Forschung + Praxis 61

U-Verkehr und unterirdisches Bauen

STUVA-Tagung 2025 – STUVA Conference 2025

Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur
International Forum for Tunnels and Infrastructure

Studiengesellschaft für Tunnel und
Verkehrsanlagen e. V., STUVA, Köln

Forschung + Praxis 61

U-Verkehr und unterirdisches Bauen

STUVA-Tagung 2025 – Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur

STUVA Conference 2025 – International Forum for Tunnels and Infrastructure

STUVA-Tagung 2025 in Hamburg

veranstaltet von der

Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. – STUVA, Köln

25. bis 27. November 2025
Langfassungen der Vorträge

Sicherheit, Risikominimierung, Tunnelverfügbarkeit

Safety, Risk Minimisation, Tunnel Availability

Rune Brandt, Dr.-Ing., Verwaltungsratspräsident, HBI Haerter AG, Zürich (CH)

Elektro- und Wasserstofffahrzeuge: Vorteile und Gefahren beim Betrieb von Straßentunneln

Seit einigen Jahren werden Elektrofahrzeuge zunehmend im Straßenverkehr eingesetzt. Für längere Transporte schwerer Fahrzeuge gewinnt Wasserstoff als alternative Energiequelle an Bedeutung.

Obwohl bei Elektro- und Wasserstofffahrzeugen keine lokalen Emissionen aus Verbrennung entstehen, bleibt der Frischluftbedarf in Straßentunneln weitgehend konstant. Ursache hierfür ist der Reifenabrieb, der den Hauptanteil an der Sichttrübung im Tunnel verursacht – unabhängig vom eingesetzten Antriebssystem.

Forschungsprojekte zeigen, dass Elektrofahrzeuge kein höheres Brandrisiko aufweisen als konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Die Brandbekämpfung gestaltet sich jedoch oft schwieriger, insbesondere aufgrund der thermischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien.

Wasserstoffbetriebene Pkw sind bereits serienmäßig erhältlich. Die Sicherheitsanforderungen sind in der UNECE-Regelung Nr. 134 festgelegt. Um das Explosionsrisiko in Tunneln weiter zu minimieren, wird eine kontinuierliche Frischluftzufuhr von 75 m³/s empfohlen. In den untersuchten Richtungsverkehrstunneln lässt sich dieser Wert mit moderatem Energieeinsatz realisieren. Für Gegenverkehrstunnel sind ähnliche Maßnahmen möglich, allerdings mit höherem Energieeinsatz.

Electric and Hydrogen Vehicles: Advantages and Risks when Operating Road Tunnels

Electric vehicles have been increasingly adopted in road traffic over the past few years. For the operation of heavy vehicles on longer transport routes, hydrogen is gaining importance as an alternative energy source.

Although electric and hydrogen-powered vehicles produce no local combustion emissions, the fresh air demand in road tunnels remains largely unchanged. This is due to tyre abrasion, which is the main contributor to visibility impairment in tunnels – regardless of the propulsion system used.

Research projects indicate that electric vehicles do not pose a higher fire risk than conventional combustion engine vehicles. However, extinguishing fires involving electric vehicles is often more challenging, particularly due to the thermal behaviour of lithium-ion batteries.

Hydrogen-powered passenger cars are already available as standard production models. Safety requirements are defined in UNECE Regulation No. 134. To further minimise the risk of explosion in tunnels, a continuous fresh air supply of 75 m³/s is recommended. This value can be achieved in the analysed unidirectional tunnels with moderate energy input. Similar measures are feasible for bidirectional tunnels, although they require higher energy expenditure.

1 Einleitung

Im Zuge des Klimaschutzes vollzieht sich eine schrittweise Umstellung der Antriebssysteme im motorisierten Verkehr. Der Trend geht weg von fossilen Kraftstoffen wie Benzin und Diesel (ICEV) hin zu emissionsfreien Alternativen auf Basis von Batterien (BEV, HEV) oder Wasserstoff (FCEV).

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (FCEV). Im Mittelpunkt stehen dabei sowohl die Auswirkungen auf die Tunnellüftung im Normalbetrieb als auch die potenziellen Brandgefahren.

Bild 1 zeigt schematisch, in welchen Bereichen Elektro- und Wasserstofffahrzeuge sowie weitere Energieformen im Mobilitätssektor eingesetzt werden können.

Aufgrund der begrenzten Reichweite und des eingeschränkten Lastpotenzials von Elektrofahrzeugen (BEV) wird Wasserstoff als Energieträger für Brennstoffzellen (FCEV) insbesondere im Fernverkehr mit Personenkraftwagen und zunehmend auch im Nutzfahrzeugverkehr als vielversprechend angesehen. Die EU-Wasserstoffstrategie von 2020 [6] betont die Bedeutung einer raschen Verbreitung von Wasserstoff-Fahrzeugen im Güterverkehr.

2 Tunnellüftungsbedarf im Normalbetrieb

In Straßentunneln wird die Luftqualität durch Zufuhr von Frischluft sichergestellt, um Schadstoffkonzentrationen durch Fahrzeugemissionen auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Verbrennungsmotoren erzeugen dabei verschiedene Schad-

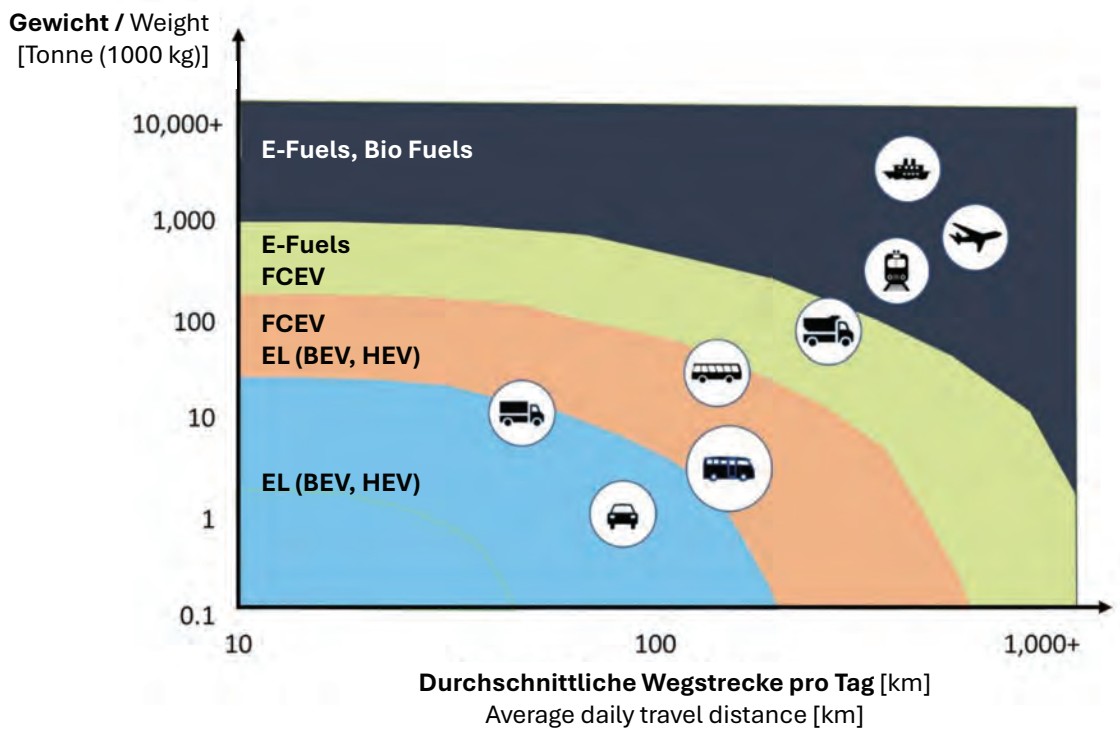

Bild 1 ***Einsatzbereiche umweltfreundlicher Energieträger in der Mobilität. Elektrofahrzeuge (BEV und HEV) eignen sich vor allem für kurze Reichweiten und geringes Gewicht. Für längere Strecken oder höhere Lasten rücken Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff (FCEV) in den Vordergrund. Bei sehr hohen Lasten kommen E-Fuels (synthetische Kraftstoffe) oder Bio Fuels (z. B. Methanol) zum Einsatz (angepasst von [3]).***
Application areas of environmentally friendly energy sources in mobility. Electric vehicles (BEV and HEV) are especially suitable for short distances and low weight. For longer distances or higher loads, hydrogen fuel cell vehicles (FCEV) become attractive. For very high loads, E-fuels (synthetic fuels) or biofuels (e.g., methanol) are used (adapted from [3]).

stoffe wie Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Partikel, die zur Sichttrübung beitragen. In vielen Tunneln wird die Lüftung primär anhand der Sichttrübung geregelt.

Die Abgasemissionen variieren je nach Fahrzeugtyp (Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, Lkw), verwendetem Kraftstoff (Benzin oder Diesel), Fahrgeschwindigkeit und Längsneigung.

Die Antriebe von Elektrofahrzeugen (BEV) und Wasserstofffahrzeugen mit Brennstoffzellen (FCEV) verursachen keine Abgasemissionen. Allerdings entstehen auch bei diesen Fahrzeugen Partikelemissionen durch Reifenabrieb und Aufwirbelung.

Solche nicht abgasbezogenen Emissionen hängen nicht von der Längsneigung ab, sondern von der Verkehrsführung – also davon, ob es sich um Richtungs- oder Gegenverkehr handelt. Für die Ermittlung der durch Reifenabrieb und Staubaufwirbelung verursachten Partikelemissionen existieren internationale Empfehlungen wie beispielsweise PIARC 2019 [1] sowie nationale Richtlinien, etwa die österreichische RVS 09.02.32 [2].

Bild 2 zeigt die geschätzten Partikelemissionen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h für das Jahr 2025. Dargestellt sind Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) bei unterschiedlichen Längsneigungen (–6 %, 0 %, +6 %) sowie die Emissionen durch Reifenabrieb und Aufwirbelung bei Richtungs- und Gegenverkehr. Es wird deutlich, dass die Partikelemissionen durch Reifenabrieb und Aufwirbelung höher ausfallen als die Emissionen durch Verbrennungsmotoren.

Obwohl brennstofffreie Fahrzeuge (BEV und FCEV) keine Verbrennungsemissionen erzeugen, bleibt ihre Partikelproduktion durch Reifenabrieb und Aufwirbelung bestehen. Daher führt ein steigender Anteil solcher Fahrzeuge nur zu einer geringfügigen Reduktion des Lüftungsbedarfs in Tunneln.

3 Brände von Elektrofahrzeugen in Tunnel

3.1 Brandwahrscheinlichkeit

Die schwedische Behörde für Zivilschutz und Notfallvorsorge (MSB) erhebt fortlaufend Daten zur Zusammensetzung der schwedischen Fahrzeugflotte (**Tabelle 1**) sowie zu Fahrzeugbränden [7].

Im Jahr 2024 wurden rund 3.100 Brände bei Personenwagen registriert, davon lediglich 40 bei Elektro- oder Hybridfahrzeugen. Dies deutet darauf hin, dass die Brandwahrscheinlichkeit bei Elektro- und Hybridfahrzeugen deutlich niedriger sein könnte als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV).

Im Zeitraum von 2020 bis 2024 wurden insgesamt 172 Brände bei Elektro- und Hybridfahrzeugen erfasst, was einem Durchschnitt von 34 Fällen pro Jahr entspricht. Davon ereigneten sich 45 Brände (26 %) während des Ladevor-

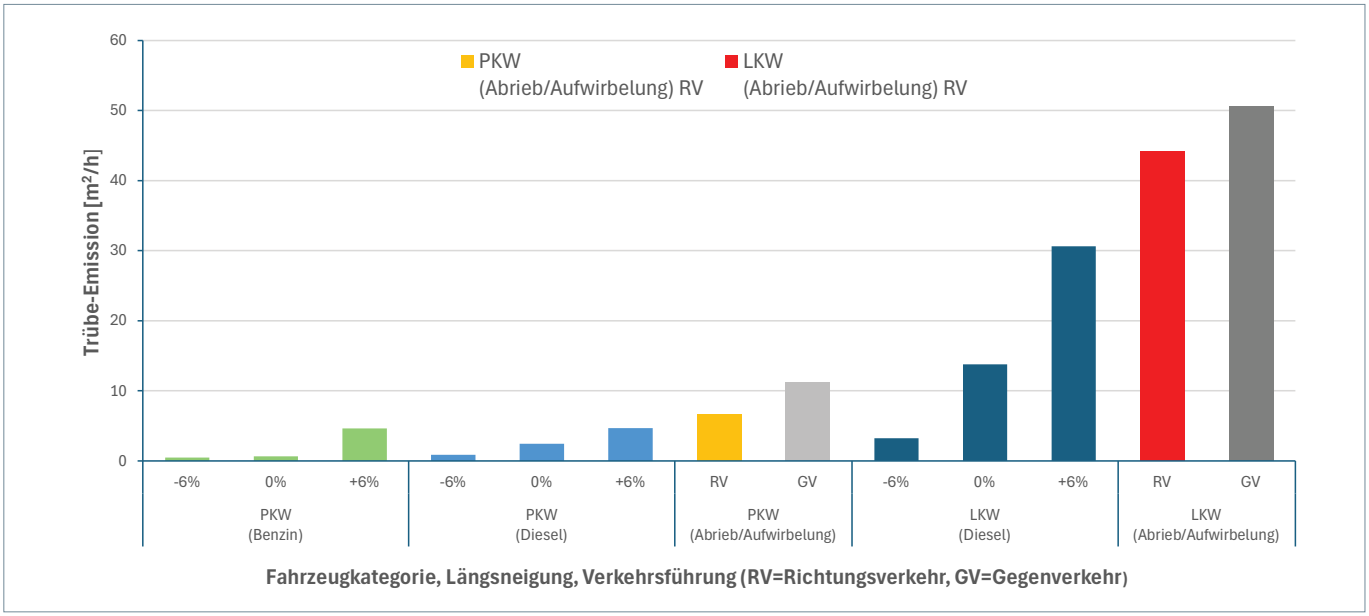

Bild 2 ***Partikelemissionen (Sichttrübung) bei 100 km/h im Jahr 2025 durch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel) der Kategorien Pkw und Lkw. Dargestellt sind die Emissionen bei Längsneigungen von –6 %, 0 % und +6 %. Zusätzlich werden die Emissionen durch Reifenabrieb und Aufwirbelung bei Richtungsverkehr (RV) und Gegenverkehr (GV) dargestellt.***
Particle emissions (visibility impairment) at 100 km/h in year 2025 from internal combustion engines (petrol, diesel) in the passenger car and HGV categories. The data includes longitudinal inclinations of -6 %, 0 %, and +6 %. Additionally, emissions from tire wear and dust resuspension are shown for both unidirectional traffic (RV) and bi-directional traffic (GV).

gangs. Einige Brände standen im Zusammenhang mit den Batterien, insbesondere bei Frontalzusammenstößen mit hoher Aufprallenergie. Auch vorsätzlich verursachte Brände wurden beobachtet, sind jedoch in der aktuellen Statistik nicht enthalten.

Es liegen keine genauen Daten über die gefahrenen Kilometer der verschiedenen Fahrzeugkategorien vor. Eine statistisch signifikante Aussage über die Brandwahrscheinlichkeiten ist daher nicht möglich. Es kann jedoch vermutet werden, dass die Brandwahrscheinlichkeit bei Elektro- und Hybridfahrzeugen (BEV bzw. HEV) nicht höher, sondern eher niedriger ist als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICEV).

3.2 Brandauswirkung von Elektrofahrzeugen

Die Auswirkungen von Bränden bei Elektrofahrzeugen sind seit längerem Gegenstand mehrerer Forschungsprojekte, darunter PIARC (2023) [3], BRAFA (2021) [8], AGT (2020) [9] und VSS (2018) [10].
Aus dem Projekt BRAFA (2021) [8] lassen sich folgende Erkenntnisse und Schlussfolgerungen ableiten:

Brandentwicklung bei Fahrzeugen:

- Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEV) ohne Treibstoff setzen bei einem Brand etwa 2 Megawatt Wärme frei.
- Bei Fahrzeugen mit flüssigem Kraftstoff verdoppelt sich diese Wärmefreisetzung.
- Elektrofahrzeuge (BEV) können bei voller Batterieladung (SOC = 100 %) bis zu 1 Megawatt zusätzliche Wärme abgeben; bei vollständiger Beteiligung der Batterie kann die Wärmefreisetzung noch deutlich höher ausfallen.

Emissionen:

- Brände von BEV führen zu höheren CO-Emissionen, hauptsächlich durch die chemische Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batterien, die organische Lösungsmittel enthalten.

Schweden 2024	Pkw		Lkw		Bus	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
El-Fahrzeuge (BEV)	358.260	7,2 %	29.120	4,1 %	1.453	10,2 %
Hybridfahrzeuge (HEV)	522.698	10,5 %	764	0,1 %	154	1,1 %
Verbrennungsmotoren (ICEV)	4.096.833	82,3 %	673.424	95,8 %	12.571	88,7 %
Insgesamt	4.977.791	100,0 %	703.308	100,0 %	14.178	100,0 %

Tabelle 1 ***Zusammensetzung der schwedischen Fahrzeugflotte im Jahre 2024 [7]***
Composition of the Swedish vehicle fleet in year 2024 [7]

- Gasanalysen von BEV-Bränden zeigen, dass bei Fluorwasserstoff (HF) teilweise gesundheitskritische Konzentrationen erreicht wurden.
- Chlorwasserstoff (HCl) trat bei Bränden sowohl von BEV als auch von ICEV in vergleichbaren Mengen auf.
- Es wurden jedoch keine unmittelbaren Gesundheitsgefahren für Personen festgestellt.

Brand bei Bussen:
- Simulationen deuten darauf hin, dass Brände bei BEV-Bussen mit Dachbatterien ähnlich lange wie oder sogar länger als bei konventionellen ICEV-Bussen andauern können.
- Die Temperaturen im Tunnel sind vergleichbar.

Löschversuche:
- Wasser ist auch bei Batteriebränden ein effektives Löschmittel.
- Ein schnelles Eingreifen (innerhalb von ca. 10 Minuten) ist entscheidend, um die Batterie zu kühlen.
- Das direkte Einbringen von Wasser mit einer Löschlanze funktioniert gut, erfordert aber Fachwissen.
- Feuerlöschdecken sind bei Batteriebränden weniger effektiv, da die Branddynamik schwer zu kontrollieren ist.

Risiko für Tunnelbenutzer:
- BEV-Brände unterscheiden sich hinsichtlich Stofffreisetzung und Hitzeentwicklung von ICEV-Bränden.
- Bei einem vollständigen BEV-Anteil im Tunnelverkehr steigt das Risiko für Tunnelbenutzer um etwa 4 %, das Brandrisiko um rund 12 %.

Branderkennung und Brandlüftung:
- Die eingesetzte Sensorik zur Branderkennung muss nicht grundsätzlich angepasst werden.
- Bei BEV-Bränden, die Schadstoffe freisetzen, ohne sichtbare Flammen zu erzeugen, gestaltet sich die Erkennung jedoch schwieriger.
- Eine Schutzlüftung könnte helfen, Schadstoffkonzentrationen zu verringern.

Lüftung und Dimensionierung:
- Bei Tunneln mit hohem BEV-Anteil sollte die maximale Wärmefreisetzungsrate bei der Planung berücksichtigt werden – insbesondere bei sehr hohen Werten (z. B. 50 MW anstatt 30 MW).

4 Tunnelbrand bzw. -explosion von Wasserstoffahrzeugen

4.1 Einleitung

Viele Menschen sind skeptisch gegenüber Wasserstoffsicherheit, was auch auf historische Unfälle in der Luft- und Raumfahrt zurückzuführen ist, etwa den Brand des Hindenburg-Zeppelins im Jahr 1937 oder die Explosion der Challenger-Rakete 1986. Diese Ereignisse haben das öffentliche Bild von Wasserstoff als gefährlichem Energieträger nachhaltig geprägt.

Wasserstoff ist in Luft bei Konzentrationen zwischen 4 % und 77 % brennbar [11] und benötigt nur sehr geringe Zündenergie. Besonders kritisch sind Konzentrationen zwischen 18 % und 59 %, bei denen es zu Explosionen kommen kann [15].

Trotz dieser Risiken haben Wasserstofffahrzeuge in den letzten 30 Jahren über 10 Millionen Kilometer zurückgelegt – ohne größere Unfälle oder Schäden an Personen oder Sachwerten.

Die EU-Wasserstoffstrategie von 2020 [6] fördert gezielt die Verbreitung von Wasserstofffahrzeugen. Hersteller wie Toyota, Hyundai und ab 2028 auch BMW bieten serienmäßig Wasserstoffautos an.

Das PIARC (2023) [3] untersucht die sicherheitsrelevanten Auswirkungen von Wasserstofffahrzeugen im Tunnelbetrieb. Die Anschlussarbeiten sollen bis 2027 konkrete Handlungsempfehlungen liefern. Einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand, praktische Erfahrungen und Risikobetrachtungen bietet das Projekt HyTRA (2023) [5].

Die UNECE-Regelung Nr. 134 [4] definiert einheitliche Vorgaben für die Zulassung von Wasserstofffahrzeugen – insbesondere für Druckwasserstoff-Speichersysteme und sicherheitsrelevante Bauteile. Sie stellt sicher, dass Wasserstoffbehälter durch Wärmedämmung vor schnellem Aufheizen geschützt sind. Bei hohen Temperaturen öffnet sich eine thermische Druckentlastungsvorrichtung (TPRD), um eine Explosion zu verhindern.

4.2 Angenommenes Worst-Case-Szenario

In diesem Abschnitt wird das Worst-Case-Szenario bei Wasserstoff-Leckagen betrachtet, um zu beurteilen, ob und wie Explosionen in Tunneln vermieden werden können. Ziel ist es, Maßnahmen zu identifizieren, die verhindern, dass eine Leckage zu einer Explosion führt – denn solche Ereignisse können erheblichen Schaden anrichten.

Das Szenario basiert auf einer Leckage eines Wasserstoffbehälters, wie er typischerweise in Lastwagen verwendet wird. Der maximale Betriebsdruck beträgt 350 bar. Es wird angenommen, dass die Leckage die gleiche Größe hat wie die thermische Druckentlastungsvorrichtung (TPRD), die einen Durchmesser von 5,0 mm besitzt. Unter diesen Bedingungen lässt sich die Leckagerate auf bis zu 0,5 kg Wasserstoff pro Sekunde schätzen [5].

4.3 Lüftungsmaßnahme gegen Wasserstoffexplosionen

Es ist kaum realistisch, die Wasserstoffkonzentration in Tunneln so weit zu senken, dass ein Wasserstoffbrand vollständig ausgeschlossen werden kann. Um jedoch das Risiko einer Explosion zu minimieren, wird eine Frischluftzufuhr von mindestens 75 m³/s empfohlen. Im betrachteten Worst-Case-Szenario führt dies zu einer durchschnittlichen Wasserstoffkonzentration von unter 8 %, was einen Sicherheitsfaktor von zwei darstellt.

Basierend auf Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Tunneln wurde ermittelt, wie viel zusätzliche Lüftung notwendig wäre, um diese Frischluftmenge dauerhaft sicherzustellen. Da keine genauen Verkehrsdaten vorlagen, wurden zwei Szenarien für den

Tunnel	Länge [km]	Verkehrs-führung	DTV [Fz/Tag, Spur]	Zeitanteil mit <75 m³/s ohne zusätzliche Lüftung	Energiebedarf jährlich für >75 m³/s Frischluft [kWh]	
					von	zu
Elbtunnel, erste Röhre Hamburg	2,8	RV	15.000	8 %	6.000	20.000
Elbtunnel, vierte Röhre Hamburg	3,1	RV	15.000	8 %	6.000	18.000
Oume-Tunnel Japan	2,1	RV	12.450	3 %	3.000	12.000
Kasamori-Tunnel Japan	2,4	GV	3.650	33 %	32.000	180.000
Bolungarvíkurgöng Island	5,4	GV	400	95 %	200.000	250.000

Tabelle 2 ***Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten über ein Jahr für drei Richtungsverkehrstunnel (RV) sowie zwei Gegenverkehrstunnel (GV) und Ermittlung des Energiebedarfs, um stets eine Frischluftzufuhr von mindestens 75 m³/s sicherzustellen***
Analysis of airflow velocities over a year for three unidirectional tunnels (RV) and two bi-directional tunnels (GV), as well as the determination of the energy requirement to ensure a fresh-air supply of at least 75 m³/s at all times

Strömungswiderstand betrachtet: einmal ohne Verkehr und einmal mit ¾ (bei Richtungsverkehr) bzw. ½ (bei Gegenverkehr) der maximalen Fahrzeugbelegung.

Zur Sicherstellung der erforderlichen Luftförderung wurden Strahlventilatoren mit einem Installationsfaktor von 0,8 und einem Schub-Leistungs-Verhältnis von 35 N/kW angesetzt. Bei Tunneln mit Richtungsverkehr wird vorausgesetzt, dass die Luft stets in Fahrtrichtung strömt. Bei Gegenverkehr wurde eine zusätzliche Lüftung in Richtung der vorherrschenden Strömung angenommen.

Die Strömungsmessungen wurden über ein Jahr für verschiedene Tunnel analysiert, darunter der Elbtunnel (Hamburg) mit seiner ersten und vierten Röhre [12], der Oume-Tunnel und der Kasamori-Tunnel (Japan) [13] sowie der Tunnel Bolungarvíkurgöng (Island) [14].

Die Ergebnisse für diese fünf Tunnel sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass bei den drei Richtungsverkehrstunneln die erforderliche Frischluftmenge von 75 m³/s nur in etwa 8 % (Elbtunnel) bzw. 3 % (Oume-Tunnel) der Zeit unterschritten wird. Um dauerhaft eine Frischluftzufuhr von 75 m³/s sicherzustellen, würde der jährliche Energiebedarf im Elbtunnel zwischen 6.000 und 20.000 kWh liegen. Für den Oume-Tunnel beträgt der entsprechende Energiebedarf jährlich etwa 3.000 bis 12.000 kWh.

Bei Gegenverkehrstunneln ist deutlich mehr Energie notwendig, um die Frischluftzufuhr von 75 m³/s konstant aufrechtzuerhalten.

5 Diskussion und Ausblick

Die im Beitrag gewonnenen Erkenntnisse bieten eine fundierte Grundlage für weiterführende Überlegungen zur Tunnelsicherheit im Umgang mit neuen Fahrzeugtechnologien. Ein zentrales Thema ist dabei die Sicherstellung einer kontinuierlichen Luftströmung, die mit einem gewissen Energieaufwand verbunden ist und daher eine vertiefte Betrachtung verdient.

Aus übergeordneten Sicherheitsüberlegungen wird in bestimmten Richtungsverkehrstunneln eine minimale Strömungsgeschwindigkeit von typischerweise 1 m/s in Fahrtrichtung dauerhaft gewährleistet. Damit werden mehrere Ziele verfolgt:

- Minimierung der Folgen einer verzögerten Branderkennung
- Vermeidung des Ansaugens kalter Luft entgegen der Fahrtrichtung, was zu beschlagenen Scheiben führen kann
- Vermeidung des Ansaugens von Nebel entgegen der Fahrtrichtung, was die Sicht beeinträchtigen kann
- Sicherstellung eines ausreichenden Luftwechsels zur Vermeidung von Bereichen mit schlechter Luftqualität

Wie in diesem Artikel dargelegt, sprechen zwei weitere Aspekte dafür, kontinuierlich eine Luftströmung in Fahrtrichtung sicherzustellen:

- Verdünnung von Schadstoffen bei Bränden von Elektrofahrzeugen, die aufgrund geringer Rauchentwicklung möglicherweise nicht als Brand erkannt werden
- Minimierung der Wahrscheinlichkeit von Wasserstoffexplosionen

Als Ausblick sei auf das laufende DACH-Forschungsprojekt „Brände von Elektro-Lkw in Straßentunneln“ hingewiesen, das bis Ende 2026 spannende zusätzliche Erkenntnisse beisteuern dürfte. Zudem wird erwartet, dass die Arbeitsgruppe 4 von PIARC im Jahr 2027 eine aktualisierte Fassung ihres Berichts zu New Energy Carriers (NEC) vorlegt.

Danksagung

Der Autor dankt den Mitgliedern der Richtlinienausschüsse von PIARC und RVS für ihre wertvollen Beiträge und fachlichen Hinweise, die in die Erarbeitung dieses Papiers eingeflossen sind.

Literatur

[1] PIARC (2019): Road Tunnel: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation. Technical Committee D.5 Road Tunnels, 2019R02, ISBN 978-2-84060-500-3

[2] RVS 09.02.32 (Österreich): Dimensionierungsgrundlagen für Tunnellüftungsanlagen, Entwurf vom 2025-06-18

[3] PIARC (2023): Impact of new propulsion technologies on road tunnel operations and safety, A PIARC technical report, technical committee 4.4 tunnels, 2023R34EN, ISBN 978-2-84060-822-6

[4] EU-Regulation No 134. Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV) [2019/795] dated 2019-05-17

[5] HyTRA (2023): Ergebnisbericht, November 2023, [Online]. Verfügbar unter: https://projekte.ffg.at/projekt/4091428

[6] Europäische Kommission (2020): Förderung einer klimaneutralen Wirtschaft: Kommission legt Pläne für das Energiesystem der Zukunft und sauberen Wasserstoff vor, Pressestatement, Brüssel

[7] MSB (2025): Sammanställning av bränder i elfordon och eltransportmedel år 2018–2024, Myndighet för samhällsskydd och beredskap (MSB), Swedish Civil Contingencies Agency, MSB 2025-06271, 2025-04-30

[8] BRAFA (2021): Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen, VIF 2018, September 2021, TUG/IVT - Bericht Nr. I-20/21/PSt-V&U Inst-18/13/640 vom 08.09.2021

[9] AGT (2020): Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen, Forschungsprojekt AGT 2018/006, Bericht AGT/VSS1678, August 2020

[10] VSS (2018): Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände, VSS 2016/221, Bericht VSS 1630, Juni 2018

[11] SO/IEC 80079-20-1:2017: Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data

[12] Elbtunnel 1st and 4th tube, in-tunnel air-velocity measurements for 2024 by the curtesy of Ms Christina Kluge, Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Nord, TBZ (Tunnelbetrieb-Kompetenzzentrum) Hamburg

[13] Oume and Kasamori tunnels, in-tunnel air-velocity measurements for twelve months by the curtesy of Mr Atsushi Ichikawa, East Nippon Expressway Company (East NEXCO), Tokyo, Japan

[14] Bolungarvíkurgöng (bzw. Óshlíðargöng), Iceland, measurements of in-tunnel flow velocities for the year of 2013, Vegagerdin 2014

[15] H facts 1.008, h2_safety_fsheet.pdf, www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells