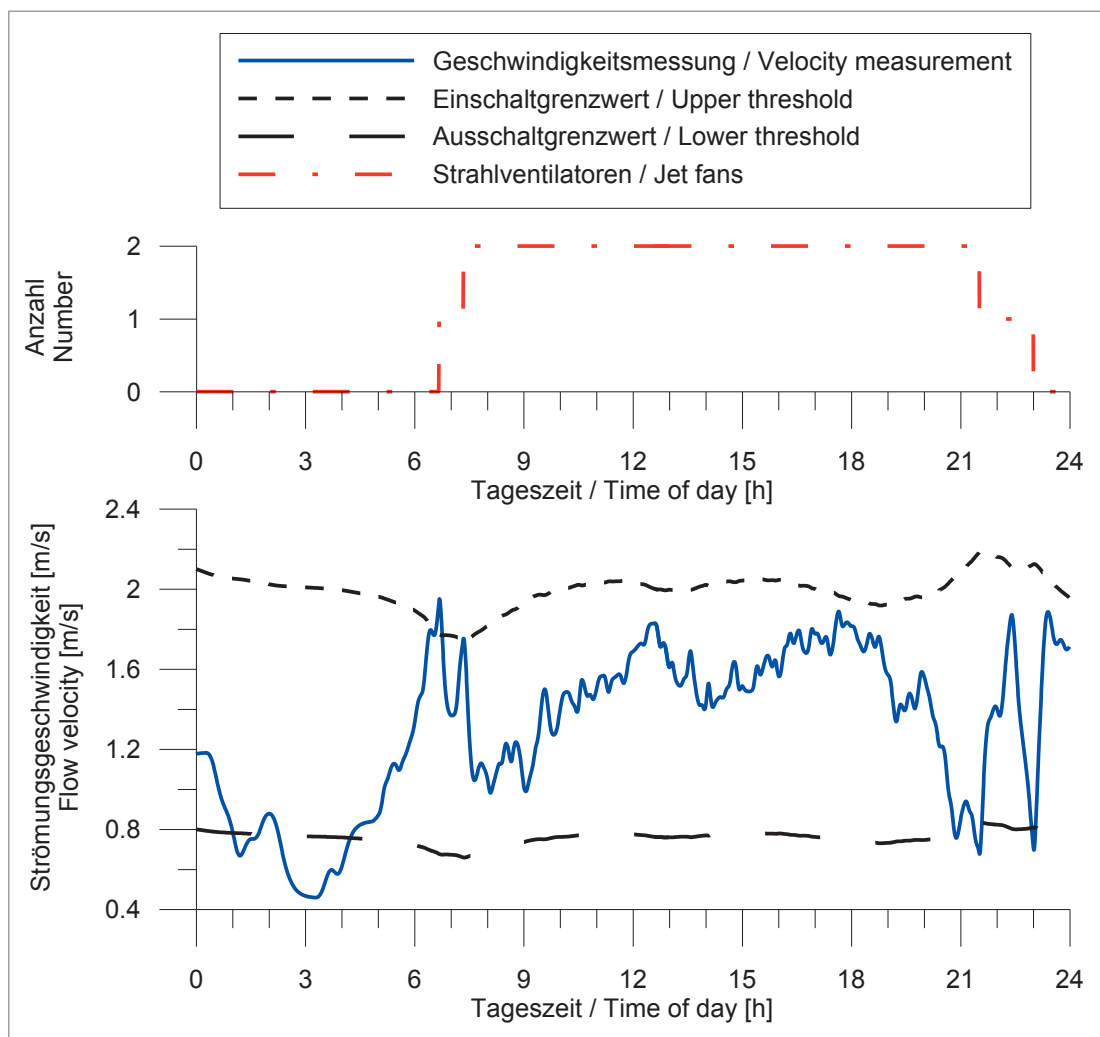
### 4 Lüftungsregelung im typischen Betrieb

Für einen Tag mit typischer Verkehrsstärke zeigt **Bild 4** die von der Regelung aktivierten Strahlventilatoren in Abhängigkeit von der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit. Bei geringem Verkehrsaufkommen nachts steigt die Strömungsgeschwindigkeit nicht über den Einschaltgrenzwert und die Strahlventilatoren bleiben

deaktiviert. Die dennoch vorhandenen Schadstoffe werden vorwiegend durch das Hauptportal ausgetragen, was zu einem Ungleichgewicht in der Verteilung führt. Um dies auszugleichen, müssen zu einer anderen Zeit mehr Schadstoffe durch die Abfahrt ausgeleitet werden. Dieser Ausgleich erfolgt durch die automatische Anpassung, die kontinuierlich die Verteilung überwacht und aufsummiert und bei einer Abweichung die Ein- und Ausschaltgrenzwerte anpasst. Bei einer zu großen Schadstoffverteilung in Richtung Hauptportal wird die Strömungsgeschwindigkeit reduziert.

Mit zunehmender Verkehrsstärke am Morgen steigt die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel. So lange die Strömungsgeschwindigkeit den Einschaltgrenzwert noch nicht überschritten hat und daher keine Strahlventilatoren in Betrieb sind, führt die nun höhere Schadstoffkonzentration zu einem stärkeren Abfall der Einschaltgrenzwerte. Mit Betrieb der Strahlventilatoren ergeben sich geringere Strömungsgeschwindigkeiten und damit höhere Schadstoffkonzentrationen im Tunnel. In diesem Fall genügt ein geringfügig größerer Volumenstrom durch die Abfahrt, um das Ungleichgewicht auszugleichen.

Durch eine ausreichend groß gewählte Hysterese bleiben die Strahlventilatoren tagsüber ohne häufige Schaltvorgänge in Betrieb. Erst mit abnehmender Verkehrsstärke und damit sinkender Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel am Abend werden die Strahlventilatoren sukzessive deaktiviert.



**Bild 4** Beispielhafter Verlauf der Regelung über einen Tag mit typischem Verkehrsaufkommen  
*Exemplary gradient of controller over one day with characteristic traffic volume*

## 5 Fazit

Die Verwendung der Längslüftung zur Immissionslenkung erfordert genaue Kenntnisse des Verhaltens der Schadstoffe nach dem Austritt aus dem Tunnelportal einerseits und der Möglichkeiten der Tunnellüftung andererseits. Durch eine intensive Abstimmung lässt sich eine für den jeweiligen Tunnel passende und wirtschaftliche Lösung finden. Hierzu ist es zweckmäßig, iterativ die Immissionsprognose auf die geänderte Lüftung anzupassen, um sich der idealen Lösung zu nähern. Können mit der Längslüftung ausreichend Schadstoffe vom betroffenen Bereich entfernt werden, ohne an anderer Stelle eine Grenzwertüberschreitung zu verursachen, kann auf eine sonst erforderliche Abluftzentrale verzichtet werden. Dadurch entfallen umfangreiche Baumaßnahmen. Zusätzliche Strahlventilatoren sind in den meisten Fällen nicht erforderlich, da die für den Brandfall installierten Geräte verwendet werden können.

Neben dem Wegfall der Herstellungskosten sind auch die Betriebskosten der Strahlventilatoren im Vergleich zu einer Abluftzentrale geringer. Am Beispiel der Kriegsstraße bedeutet dies eine Einsparung der Investitionskosten von rund 3,75 Mio. Euro. Aus den ermittelten Leistungsdaten für die Strahlventilatoren von  $2 \times 20$  kW und die Axialventilatoren von  $2 \times 100$  kW ergibt sich bei einer täglichen Betriebszeit von 15 h und einem Strompreis von 0,18 Euro/kWh eine Differenz der Stromkosten von 157.680 Euro/Jahr. Außerdem entfallen regelmäßige Wartungsarbeiten an den Axialventilatoren. Aus energetischen Gründen sollte die Umverteilung dennoch stets möglichst gering sein und regelmäßig auf neue Randbedingungen, wie Fahrzeuganzahl, Immissionsmessungen und -berechnungen, angepasst werden. Fällt aufgrund der technischen Entwicklung von immer abgasärmeren Fahrzeugen der Schadstoffanteil in der Tunnelluft dauerhaft, dann entfällt die Notwendigkeit zur Beeinflussung der Tunnelluft. In diesem Fall muss eine Abluftzentrale unter erheblichen Kosten zurückgebaut werden, wohingegen Strahlventilatoren einfach im Tunnel verbleiben können.

Die jeweiligen Randbedingungen erlauben es nicht bei jedem Tunnel, komplett auf eine Abluftzentrale zum Immissionsschutz zu verzichten. In diesem Fall kann eine Kombination aus Abluft und bremsenden Strahlventilatoren eingesetzt werden, um die Betriebskosten zu senken. Dies lässt sich auch bei Tunneln ohne Zu-/Abfahrten realisieren. Wird die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel durch Strahlventilatoren reduziert, ist ein geringerer abzusaugender Volumenstrom ausreichend, um die Schadstoffe aus dem betroffenen Bereich zu entfernen. Die dadurch geringere erforderliche Leistung der Abluftventilatoren überkompensiert den Verbrauch, den die Strahlventilatoren verursachen.

Der Verzicht auf eine Abluftzentrale bedeutet immer eine höhere Immissionsbelastung im Bereich der Tunnelportale. Auch wenn dadurch keine Grenzwerte überschritten werden, ist zwischen Wirtschaftlichkeit und Umwelt- sowie Gesundheitsschutz abzuwägen.

## Literatur

- [1] RABT 2006, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln, Ausgabe 2006.