

# Einsatz eines Tunnel-Lüftungs-Simulators zur Erhöhung der Sicherheit und Beschleunigung der Inbetriebnahme am Beispiel des Tunnels Kriegsstraße in Karlsruhe

Für den im Bau befindlichen Tunnel Kriegsstraße in Karlsruhe wurde ein Tunnelsimulator zur Prüfung der automatischen Lüftersteuerung im Normalbetrieb und Brandfall eingesetzt. Er simuliert die Lüftungstechnischen Eigenschaften des Tunnels und die Reaktionen der Betriebstechnik. Die Berechnung von 286 Prüfscenarien im Tunnelsimulator wurde ausgewertet und auf Abweichungen gegenüber dem Steuerungslastenheft überprüft. Die Ergebnisse wurden genutzt, um die bestehende Steuerung zu optimieren. Die festgestellten Abweichungen hätten in einem realen Ereignis das Risiko für Tunnelnutzer erhöht. Die Lüftersteuerung wird daher optimiert und überarbeitet, um eine Verbesserung der Sicherheit zu erreichen. Diese Überarbeitung kann durch den Einsatz des Tunnelsimulators frühzeitig und unabhängig von den Arbeiten im Tunnel erfolgen. Bei späteren Änderungen an Hard- oder Software bzw. einzelner Module der Steuerung können mit dem Tunnelsimulator Regressionstests effizient durchgeführt werden.

## 1 Straßentunnel Kriegsstraße in Karlsruhe

Der innerstädtische Tunnel Kriegsstraße in Karlsruhe ist mit zwei Hauptröhren 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 (TG). 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 insbesondere der Kontrolle der Rauchausbreitung im Brandfall dient. In **Bild 1** sind der Streckenverlauf sowie die Positionen wesentlicher Lüftungstechnischer Einrichtungen schematisch dargestellt. Der jährlich gemittelte durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) beträgt für das Jahr 2030 ca. 26.100 Fahrzeuge am Tag. Der Schwerverkehrsanteil beträgt 2 % vom DTV.

Das Lüftungssystem besteht in beiden Röhren aus einer Längslüftung mit Strahlventilatoren. Durch die Zu- und Abfahrten werden die Röhren in zwei maßgebliche Lüftungsabschnitte unterteilt. In den Hauptröhren sind jeweils 17 Strahlventilatoren mit einem Laufraddurchmesser von 630 mm

### Use of a Tunnel-Ventilation Simulator to Increase Safety and Accelerate Commissioning Taking Tunnel Kriegsstrasse in Karlsruhe as an Example

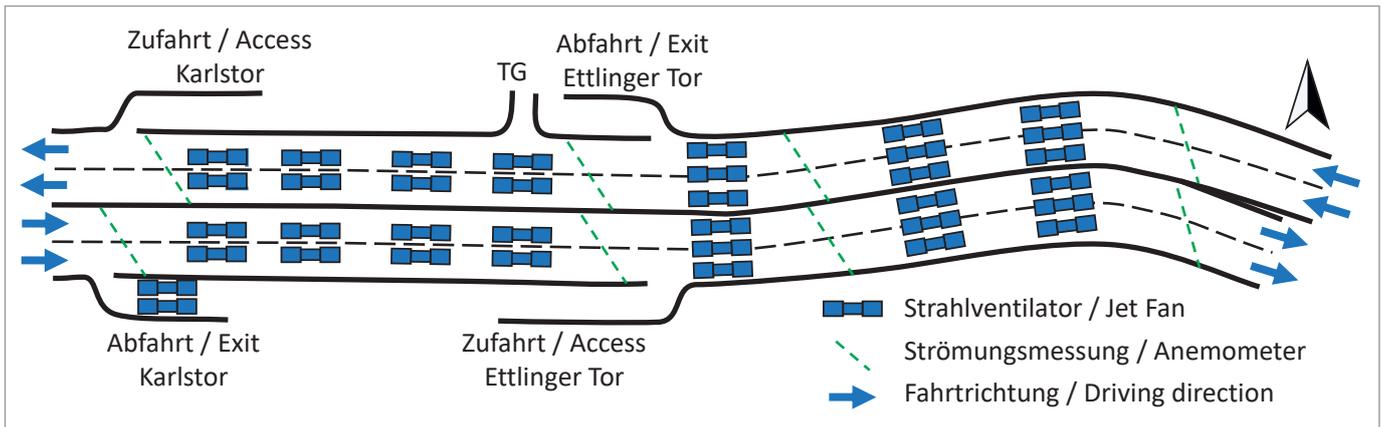
A tunnel simulator for testing the automatic ventilation control in normal operation and in the event of fire was applied for the Kriegsstrasse tunnel in Karlsruhe, which is under construction. It simulates the ventilation properties of the tunnel and the function of the ventilation systems. The calculation of 286 test scenarios in the tunnel simulator was analysed and checked against deviations to the defined requirements. The results were used for the optimisation of the existing control system. The deviations from the anticipated results were to such an extent that it increased the risk to tunnel users in the case of a real event. For this reason, the ventilation control system is being optimised and overhauled to improve safety standards. Because of the tunnel simulator, the overhaul can be carried out at an early stage and independently to the other construction works in the tunnel. In case of later changes to hardware or software or parts of the control system, the tunnel simulator is an efficient tool to perform regression tests.

untergebracht. Lediglich in der Abfahrt Karlstor der Südröhre sind zusätzlich zwei Strahlventilatoren zur Kontrolle der Strömung im Bereich des Einfahrtportals installiert.

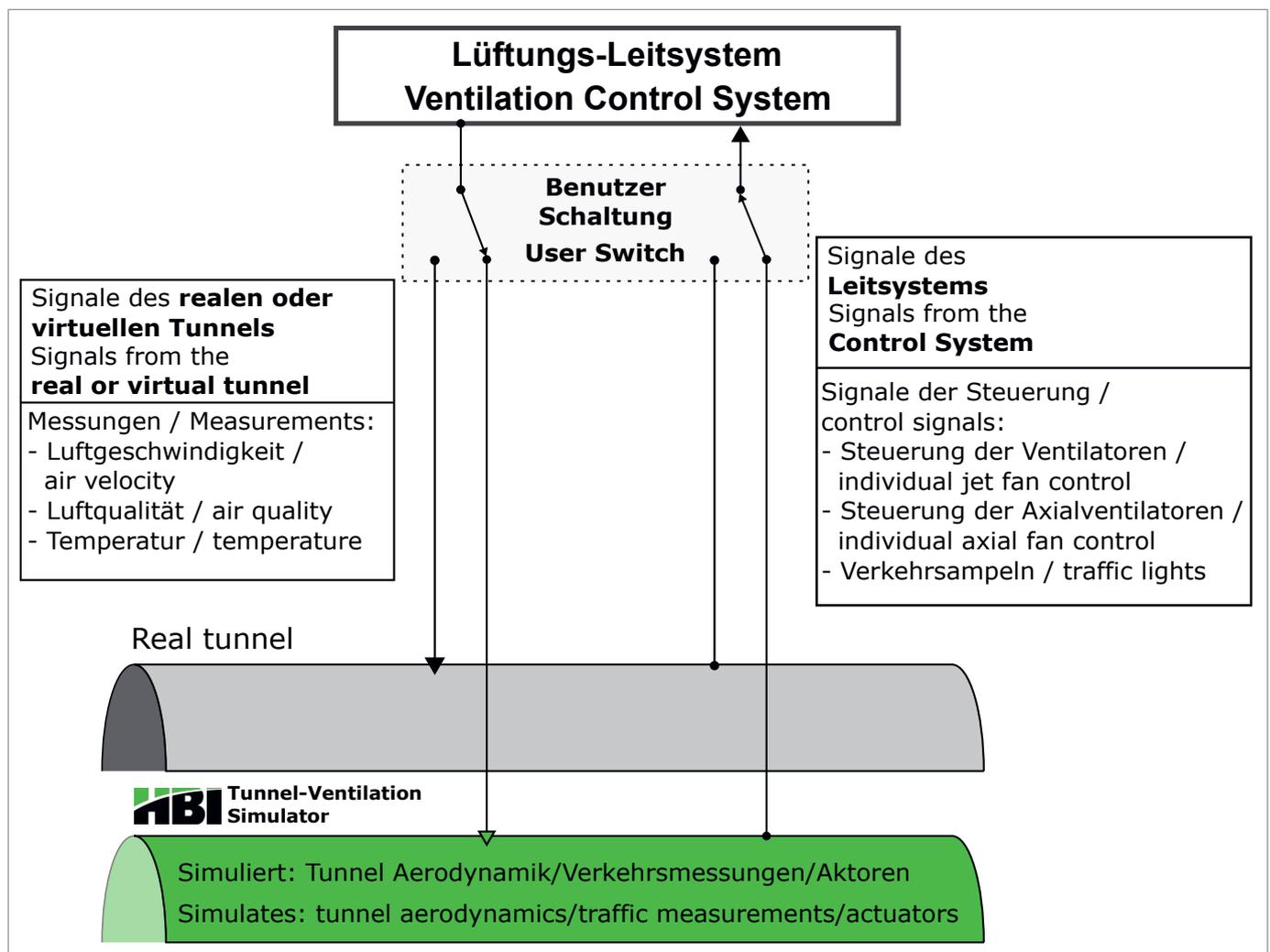
### 1.1 Lüftungssystem im Normalbetrieb

Im Normalbetrieb wird das Lüftungssystem bei Bedarf eingesetzt, um die Luftqualitätsanforderungen im Tunnel einhalten zu können. Hierzu werden Strahlventilatoren in Fahrtrichtung aktiviert, die Frischluft durch das Einfahrtportal ansaugen und damit die Abgase verdünnen.

In der Nordröhre besteht darüber hinaus die Anforderung, im Normalbetrieb etwa 25 % der im Tunnel anfallenden Schadstoffe durch die Abfahrt Ettliger Tor auszuleiten. Damit



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



**Bild 2** Topologie des Tunnelsimulators  
 Topology of the tunnel simulator

wird eine Reduktion der Immissionsbelastung und gleichzeitig die Einhaltung der Luftschadstoffgrenzwerte am Westportal erreicht. Dafür werden Strahlventilatoren im mittleren Abschnitt der Nordröhre entgegen der Fahrtrichtung aktiviert und somit ein Überdruck im Bereich der Abfahrt Ettlinger Tor erzeugt, der die Tunnelluft ausströmen lässt. Priorität gegen-

über dieser Schaltung zum Immissionsschutz am Westportal hat die Einhaltung der Luftqualität im Tunnel. Kann deswegen oder aufgrund zu geringer Strömungsgeschwindigkeit kein Überdruck an der Abfahrt Ettlinger Tor erzeugt werden, wird dies zu anderen Zeiten kompensiert, um im Mittel den vorgegebenen Sollwert einzuhalten. Die Menge der ausgeströmten

Schadstoffe (gemessen als Produkt aus Sichttrübe und Volumenstrom) wird erfasst und bei einer Abweichung vom Sollwert werden die Ein- und Ausschaltgrenzen angepasst und gegebenenfalls mit zusätzlichen Strahlventilatoren geregelt, um die geforderte Menge auszuleiten.

### 1.2 Lüftungssystem im Brandfall

Im Brandfall unterscheidet sich die Lüftungsstrategie grundsätzlich zwischen den Fällen mit flüssigem Verkehr und stockendem Verkehr bzw. Stau vor Brandbeginn. Während bei flüssigem Verkehr mit hoher Geschwindigkeit in Fahrtrichtung gelüftet wird, wird bei stockendem Verkehr bzw. Stau der Rauch mit einer geringen Geschwindigkeit und nach Möglichkeit unter Aufrechterhaltung einer Luft- und Rauchsichtung kontrolliert in eine Richtung geleitet. Die Richtung wird in Abhängigkeit von der vorherrschenden Strömungsrichtung und dem Brandort gewählt. Im Rauch befindliche Strahlventilatoren sollen zur Aufrechterhaltung einer möglichen Luft-/Rauchsichtung nicht betrieben werden. In der nicht vom Brand betroffenen Röhre wird die Lüftung so eingestellt, dass ein Strömungskurzschluss vermieden und Überdruck aufgebaut wird.

Die Zu- und Abfahrten, die neu entwickelte, innovative Regelung zum Immissionsschutz [2] und die Regelung der Luftströmungsgeschwindigkeit im Brandfall bei stockendem Verkehr bzw. Stau machen die Lüftersteuerung zu einem komplexen System. Da es sich hierbei um eine sicherheitsrelevante Ausstattung handelt, ist vor deren Einsatz eine ausführliche Überprüfung auf korrekte Funktion durchzuführen.

## 2 Tunnelsimulator

Um die umfangreichen Variationsmöglichkeiten bei der automatischen Steuerung der Tunnellüftung für den Brandfall testen und eine korrekte Funktion sicherstellen zu können, wurde ein Tunnelsimulator entwickelt.

Der Tunnelsimulator ist eine virtuelle Abbildung eines realen Tunnels und erlaubt dem Leitsystem, mit den Aktoren und Sensoren zu interagieren. Die aerodynamische Reaktion der Ventilatoren, der Lüftung, des Verkehrs und die Auswirkungen eines Brands werden in Echtzeit berechnet, mit dem Leitsystem verknüpft und auf einem Monitor grafisch dargestellt. Das Prinzip des Tunnelsimulators als digitaler Zwilling des realen Tunnels zeigt **Bild 2**.

Abhängig von den Werten des Tunnelsimulators reagiert das Leitsystem identisch zum realen Tunnelbetrieb und passt seine Lüftungssignale an. Dabei interferiert der Tunnelsimulator nicht mit dem realen Tunnel und dessen Werten, weil er eigene Kommunikationskanäle besitzt. Der Tunnelbetreiber kann also auswählen, ob er die Sensoren und Aktoren des realen oder des virtuellen Tunnels lesen bzw. kontrollieren will.

Verkehrsaufkommen, Portaldrücke sowie Brand sind typische Eingaben auf der Benutzeroberfläche, die einfach während des Betriebs geändert werden können. Weitere Parameter wie zum Beispiel Tunnelwandraugigkeit, Verzweigungsdruckverluste und Strahlventilator Schub sind typische Größen, die selten geändert oder nur einmal definiert werden müssen. Der Simulator bietet die Möglichkeit, auch diese nachträglich anzupassen.

Generell ist ein Tunnelsimulator eine eigenständige Einheit, die ohne Beeinträchtigung der sonstigen Planungs- und Entwicklungsaufgaben hergestellt werden kann. Lediglich die Schnittstelle zwischen dem Leitsystem und dem Tunnelsimulator ist ein zentraler Entwicklungspunkt, bei dem die Koordination zwischen den Entwicklern des Leitsystems und des Tunnelsimulators notwendig ist.

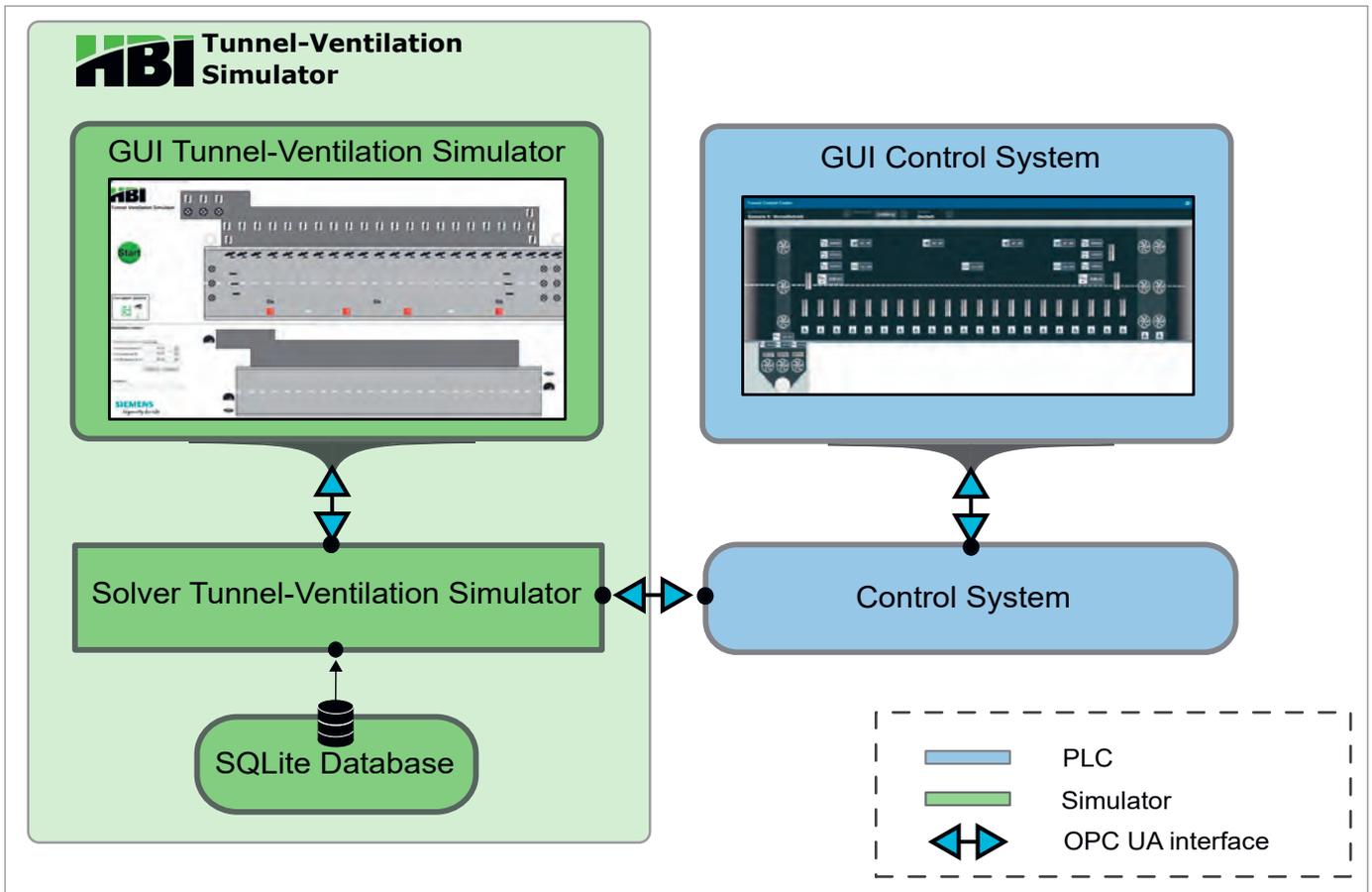
Die Systeme kommunizieren über die industrielle Schnittstelle "Open Platform Communication Unified Architecture" (kurz OPC UA) (**Bild 3**).

### 2.1 Prüfscenarien

Um die vielen möglichen Variationen bei der automatischen Steuerung der Tunnellüftung für den Brandfall zu testen, wurden 286 Prüfscenarien festgelegt und der Ablauf während jeweils 25 Minuten berechnet. In den Szenarien wurden Brandleistung/Brandort, Verkehrssituation/-belastung, Portaldruckwirkung und Einstellung der Tunnellüftung vor dem Brandereignis variiert. Für jedes Szenario wurden die davon abhängigen aerodynamischen Anfangsbedingungen bei Brandausbruch bestimmt. Nach Brandbeginn wird von folgendem Ablauf ausgegangen: Die Brandleistung steigt in Abhängigkeit vom gewählten Brandszenario innerhalb von rund 10 Minuten linear auf ihren Maximalwert an. Die Fahrzeuge zwischen Brandort und Ausfahrportal verlassen bei flüssigem Verkehr den Tunnel. Die sich auf den Brandort zubewegenden Fahrzeuge stauen sich davor auf. Liegt bereits vor Brandbeginn ein Stau vor, finden keine Fahrzeugbewegungen mehr statt. Der Verkehrszustand (Stau/flüssig) wird der Steuerung direkt zur Verfügung gestellt. Daher muss der Verkehrsrechner nicht zur Verfügung stehen. Die Branderkennung findet entweder durch einen ungewöhnlichen Anstieg der Sichttrübe oder durch das Brandmeldekabel statt und wird der Steuerung übermittelt. Dabei variiert die Dauer bis zur Branderkennung stark, je nachdem welche Anfangs- und Randbedingungen gewählt wurden. Daraufhin wird der Tunnel für den Verkehr gesperrt und die automatischen Brand-Lüftungsprogramme werden gestartet. Die physikalischen Größen im Tunnel, wie Luftströmungsgeschwindigkeit, Kaminwirkung, Rauchausbreitung, Fahrzeugbewegungen usw., werden in einem Zeitschritt von 0,5 s berechnet. Die Berechnungen werden nach 25 Minuten beendet und die relevanten Daten gespeichert.

### 2.2 Auswertung

Mittelungszeiten, Zeitverzögerungen aufgrund interner Programmzyklen der SPS und Wahlmöglichkeiten bei Strahlventilatoren gleicher Priorität machen eine vollkommen automatisierte Auswertung der Szenarien durch Ist-Soll-Vergleich jedes Strahlventilators zu jedem Zeitpunkt schwierig. Außerdem müsste hierfür die Steuerung komplett unabhängig programmiert werden, um zunächst das gewünschte Verhalten zu bestimmen. Daher erfolgt die Auswertung weitgehend manuell, indem der zeitliche Verlauf aller Sensoren und Aktoren übersichtlich dargestellt wird. Auf diese Weise kann innerhalb kürzester Zeit festgestellt werden, ob ein Szenario mit einer Länge von 25 Minuten korrekt durchgeführt wurde oder ob Unregelmäßigkeiten auftraten, die weiter untersucht werden müssen.



**Bild 3** Aufbau des Tunnelsimulators  
Structure of the tunnel simulator

Wurden alle Szenarien (auch nach eventuellen Anpassungen) korrekt durchgespielt, können diese Ergebnisse für spätere Regressionstests als Referenz herangezogen werden. Regressionstests dienen dazu, bei Änderungen an Hard- oder Software bzw. einzelnen Modulen der Steuerung festzustellen, ob ungewünschte Auswirkungen auf bereits geprüfte andere Teile auftreten. Da die gewünschten Ergebnisse bereits vorliegen, können diese Tests vollständig automatisiert ausgewertet werden.

### 3 Ergebnisse

Für die Überprüfung der Lüftersteuerung wurden 286 Szenarien mit variierenden Randbedingungen definiert. Eines der Szenarien dient außerdem der Kontrolle der Normalbetrieblüftung einschließlich der Schaltung zum Immissionsschutz. Nach Ende jedes Szenarios wird die Brandmeldung durch den Simulator quittiert und die Steuerung befindet sich wieder im Normalbetrieb. Zwischen den Brandszenarien werden die Messwerte 10 Minuten auf dem Niveau des Normalbetriebs gehalten, um eine direkte Brandauslösung durch zeitlich gemittelte Werte, die sich noch über dem Grenzwert zur Brandmeldung befinden, zu verhindern. Die Szenarien haben eine Laufzeit von 25 Minuten. Brandbeginn ist jeweils 5 Minuten nach Simulationsbeginn.

Im Folgenden werden Szenarien vorgestellt, bei welchen eine Abweichung vom gewünschten Verhalten festgestellt

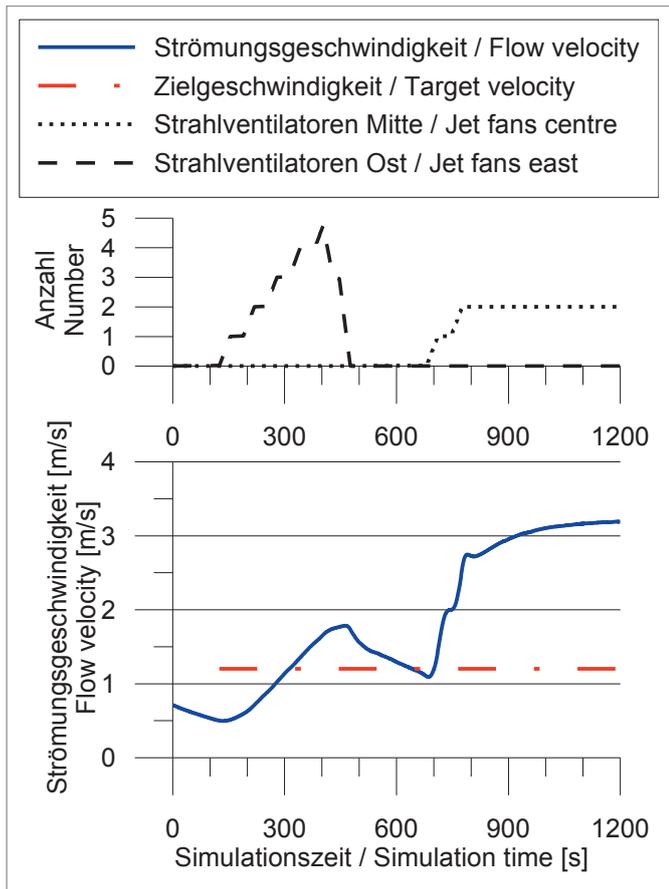
wurde und daraufhin Anpassungen an der Steuerung vorgenommen wurden. Durch den Einsatz des Tunnelsimulators konnte dies bereits vor Fertigstellung der technischen Ausstattung im Tunnel und ohne dessen Belegung umfangreich durchgeführt werden.

#### 3.1 Szenario 40

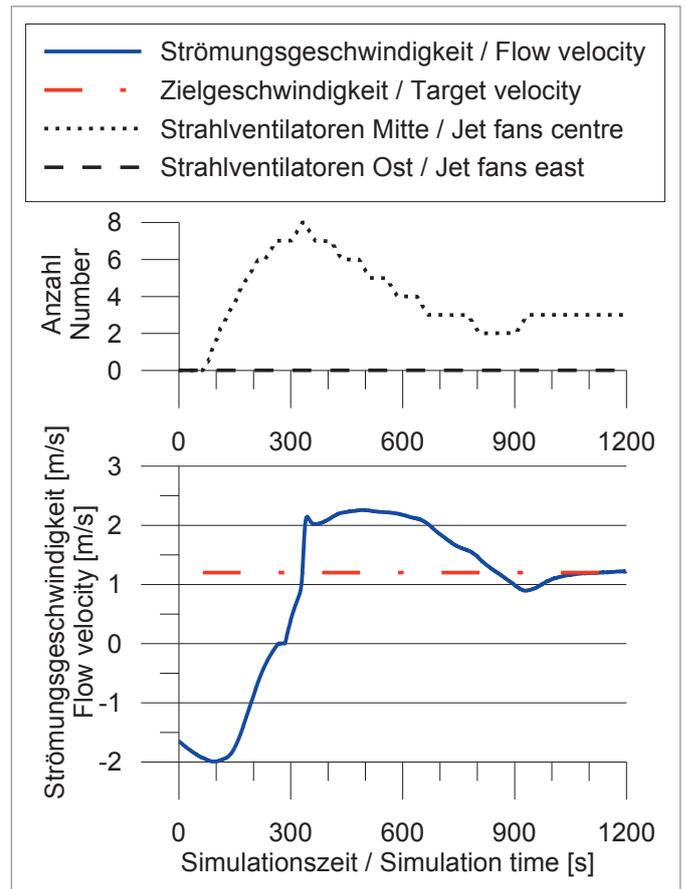
Die Randbedingungen von Szenario 40 sind:

- Brand in der Südöhre
- Richtungsverkehr mit Stausituation vor dem Brand
- Ohne Wind-Portaldruck
- Brandort: 317 m nach dem Einfahrtportal (mittlerer Lüftungsabschnitt)
- Brandleistung: 30 MW, linearer Anstieg über 10 Minuten.

**Bild 4** zeigt den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit und der aktivierten Strahlventilatoren in Szenario 40. Zu Beginn des Szenarios klingt die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel aufgrund des vorhergehenden Szenarios ab. Rund 120 Sekunden nach Brandbeginn wird der Brand durch die Sensorik erfasst. Aufgrund der bei Branderkennung zu geringen Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s im betroffenen Lüftungsabschnitt werden unmittelbar Strahlventilatoren aktiviert und die Strömungsgeschwindigkeit steigt an. Nach einer Zeit von 315 Sekunden wird die Zielgeschwindigkeit von 1,2 m/s erreicht. Dennoch werden weitere Strahlventilatoren aktiviert, was zu einem deutlichen Überschwingen der Strö-



**Bild 4** Verlauf der Lüftersteuerung in Szenario 40  
Gradient of ventilation control in scenario 40



**Bild 5** Verlauf der Lüftersteuerung in Szenario 92  
Gradient of ventilation control in scenario 92

Strömungsgeschwindigkeit führt. Dann werden die Strahlventilatoren, die sich stromabwärts befinden, durch den sich ausbreitenden Rauch deaktiviert, um eine Luft-/Rauchschichtung nach Möglichkeit nicht zu zerstören. Weil keine Ersatzventilatoren zugeschaltet werden, reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit wieder. Dieses nicht vorgesehene Verhalten (keine Ersatzventilatoren) ist damit in dieser Situation vorteilhaft und gleicht andere, unerwünschte Einstellungen aus.

Wird ein Regler mit integrativem Anteil eingesetzt, ist sicherzustellen, dass bei Erreichen des maximalen Stellwerts keine Vergrößerung des integrativen Anteils mehr stattfindet, da es sonst zu einer Verzögerung der Regleranpassung kommen kann. Diese Eigenschaft wird als Anti-Windup bezeichnet. Ändert sich der maximale Stellwert während der Regelzeit, ist dies ebenfalls zu berücksichtigen. Im vorliegenden Szenario reduziert sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Strahlventilatoren durch die Ausbreitung des Rauchs. Das heißt die Strahlventilatoren werden durch eine übergeordnete Funktion deaktiviert, ohne dass eine Rückmeldung an den Regler erfolgt. In diesem Fall wird von dem Regler weiterhin versucht die ursprüngliche Anzahl zu aktivieren.

Erst bei einer Unterschreitung des Sollwerts der Strömungsgeschwindigkeit werden die Strahlventilatoren der Priorität 2 freigegeben und beide noch zur Verfügung stehenden Strahlventilatoren aktiviert. Da sich diese Strahlventilatoren im zu regelnden Lüftungsabschnitt befinden, ist deren Wirkung deutlich höher und es kommt zu einem sprunghaften Anstieg

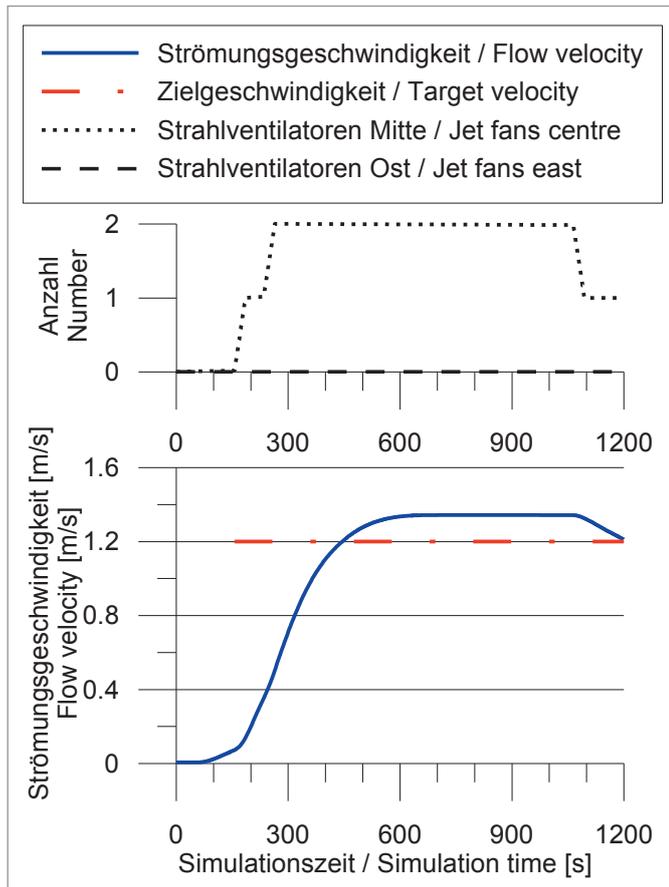
der Strömungsgeschwindigkeit. Dennoch werden die Strahlventilatoren, aufgrund des nicht abgebauten integrativen Anteils, nicht wieder deaktiviert.

## 3.2 Szenario 92

Die Randbedingungen von Szenario 92 sind:

- Brand in der Südöhre
- Richtungsverkehr mit Stausituation vor dem Brand
- 20 Pa Wind-Portaldruck auf das Ostportal
- Brandort: 536 m vor dem Ausfahrtportal (östlicher Lüftungsabschnitt)
- Brandleistung: 30 MW, linearer Anstieg über 10 Minuten.

**Bild 5** zeigt den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit und der aktivierten Strahlventilatoren in Szenario 92. Durch den übermäßig hoch gewählten Wind-Portaldruck von 20 Pa auf das Ostportal herrscht zu Beginn der Simulation eine Strömungsgeschwindigkeit von rund  $-2$  m/s (negativ da entgegen der Fahrtrichtung). Damit liegt bei Branderkennung (60 Sekunden) eine Abweichung vom Zielwert von  $-3,2$  m/s vor und der Regler fordert unmittelbar einige Strahlventilatoren an. Dadurch wird der Zielwert der Strömungsgeschwindigkeit erstmalig nach 335 Sekunden erreicht. Die große Anzahl an Strahlventilatoren führt jedoch zu einem starken Überschwingen auf einen Wert von bis zu  $2,25$  m/s. Bei dieser Geschwindigkeit muss davon ausgegangen werden, dass



**Bild 6** Verlauf der Lüftersteuerung in Szenario 46  
Gradient of ventilation control in scenario 46

eine Luft-/Rauchschichtung zerstört wird. Das Ausschalten der Strahlventilatoren erfolgt auch dann noch zu langsam, wodurch erst nach 800 Sekunden ein tolerabler Wert von 1,5 m/s unterschritten wird.

### 3.3 Szenario 46

Die Randbedingungen von Szenario 46 sind:

- Brand in der Südröhre
- Richtungsverkehr mit Stausituation vor dem Brand
- Ohne Wind-Portaldruck
- Brandort: 153 m vor dem Ausfahrtportal (östlicher Lüftungsabschnitt)
- Brandleistung: 30 MW, linearer Anstieg über 10 Minuten.

**Bild 6** zeigt den zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit und der aktivierten Strahlventilatoren in Szenario 46. 150 Sekunden nach Brandbeginn wird der Brand aufgrund der Rauchentwicklung erkannt und der erste Strahlventilator wird aktiviert, um den Zielwert der Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen. Kurze Zeit später wird ein weiterer Strahlventilator zugeschaltet. Nach 340 Sekunden (190 Sekunden nach Branderkennung) wird eine akzeptable Strömungsgeschwindigkeit von 0,9 m/s erreicht. Durch früheres Einschalten des zweiten Strahlventilators soll diese Dauer verkürzt werden. Aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit, die etwas über dem Zielwert liegt, reduziert sich der integrative Anteil des

Reglers kontinuierlich und führt nach 1.065 Sekunden zum Abschalten eines Strahlventilators. Da die Strahlventilatoren im Tunnel Kriegsstraße ganzzahlig geschaltet werden, ist eine Abweichung vom Zielwert zu akzeptieren. Ein Zu- und Abschalten von Strahlventilatoren, um im Mittel den Zielwert zu erreichen, ist aufgrund der damit einhergehenden Turbulenzen und Nachteile bezüglich der Luft-/Rauchschichtung, nicht vorteilhaft. Aus diesem Grund wird das Totband des Reglers vergrößert. Innerhalb des Totbandes ändert sich der Wert des Reglers nicht.

### 3.4 Weitere Abweichungen

Neben den gewonnenen Erkenntnissen bezüglich der Regelgüte, die anhand ausgewählter Szenarien zuvor aufgeführt wurden, hat die umfangreiche Prüfung der Lüftersteuerung mit dem Tunnelsimulator weiteres Optimierungspotenzial aufgezeigt:

Anzeige



**Beratende Ingenieure für Bahn-, Straßen-, U-Bahn- und Versorgungstunnel:**

- **Lüftung und Kühlung**
- **Aero-, Fluid- und Thermodynamik sowie Umwelphysik**
- **Risikoanalysen, Sicherheitsplanung**
- **Elektromechanische Ausrüstung**
- **Messungen, Tests und Abnahmen**
- **Numerische Berechnungen, Simulationen**
- **Tunnellüftungssimulator für Prüfung und Optimierung der Steuerungen**
- **Sanierungen und Umbau**
- **Beratung, Gutachten, Forschung**

**Weltweit erfolgreiche Planung und Beratung bei über 1000 Tunnellüftungen seit 1963 !**



**HBI HAERTER BERATENDE INGENIEURE**

Bahnhaldenstr. 7 8052 Zürich Schweiz  
Tel: +41 44 289 3900 E-Mail: info.zh@hbi.ch  
Fax: +41 44 289 3999 Web: www.hbi.ch  
Zürich/Bern, CH • Heidenheim, D • Sydney, AUS

- Die Lüftungsstrategie, im Portalbereich bei Stau keine Strömungsumkehr zu erzwingen und damit in einzelnen Fällen gegen die Fahrtrichtung zu lüften, ist nur an den Einfahrtportalen sinnvoll. An den Ausfahrtportalen wird stattdessen ab sofort in Fahrtrichtung gelüftet.
- Strahlventilatoren im Brandabschnitt wurden nicht immer gesperrt.
- Es konnte eine fehlerhafte Zuordnung von Sichttrübe-Messgeräten zu Brandabschnitten behoben werden.
- Die fixe Schaltung der Strahlventilatoren in der nicht vom Brand betroffenen Röhre zum Verhindern eines Rauchübertritts an den Portalen und Notausgängen wurde teilweise korrigiert.
- In einer Röhre war die Vorzeichendefinition zur Aktivierung der Strahlventilatoren fehlerhaft.
- Die Anforderungen zum Immissionsschutz müssen im Mittel über einen längeren Zeitraum eingehalten werden. Um die Schaltvorgänge der Strahlventilatoren gering zu halten, ist eine Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung in zeitlichen Abständen ausreichend. Dies war nicht implementiert.

## 4 Fazit

Durch den frühzeitigen Einsatz des Tunnel-Lüftungs-Simulators beim Tunnel Kriegsstraße in Karlsruhe unabhängig vom Fortschritt des Tunnelbauwerks konnte neben einer Verkürzung der Gesamtprojektlaufzeit gleichzeitig eine Erhöhung der Sicherheit für den Tunnelbetrieb erreicht werden. Dieses Verfahren bietet damit gegenüber den bisher üblichen nur stichpunktartigen Tests erhebliche Sicherheits-, Termin- und Kostenvorteile.

## Literatur

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, RABT, Ausgabe 2006.
- [2] S. Thumm, M. Wehner: Luftschadstoffbelastung in Straßentunneln: Einsparung einer Abluftzentrale durch Einsatz der vorhandenen Längslüftung in einem Richtungsverkehrstunnel mit Zu-/Abfahrten am Beispiel Karlsruhe, Vortrag der STUVA-Tagung 2019 (Forschung + Praxis 53), November 2019.