

# Aerodynamik an Stromabnehmern in kleinen Tunnelquerschnitten – Problem für schnellfahrende Züge?

Wolfgang Kapfenberger, Wien (AT); Michael Flückiger, Urs Wili, Bern (CH); Jörg Heland, Michnea Dumitra, München; Werner Krötz, Frankfurt; Detlef Höregott, Zürich (CH)

Tunnelquerschnitte auf Neubaustrecken werden aus Kostengründen optimiert und bei der Sanierung von Ausbaustrecken teilweise reduziert. Bei kleinen Querschnitten stellt sich die Frage, wie sich Aerodynamik, Luftströmung und Kontaktkraft des Stromabnehmers im Tunnel verhalten. Durch die Arbeitsgruppe *Aerodynamik an Stromabnehmer in kleinen Tunneln* wurde mit Messungen und Simulationen untersucht, ob bei der Minimierung von Tunnelquerschnitten die Vorgaben der Euro-Normen und der TSI Energie noch eingehalten werden können.

## AERODYNAMICS OF PANTOGRAPHS IN SMALL CROSS-SECTIONS OF TUNNELS – PROBLEMS FOR TRAINS RUNNING WITH HIGH SPEEDS?

Cross-sections of tunnels for new lines are optimised for cost-saving and they are partly reduced during the renovation of upgraded lines. In case of small cross-sections, questions concerning the aerodynamics, the air flow and the contact force of the pantograph inside the tunnel are raised. The Working Group *Aerodynamics of current collectors in small tunnels* examined by means of measurements and simulations whether in case of the minimization of the cross-sections of tunnels the specifications of the European standards and the TSI Energy can still be fulfilled.

## AERODYNAMIQUE DES PANTOGRAPHES DANS DES TUNNELS A COUPES TRANSVERSALES REDUITES – PROBLEMES POUR DES TRAINS A HAUTES VITESSES?

Les coupes transversales des tunnels sont sur les lignes nouvelles optimisées pour des raisons de réduction des coûts et sur les lignes aménagées elles sont partiellement réduites dans le cadre de travaux de rénovation. Dans les cas de petites coupes transversales, des questions concernant l'aérodynamique, le courant d'air et la force de contact des pantographes à l'intérieur du tunnel peuvent se poser. Le Groupe de travail *Aérodynamique des pantographes dans des tunnels à coupes transversales réduites* a examiné, moyennant de mesures et de simulations, si au cas d'une minimalisation des coupes transversales des tunnels les spécifications des normes Européennes et de la STI Énergie peuvent toujours être respectées.

## 1 Einführung

Im Zusammenhang mit den Abnahme- und Prüffahrten im zirka 34,6 km langen Lötschberg-Basistunnel im Jahr 2007 wurden erstmalig im Rahmen einer Inbetriebnahme aerodynamische Messfahrten zur Erfassung der Luftbewegung oberhalb von Fahrzeugdächern und deren Auswirkung auf die Kontaktkraft im System Stromabnehmer/Fahrleitung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zusammenfassend in [1] publiziert. Hierin wurde empfohlen, die aerodynamischen Ergebnisse im Rahmen weiterer Projekte zu analysieren und gleichzeitig Handlungsempfehlungen zur Errichtung von Tunneln für Hochgeschwindigkeitsstrecken sowohl im nationalen als auch im europäischen Hochgeschwindigkeitsnetz zu erstellen.

Bei Oberleitungsmessfahrten im alten Schlüchterner Tunnel auf der Strecke Frankfurt/Main – Fulda im Jahr 2010 konnte die erforderliche Kontaktkraft bei

$v=160$  km/h gerade noch gewährleistet werden. Dadurch rückte das aerodynamische Verhalten Stromabnehmer/Oberleitung erneut in den Fokus.

Zu diesem Zeitpunkt stand auch die Frage des Verhaltens des Stromabnehmers in künftigen eingleisigen Tunneln mit zirka 51,5 m<sup>2</sup> Fläche an. Diese Fragestellung wurde im Jahr 2011 im Zusammenhang mit weiteren Neubauprojekten an den Bauherrenvertreter der DB Netz AG herangetragen.

Nach Konsultation mit der Österreichischen Bundesbahn (ÖBB) und der Schweizer Bundesbahn (SBB) musste festgestellt werden, dass das aerodynamische Verhalten von Stromabnehmer und Oberleitung im Tunnel und hier insbesondere in kleinen eingleisigen Tunneln nach den durchgeführten Messungen im Lötschberg-Basistunnel noch weiterer Untersuchungen bedarf.

In Abstimmung mit der technischen Fachabteilung der DB Netz wurde im November 2011 durch die Bauherrenvertretung der DB Netz eine interdis-

ziplinäre Arbeitsgruppe ins Leben gerufen. In dieser Arbeitsgruppe sind sowohl die betroffenen Bahnen wie ÖBB, SBB, BLS, SNCF, DB als auch die Firmen Siemens, Balfour-Beatty Rail, Schunk Bahntechnik, Bombardier Transportation, Furrer+Frey und DB Projekt-Bau, die Projektgesellschaft AlpTransit Gotthard und DB Systemtechnik vertreten. Die Messfahrten selbst und die Auswertung dieser Fahrten werden durch die Ingenieurbereiche der DB Systemtechnik und Haerter Beratende Ingenieure (HBI) durchgeführt.

## 2 Durchgeführte aerodynamische Messungen

### 2.1 Ausgangssituation

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt hat die Arbeitsgruppe sich bereits 14mal beraten und in den unterschiedlichsten Neubaustrecken und auch Bestands-tunneln (Tabelle 1) Messfahrten durchgeführt.

Die Messfahrten sollten die ursächlichen Zusammenhänge zwischen den Strömungsbedingungen und den dadurch auf die Stromabnehmer einwirkenden Kräften untersuchen. Auf Grundlage der erhobenen Daten ist eine genauere Beschreibung und Eingrenzung von Einflussfaktoren möglich. Die Messungen haben sowohl den strömungsbedingten Anstieg des aerodynamischen Anteils der Anpresskraft zwischen Schleifleiste und Oberleitung als auch der Widerstandskraft nach Tunneleintritt bestätigt.

### 2.2 Erste aerodynamische Messfahrten bei der ÖBB

Anfang des Jahres 2012 haben die Vertreter der ÖBB entschieden, im Rahmen der Inbetriebnahme der Neubaustrecke Sankt Pölten – Wien und der damit verbundenen Innovationsmessfahrten sofort auch aerodynamische Messungen durchzuführen. Anschließend fanden dann Messfahrten im Katzenbergtunnel der DB AG statt.

Im Jahr 2012 hat die ÖBB Infra AG die Neubaustrecken Wien – St. Pölten und Wörgl – Baumkirchen (Innsbruck) in Betrieb genommen, die Tunnel verschiedener Querschnitte enthalten.

- Auf der Strecke Wien – St. Pölten sind
- die Tunnelkette Perschlingtal (Raingrubentunnel, Stierschweiffeldtunnel, Hankenfeldertunnel, Atzenbruggertunnel, Saladorfertunnel) mit 76 m<sup>2</sup> Querschnitt zweigleisig einröhrig und
- der Wienerwaldtunnel mit 53,6 m<sup>2</sup> Querschnitt eingleisig zweiröhrig gebaut worden.

Auf der Strecke Wörgl – Baumkirchen sind

- sowohl der Münsterertunnel mit Querschnitten von 73,5 m<sup>2</sup> bis 79,1 m<sup>2</sup>
- als auch der Terfenertunnel mit Querschnitten von 76,5 m<sup>2</sup> bis 121,1 m<sup>2</sup> zweigleisig einröhrig gebaut worden.

Im Zuge der Abnahme- und Innovationsfahrten ist ein Aerodynamik-Messflügel der Firma HBI auf dem Dach der Messfahrzeuge railjet und ICE-S montiert worden (Bild 1).

TABELLE 1

### Übersicht über durchgeführte aerodynamische Messfahrten.

Tunnelbezeichnung	Zeitraum	Fläche m <sup>2</sup>	Geschwindigkeit km/h	Fahrzeugeinsatz
Lötschberg-Basistunnel	2006	45,0	230	2 Re 460, ICE-S
Wienerwaldtunnel	2012	53,6	250	railjet, ICE-S
Stierschweiffeldtunnel	2012	76,0	250	railjet, ICE-S
Katzenbergtunnel	2012/13	62,0	275	ICE-S, DoSto
Ostberger Tunnel	2013	52,0	150	DoSto
Berlin Nord-Südtunnel	2013	uneinheitlich	130	DoSto
Gotthard-Basistunnel	2014	41,0	220	2 x Re 460
Bibratunnel	2014	86,0	330	ICE-S
Finnetunnel	2014	72,0	330	ICE-S
Osterbergtunnel	2014	86,0	330	ICE-S
Schlüchterner Tunnel	2014	58/37,7	160	BR 114+Wagen

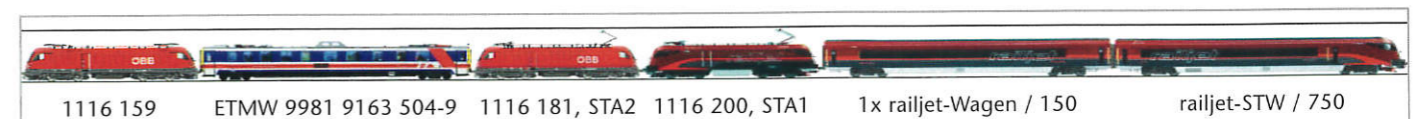


Bild 1: Messzuganordnung ÖBB (Grafik: ÖBB).

Die ersten Messfahrten fanden im Juni 2012 auf der Strecke Wien – St. Pölten mit dem railjet der ÖBB statt. Um Messergebnisse zur Aerodynamik auf dem Dach des Triebfahrzeuges für verschiedene Abstände, nämlich 10m, 63m, 116m und 195m, zwischen der Spitze der Zugsinheit und dem Messflügel auf dem Triebfahrzeug zu erhalten, wurde die Länge des railjet variiert. Die Messungen in den Tunneln wurden anschließend mit denen auf der freien Strecke verglichen.

Die anschließenden Messfahrten im Unterinntal auf der Strecke Wörgl – Baumkirchen wurden ebenfalls mit dem railjet durchgeführt und mit den Fahrten Wien – St. Pölten verglichen. Dadurch dass auch andere Tunnel mit derselben Messzuganordnung untersucht wurden, ergab sich eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Im August 2012 wurden dann bei den Innovationsfahrten Wien – St. Pölten ebenfalls Aerodynamikmessungen durchgeführt. Gegenüber den Messfahrten im Juni auf der gleichen Strecke kam diesmal mit dem ICE-S der DB Systemtechnik ein anderes Fahrzeug zum Einsatz. Die anderen Parameter wurden nicht geändert, um realistische Vergleiche zu bekommen.

Sämtliche Messungen der Aerodynamik wurden durch HBI durchgeführt und ausgewertet. Die Messungen der Stromabnehmerkräfte wurden durch die ÖBB für railjet und die DB Systemtechnik für ICE-S durchgeführt und ausgewertet. Die Daten der Messungen in Österreich wurden in der Arbeitsgruppe für einen gemeinsamen Bericht zum aerodynamischen Verhalten der Stromabnehmer im Tunnel verwendet.

### 2.3 Weitere Messfahrten bei DB, SBB und ÖBB

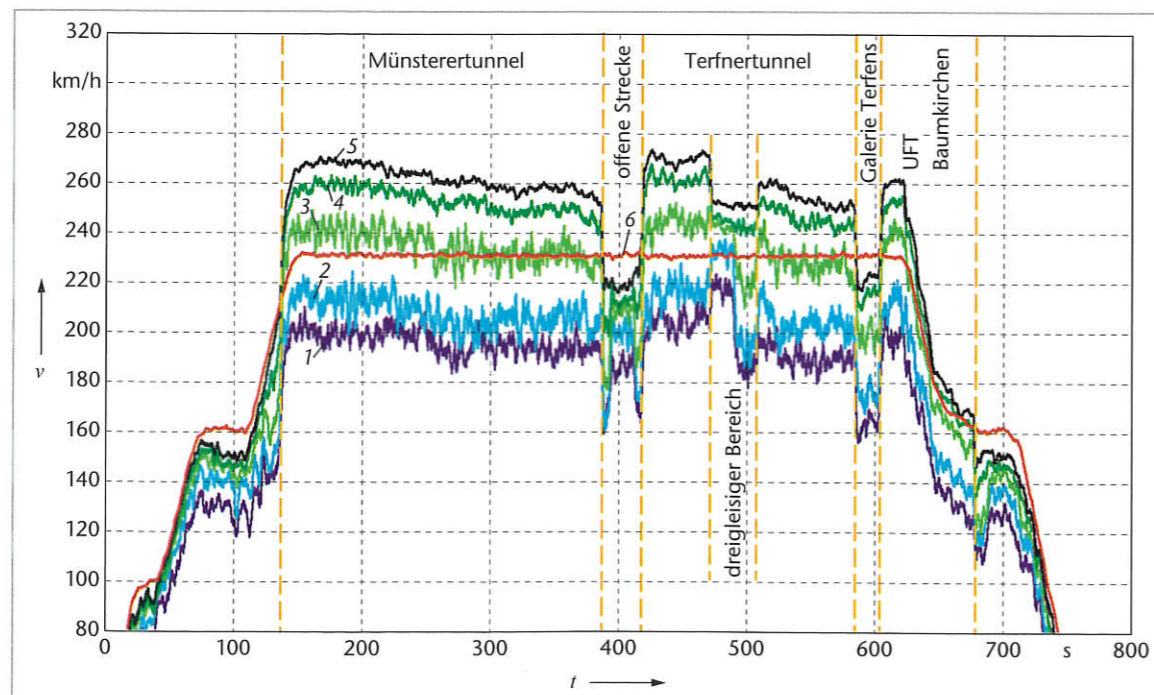
Die Messfahrten wurden bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit dem railjet der ÖBB, dem ICE-S der DB Systemtechnik und der Re 460 der SBB in unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt.

Im Jahr 2014 konnten erstmalig aerodynamische Messungen im Gotthard-Basistunnel im Bereich Faido – Bodio durchgeführt werden.

Außerdem erfolgten Ende 2014 umfangreiche Versuchsfahrten in Deutschland im Rahmen von Messungen auf der Neubaustrecke VDE 8.2 mit dem ICE-S. Ferner fanden im November 2013 in drei Tunneln der DB Netz AG auch Fahrten mit zwei Doppelstockeinheiten mit jeweils zwei elektrischen Lokomotiven statt (Tabelle 1). Die Fahrten durch den Nord-Süd-Tunnel in Berlin haben dabei auch zur Beleuchtung der Fragen hinsichtlich Querschnittsänderungen in Tunneln beigetragen.

Für die Untersuchung der aerodynamischen Einflüsse im Tunnel auf das Zusammenwirken von Stromabnehmer und Oberleitung sind die wesentlichen Untersuchungs- und Messgrößen das Strömungsverhalten im Tunnel sowie die auf den Stromabnehmer einwirkende Widerstandskraft  $F_x$  in Fahrtrichtung und die Auftriebskraft  $F_z$ .

Bei allen Messfahrten ist im Rahmen des Versuchsbetriebs eine Variation von Parametern soweit möglich realisiert worden. Hierzu sind messtechnisch ausgerüstete Stromabnehmer vor- und nachlaufend geführt und auch die Konfiguration Spieß-/Kniegang variiert worden. Um Aussagen zur Geschwindigkeits-



**Bild 2:**

Strömungs- und Zuggeschwindigkeiten auf der NBS Unterinntal (Grafik: HBI).  
1 ... 5 Luftgeschwindigkeit für die Sonden 1 bis 5      6 Fahrgeschwindigkeit

abhängigkeit der beobachteten Effekte zu erhalten, wurden die Messfahrten mit verschiedenen Zuggeschwindigkeiten durchgeführt.

Ein typischer zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten in fünf unterschiedlichen Höhen über dem Zugdach bei einer Messfahrt mit einem railjet auf der neuen Unterinntal-Strecke von Kundl/Radfeld in Richtung Innsbruck ist in Bild 2 dargestellt. Der Zug verkehrte dort mit bis zu 230 km/h und befuhr unter anderem mehrere Tunnel verschiedener Querschnitte, die Galerie Terfens und offene Streckenabschnitte.

Die Strömungsgeschwindigkeiten über dem Zugdach hängen von verschiedenen Faktoren wie Tunnelquerschnittsfläche und Zuggeometrie ab. Im Vergleich zur offenen Strecke und der Galerie wurden bei Tunneldurchfahrten höhere Strömungsgeschwindigkeiten aufgezeichnet; sie können mit zunehmender Distanz zum Zugdach deutlich ansteigen und höhere Werte als die Zuggeschwindigkeit erreichen. Im Allgemeinen kann außerdem davon ausgegangen werden, dass die Strömungsgeschwindigkeiten über dem Zugdach mit höherem Versperungsmaß, dem Verhältnis von Zugquerschnittsfläche zu Tunnelquerschnittsfläche, und höherer Zuggeschwindigkeit zunehmen.

Die Messergebnisse in Bild 2 geben sehr gut typische Strömungsgeschwindigkeits-Verläufe wieder. Dabei zeigt Sonde 5 mit  $H=0,80\text{m}$  über dem Zugdach ein ähnliches Verhalten wie eine im Bereich der Wippe befestigte Prandtl-Sonde. Ist eine Sonde im Bereich der Wippe montiert, so kann damit die maximale Strömungsgeschwindigkeit messtechnisch erfasst werden, da sich der obere Teil des Stromabnehmers üblicherweise außerhalb der Grenzschicht befindet.

### 2.4 Auswertung der durchgeführten Messfahrten

Zusammenfassend haben die durchgeführten Messungen bestätigt, dass es in Abhängigkeit von der freien Querschnittsfläche zwischen Tunnel- und Zugquerschnitt zu einer Erhöhung der relativen Strömungsgeschwindigkeit über dem Zugdach kommt. Je enger die Tunnel sind, desto höher fällt diese aus. Die Strömungserhöhung führt zu einer noch stärker ausgeprägten Erhöhung der Widerstandskraft  $F_x$  in Fahrtrichtung und des aerodynamischen Anteils der Auftriebskraft  $F_{z,aero}$  auf den Stromabnehmer.

Es ist nachgewiesen worden, dass insbesondere beim Tunneleintritt und bei Querschnittsprüngen im Tunnel sich die Strömungsgeschwindigkeit und die Kräfte stark erhöhen.

Der Effekt kann in einem vereinfachten Modell in Abhängigkeit von Tunnel- und Zugquerschnittsflächen wiedergegeben werden. Die relativen Anstiege von Strömungsgeschwindigkeit und Kräften sind dabei im Wesentlichen geschwindigkeitsunabhängig und nur von der freien Querschnittsfläche abhängig.

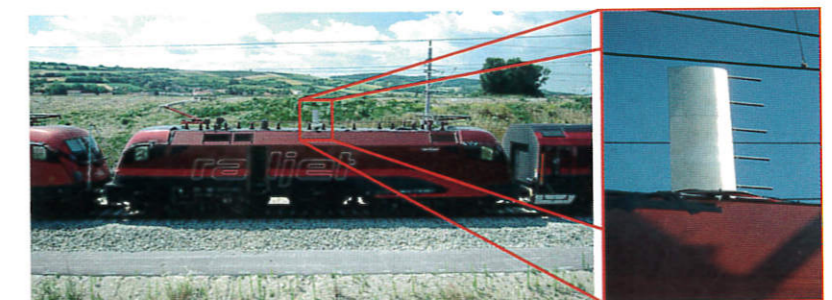
Neben Tunnelquerschnitt und Zugquerschnitt sind als Einflussfaktoren identifiziert worden:

- Plötzliche Querschnittsveränderungen, zum Beispiel Querschnittsprünge in Tunneln; hierdurch kommt es zu schnellen Veränderungen der Kräfte/Strömung, wodurch es im Zusammenspiel Oberleitung/Stromabnehmer zu einer dynamischen Anregung kommen kann.
- Tunnellänge beeinflusst die Strömungsentwicklung und die Druckverläufe in Tunneln
- Stromabnehmertyp.
- Fahrtkonfiguration des Stromabnehmers; in Abhängigkeit von Spieß- oder Kniegang zeigen Stromabnehmer ein unterschiedliches Verhalten.
- Zuglänge und Abstand des Stromabnehmers zur Zugspitze; je größer beide sind, desto dicker ist die Grenzschicht über dem Zugdach und desto mehr Einfluss kann diese auf den Stromabnehmer haben.
- Gestaltung des Zugdaches; die geometrische Gestaltung hat einen Einfluss auf das Grenzschichtwachstum über dem Zugdach.
- Stromabnehmerabstand; mit geringem Abstand zueinander können sich Stromabnehmer gegenseitig beeinflussen, maßgeblich durch die Weitergabe von Schwingungen über die Oberleitung. Dieses Verhalten ist auch aus früheren Untersuchungen zur Stromabnehmerkonfiguration von Triebzügen in Mehrfachtraktion bekannt und kann insbesondere im Hochgeschwindigkeitsverkehr auch zu betrieblich relevanten Einschränkungen der zulässigen Geschwindigkeit führen.

## 3 Versuchsaufbau mit HBI-Messflügel und Messtechnik der DB Systemtechnik

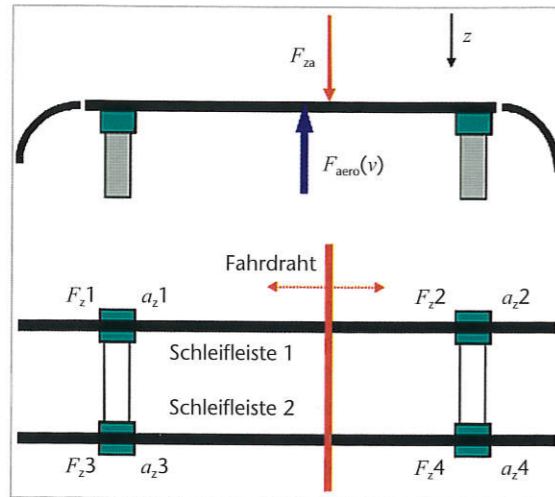
### 3.1 Messflügel von HBI

Zur Bestimmung des Luftgeschwindigkeitsprofils über dem Dach eines Schienenfahrzeugs wurde ein spezifisches Strömungsmessgerät, ein Messflügel nach Bild 3 entwickelt.

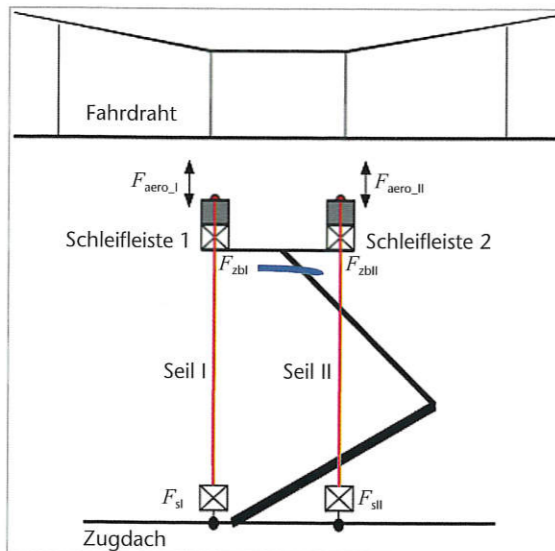


**Bild 3:**

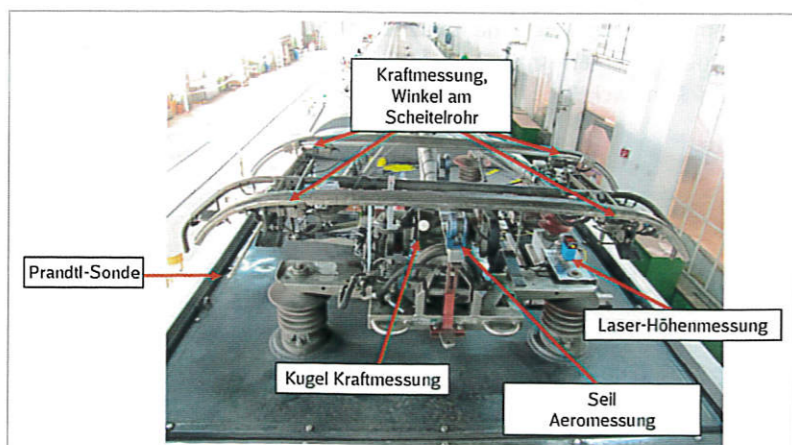
Messflügel zur simultanen Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Abständen über dem Zugdach eines railjet, Gesamtanordnung und Detail (Quelle: HBI).



**Bild 4:** Kontaktkraftmessung nach EN 50317 (Bilder 4 bis 7: DB Systemtechnik).



**Bild 5:** Messung der aerodynamischen Kraft durch Schnurmessung.



**Bild 6:** Stromabnehmer mit Prandtl-Sonden, eine Sonde für jede Fahrtrichtung, und Kugelsensor.

Im Messflügel werden die Luftgeschwindigkeiten mit Prandtl'schen Staurohren, so genannten Prandtl-Sonden, gemessen. Die Luftgeschwindigkeit wird über fünf Prandtl-Sonden ermittelt, die an zehn verschiedenen Positionen im Messflügel eingesetzt werden können.

Primäre Größen bei der Luftgeschwindigkeitsermittlung sind der Staudruck  $p_0$  und der statische Druck  $p_s$  in der Strömung. Die Differenz beider Drücke ergibt über die Bernoulli'sche Gleichung den dynamischen Druck in der Strömung. Unter Berücksichtigung der Luftdichte  $\rho$  lässt sich daraus die Geschwindigkeit  $v_0$  der Luftströmung ermitteln:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{k\rho}(p_0 - p_s)} \quad (1)$$

Der Faktor  $k$  in der Gleichung ist ein Korrekturfaktor, welcher mitberücksichtigt werden soll, falls die Kompressibilität der Luft bei sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten nicht vernachlässigt werden darf. Er hängt von der Machzahl und somit von der Anströmgeschwindigkeit selbst ab.

### 3.2 Messtechnik der DB Systemtechnik

Die Kräfte zwischen Stromabnehmer und Oberleitung werden in Fahrtrichtung und in vertikaler Richtung über Sensoren an den Befestigungspunkten der Schleifleisten messtechnisch erfasst. Zusätzlich finden eine Beschleunigungskorrektur und eine Korrektur der aerodynamischen Kräfte auf die Schleifleiste gemäß EN 50317 statt (Bild 4).

Zur Erfassung der aerodynamischen Gesamtkraft auf den Stromabnehmer werden so genannte Schnurmessungen (Bild 5) durchgeführt, bei denen der Stromabnehmer knapp unter dem Fahrdrabt abgehängt mitgeführt wird und die Gesamtkraft in vertikaler Richtung mittels Seilsensoren gemessen wird.

Für die Messung der aerodynamischen Verhältnisse auf dem Dach im Bereich der Stromabnehmer standen ein Messflügel von HBI (Bild 3) sowie Prandtl-Sonden und ein Kugelsensor (Bild 6) zur Verfügung. Während der Messflügel die Geschwindigkeit in der Grenzschicht über dem geerdeten Zugdach erfasst und einer Quantifizierung zugänglich macht, ist die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des oberen Teils des spannungsführenden Stromabnehmers wichtig für eine verlässliche Quantifizierung der auftretenden Effekte bei Tunnelfahrt. Dies erlaubt die Messung in der freien Strömung auf Höhe der aerodynamisch wirksamen Bauteile des Stromabnehmers und im äußeren Bereich der Grenzschicht, wo die mittlere Geschwindigkeit derjenigen der freien Strömung fast äquivalent ist.

Deswegen wird die Strömungsgeschwindigkeit nach Möglichkeit nahe der Schleifleisten erfasst. Hierzu stehen Prandtl-Sonden zur Verfügung, die

in beide Fahrtrichtungen unterhalb der Schleifleisten montiert werden können und die Strömungsgeschwindigkeit in beide Fahrtrichtungen erfassen. Zusätzlich verfügt die DB Systemtechnik über einen eigens entwickelten so genannten Kugelsensor, der anhand des Widerstandes einer im Windkanal kalibrierten Sensorkugel als Widerstandskörper erlaubt, die Strömungsgeschwindigkeit zweidimensional zu erfassen.

Die Messtechnik ist in Windkanalversuchen qualifiziert worden. Außerdem haben grundsätzliche Untersuchungen zur Aerodynamik des Stromabnehmers im Windkanal stattgefunden. Die daraus resultierenden Erkenntnisse haben zum Beispiel der Optimierung der Positionierung der Strömungsmesstechnik gedient. Die grundsätzliche Strömung ist mit optischen Verfahren (*Particle Image Velocimetry, PIV*) in Windkanalexperimenten untersucht worden.

Die gleichzeitige Messung der Kräfte und der Strömungsgeschwindigkeit erlaubt die Korrelation der Werte zueinander und die Analyse der Einflussfaktoren. Zusätzlich kann die Geometrie des Tunnels hierzu anhand der Streckenkilometrierung in Beziehung gesetzt werden.

## 4 Effekte im Tunnel

### 4.1 Grenzschichten

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine vereinfachte Abschätzung der Strömungseffekte bei Tunnelfahrten und eine Quantifizierung der resultierenden Krafterhöhungen möglich sind. Die Effekte im Vergleich von Tunneln unterschiedlicher Querschnittsflächen, Zügen unterschiedlicher Länge und aerodynamischer Güte und der relativen Position eines Stromabnehmers auf dem Zug sind beleuchtet worden.

In Bild 7 ist der prinzipielle Verlauf einer Dachgrenzschicht zusammen mit verschiedenen Stromabnehmerpositionen und -konfigurationen zu sehen. Eine Grenzschicht ist der Bereich über einer überströmten Fläche, in der die mittlere Strömungs-

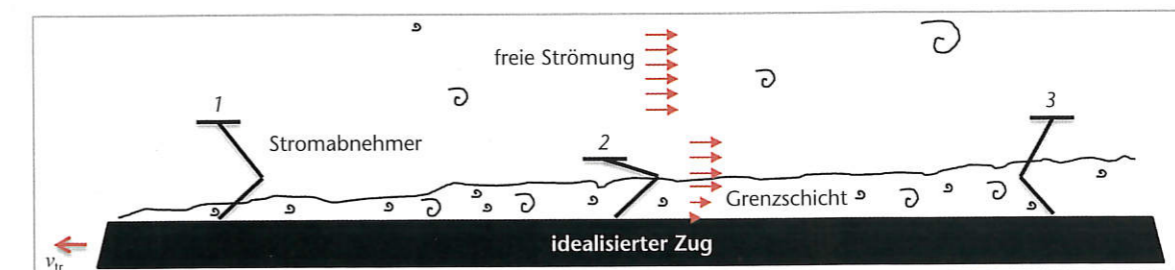
geschwindigkeit von 0 m/s direkt an der Oberfläche der Platte bis auf 99% der Außengeschwindigkeit der freien Strömung zunimmt. Die Höhe der Grenzschicht schwankt in der Regel um rund 20% um die mittlere Grenzschichthöhe. Die Grenzschichtdicke steigt in Strömungsrichtung an, bis sie eine relativ konstante Höhe erlangt. Diese kann bei langen Zügen mehrere Meter betragen.

### 4.2 Kräfte auf Stromabnehmer und Oberleitung

Die Kräfte zwischen Stromabnehmer und Oberleitung setzen sich im Wesentlichen zusammen aus der statischen Kraft, die im Stand eingestellt wird mit Einstellbereich 60 N bis 90 N bei AC-Stromabnehmern, und der durch die aerodynamischen Verhältnisse am Stromabnehmer entstehenden Widerstände in Abhängigkeit von den Windgeschwindigkeiten. Zum Beispiel durch das Anbringen von Windleitblechen oder bei gesteuerten Stromabnehmern durch die geschwindigkeits- und/oder ortsabhängige Einstellung des „statischen Anteils“ der Kraft kann Einfluss auf die Kontaktkraft genommen und diese optimal eingestellt werden. Die Vorgaben für die mittleren Kontaktkräfte über der Geschwindigkeit sind in der EN 50367 beschrieben, die auch in den entsprechenden TSI referenziert wird. Die Vorgaben für die zur Messung zu verwendende Messtechnik und die notwendigen Validierungs- und Auswerteprozeduren sind in der EN 50317 behandelt.

### 4.3 Staudruck und Auswirkung auf die Oberleitungsbauteile

Im Tunnel treten bei Zugfahrt Luftströmungen auf, die als Last auf Einbauten einwirken. Oberleitungen erfahren in Hochgeschwindigkeitstunnel daher Strömungslasten, wie sie auch bei hohen Windgeschwindigkeiten im Freien auftreten. Die Strömungslasten können deshalb bei der Auslegung von Oberleitungskomponenten eine Rolle spielen.



**Bild 7:** Skizze zur Strömung über einem Zug mit Grenzschicht und verschiedenen Stromabnehmerpositionen 1 bis 3.

## 5 Auswirkung auf vorhandene Regelwerke und abgeleitete Ziele für die Arbeitsgruppe

Da diese ersten Ergebnisse sich auch auf das europäische technische Normungswerk wie EN 50367 auswirken können, haben die Arbeitsgruppenmitglieder frühzeitig entschieden, die UIC und das Eisenbahncert in die Arbeitsgruppe zu involvieren.

Welche Ziele hat sich die Arbeitsgruppe nun für die Zukunft gestellt und welche technischen Parameter will sie vorschlagen oder festlegen?

Wegen der teilweisen Versperrung des Tunnelquerschnitts durch das Fahrzeug ist die Anströmgeschwindigkeit der Stromabnehmerwippe höher als auf der freien Strecke und höher als die Fahrgeschwindigkeit. Dadurch wird die Kontaktkraft unmittelbar beeinflusst. Die vom Fahrzeug verdrängte Luft wird im Tunnel teils vor dem Zug hergeschoben, teils strömt sie mit hoher Geschwindigkeit am Zug vorbei nach hinten. Diese am Fahrzeug vorbei fließende Luft wirkt auf die Stromabnehmer-Wippe und die gegebenenfalls vorhandenen Windleitbleche. Wenn die Luftströmung gleichmäßig ist, kann der aerodynamische Auftrieb in der Gestaltung des Stromabnehmers, der Windleitbleche und der Bemessung der Anhubkraft berücksichtigt werden, so dass ausreichende Stromabnahmequalität resultiert. Spontan auftretende Veränderungen der Strömung beeinflussen unmittelbar die Anpresskraft der Schleifstücke und können zu Kontaktunterbrechungen führen.

Es wird geprüft, inwieweit durch geeignete Vorgaben in der EN 50367, Technische Kriterien für das Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung für einen freien Zugang, erreicht werden kann, dass die Parameter, welche die Luftströmung beeinflussen, so aufeinander abgestimmt werden können, dass ausreichende Kontaktkraft und Stromabnahmequalität sichergestellt wird.

Für den Nachweis der Kompatibilität ist vorgesehen, Referenz-Fahrzeuge und Referenz-Tunnel zu definieren. Die Kompatibilität neuer Fahrzeuge soll dann in den Referenz-tunneln durch Vergleich mit dem Verhalten des Referenzfahrzeugs nachgewiesen werden. Mit anderen Worten: Das neue Fahrzeug muss sich im Referenz-tunnel mindestens gleich gut verhalten wie das Referenzfahrzeug. Analog soll ein neuer Tunnel beim Zusammenwirken mit dem Referenzfahrzeug keine größeren aerodynamischen Wirkungen erzeugen als der entsprechende Referenz-tunnel.

## 6 Weiteres Vorgehen

Für die Belange der aerodynamischen Untersuchungen ist angedacht, die Züge in drei Segmente zu unterteilen:

- Führendes Fahrzeug mit unterschiedlichen Kopf- formen, zum Beispiel stumpf, spitz, Entenschnabel
- End-Fahrzeug unterschiedlicher Form
- Zwischen-Fahrzeuge, eingereiht zwischen führendem und End-Fahrzeug, variable Länge einheitlicher Querschnitt oder mit in Längsrichtung abgestufter Höhe, zum Beispiel einstöckige gemischt mit Doppelstock-Wagen oder Wagen mit erhöhten Kuppeln

Die Stromabnehmer können an verschiedenen Stellen angebracht sein. Sie werden dadurch unterschiedlichen Anströmungen ausgesetzt.

Für die aerodynamischen Nachweise werden folgende Mess-Positionen definiert:

- 1 über dem Führerraum des führenden Fahrzeugs
- 2 am hinteren Ende des führenden Fahrzeugs
- 3 auf einem der Zwischenwagen
- 4 am zugseitigen Ende des End-Fahrzeugs
- 5 über dem hinteren Führerraum oder am hinteren Ende des Endfahrzeugs

Die maßgebenden Segmente des Tunnels sind:

- Einfahrtsportal
- Tunnelabschnitt, eventuell mit unterschiedlichen Querschnitten
- Querschnittsänderung klein zu groß oder schmal zu breit oder niedrig zu hoch
- Querschnittsänderung groß zu klein oder breit zu schmal, hoch zu niedrig
- Ausfahrtsportal

Der Einsatz von dreidimensionalen Strömungssimulationen wäre im Zusammenhang mit der Tunnelgestaltung zu prüfen.

Bei gegebener Größe der Grenzschichten und Fahrzeug- und Tunnelquerschnitte bestimmt die Fahrdrahthöhe, ob die Wippe innerhalb oder außerhalb der Grenzschicht fährt.

Beim Stromabnehmer ist grundsätzlich zu prüfen, ob die mittlere Kontaktkraft in Funktion der Geschwindigkeit, wie in Figur A.8 der EN 50367:2012 dargestellt, eingehalten wird, wobei gegebenenfalls anstelle der Fahrgeschwindigkeit die Anströmgeschwindigkeit einzusetzen ist. Im Weiteren wird sein Verhalten im Tunnel davon beeinflusst werden, ob seine Windleitbleche im Bereich laminarer oder turbulenter Strömung liegen oder gar hinter den Dachaufbauten oder -verkleidungen versteckt sind.

Die Größe der Kontaktkraftspitzen und -minima wird im Weiteren beeinflusst durch die Reaktion der Oberleitung auf den Anhub durch den Stromabnehmer. Maßgebend dafür sind ihre Elastizität und ihr Schwingungs- und Dämpfungsverhalten.

Bahntunnel werden seit über hundert Jahren elektrisch befahren, ohne dass die aerodynamischen Einflüsse vertieft untersucht oder besonders berücksich-

tigt worden wären. Es muss daher eine Grenze der betrachteten Parameter geben, unterhalb welcher elektrischer Verkehr generell und ohne zusätzliche Überprüfung möglich ist.

Die Arbeitsgruppe hat sich vorgenommen, auch ein Diagramm auszuarbeiten, welches das größte Versperrungsmaß für unbedenklichen Betrieb als Funktion der Geschwindigkeit zeigt und das gegebenenfalls die Gleichförmigkeit von Tunnel und Zug, die Stellung der Stromabnehmer auf dem Zug und die Fahrdrahthöhe als Parameter hat.

Inwieweit hier Anpassungen in der EN 50367 angestrebt werden müssen, wird von den weiteren Untersuchungen und den dabei erzielten Ergebnissen abhängen.

In der Arbeitsgruppe werden gegenwärtig weitere Abklärungen zu folgenden Themenkreisen diskutiert:

- Grenzschicht entlang der Tunneldecke
- Einfluss von Unregelmäßigkeiten und Einbauten im Tunnelquerschnitt
- Einfluss von Aufbauten auf dem Fahrzeugdach

## Literatur

- [1] Schweller, M.; Hagenah, B.; Lörtscher, M.; Wüest, O.; Matthes, R.: Aerodynamische Bedingungen im einspurigen Lötschberg-Basistunnel. In: Elektrische Bahnen 105 (2007), H. 11, S. 592–602.

### AUTOREN DATEN



**Ing. Wolfgang Kapfenberger** (50), Studium der Elektrotechnik an der HTL St. Pölten; seit 1979 Streckenmanagement und Anlagenentwicklung bei den ÖBB, Fachbereich Elektrotechnik, Teamkoordinator Anlagen- technik und Instandhaltung.

Adresse: ÖBB-Infrastruktur AG, Praterstern 4, 1020 Wien, Österreich; Fon: +43 1 93000 34306, Mobil: +43 664 8417602; E-Mail: wolfgang.kapfenberger@oebb.at



**Dr. Michael Flückiger** (36), Maschinenbaustudium und Doktorat an ETH Zürich, seit 2009 Projektleiter bei der HBI Haerter AG in Bern.

Adresse: HBI Haerter AG, Thunstr. 32, 3000 Bern 6, Schweiz; Fon: +41 31 35724-18; E-Mail: michael.flueckiger@hbi.ch



**Dr. Jörg Heland** (50), Physikstudium an Universität Gießen und Promotion an Universität-GH Wuppertal; verschiedene Tätigkeiten in der Forschung und Industrie; derzeit Leiter des Arbeitsgebietes Prüfung und Simulation Energietechnik der DB Systemtechnik GmbH.

Adresse: DB Systemtechnik GmbH, Völckerstr. 5, 80939 München, Deutschland; Fon: +49 89 1308 7469; E-Mail: joerg.heland@deutschebahn.com



**Dr. Werner Krötz** (57), Physikstudium an TU München; ab 1997 bei der DB Systemtechnik tätig; seit 2011 Leiter Abteilung Fahrleitungen bei DB Netz.

Adresse: DB Netz AG, Mainzer Landstr. 181, 60327 Frankfurt/Main, Deutschland; Fon: +49 69 265 45230; E-Mail: werner.kroetz@deutschebahn.com



**Dipl. El.-Ing. ETHZ Urs Wili** (70), Studium Elektrotechnik in Zürich; 1969 Ingenieur bei der Brown, Boveri AG in Oerlikon; 1974 Ingenieur bei der Sektion Fahrleitungen des Kreises 2 der SBB in Luzern, Sektionschef Fahrleitungen und 1985 Chef der Abteilung elektrische Anlagen bei der Baudirektion SBB in Bern; 1999 Leiter Kundenbeziehungen bei Telecom SBB; seit 2000 Mitglied der Geschäftsleitung der Furrer+Frei AG, Bern.

Adresse: Furrer+Frei AG, Thunstr. 35, 3000 Bern 6, Schweiz; Fon: +41 31 357-6132, Fax: -6105; E-Mail: ubwili@furrerfrei.ch



**Dipl.-Ing. Michnea Dumitra** (32), Studium Luft- und Raumfahrttechnik an Universität Stuttgart, seit 2012 Fachreferent Aerodynamik, DB Systemtechnik.

Adresse: DB Systemtechnik GmbH, Völckerstr. 5, 80939 München, Deutschland; Fon: +49 89 1308-7413; E-Mail: michnea.dumitra@deutschebahn.com



**Dipl.-Ing. Detlef Höregott** (65), Studium Fahrzeugtechnik an Ingenieurschule für Verkehrstechnik Dresden, ab 1964 Tätigkeit bei DR und DB, ab 2012 als Bauherrenvertretung der DB Netz AG Gebiet Knoten Halle/Leipzig bei Neubau- und Ausbauprojekten, Einführung TSI Energie; seit 2015 Sachverständiger der Signon-Schweiz für ausgewählte Fahrleitungsanlagen der Schweiz.

Adresse: SIGNON Schweiz AG, Member of TÜV Süd Group, Aargauerstr. 250, 8048 Zürich, Schweiz; Fon: +49 173 7733 208; E-Mail: detlefhoeregott@yahoo.de