

# Fahrdynamische Messfahrten im Gotthard-Basistunnel

*Steffen Schranil, Valérie Lavanchy, Bern (CH)*

Die Inbetriebnahme des Gotthard-Basistunnels wurde von einem umfangreichen fahrdynamischen Messprogramm begleitet. Dieses Programm verifizierte die zuvor in Rechnungen und Simulationen ermittelten Modellparameter und lieferte Erkenntnisse für die weitere Angebotsplanung sowie die stabile Bahnproduktion im Testperimeter. Es leistete damit einen wichtigen Beitrag zur Betriebsaufnahme im längsten Eisenbahntunnel der Welt.

## DRIVING DYNAMICS MEASUREMENT PROGRAM IN THE GOTTHARD BASE TUNNEL

The commissioning of the Gotthard Base Tunnel was accompanied by a comprehensive driving dynamics measurement program. This program verified the model parameters previously determined in calculations and simulations. It provided insights for further planning and stable railway operation in the test perimeter. Therefore the measurements made a major contribution to the operational start of the world longest railway tunnel.

## PROGRAMME D'ESSAI DE LA DYNAMIQUE DU MOUVEMENT DES VÉHICULES DANS LE TUNNEL DE BASE DU GOTTHARD

La mise en service du tunnel de base du Gothard a été accompagnée d'un vaste programme de mesures de la dynamique du mouvement des véhicules. Ce programme vérifiait les paramètres de modèle établis auparavant par des calculs et des simulations. Dans le cadre du périmètre des essais il contribuait à des connaissances pour le planning de l'offre et pour une exploitation ferroviaire stable. Il représente donc une contribution importante pour le démarrage de l'exploitation dans le tunnel ferroviaire le plus long du monde.

## 1 Einführung

Seit der Eröffnung des 57 km langen Gotthard-Basistunnels (GBT) am 1. Juni 2016 betreiben die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) den längsten und mit bis zu 2300 m Gebirgsüberdeckung tiefsten Eisenbahntunnel der Welt.

Der fahrplanmäßige Zugbetrieb in einem Tunnelbauwerk dieser Dimensionen erfordert ein vertieftes Verständnis der fahrdynamischen und energetischen Verhältnisse, um die Präzision der für die Produktion der Bahnverkehrsleistungen maßgeblichen Berechnungen, Simulationen und Prognosen zu maximieren. Die Inbetriebsetzung des GBT wurde daher von einem fahrdynamischen Testprogramm begleitet, dessen Inhalt die Autoren maßgeblich mitentwickelt und vorbereitet hatten. Auf diesem Versuchsprogramm standen Messungen und Analysen zur fahrdynamischen und energetischen Wirkung [1] des Ingenieurbauwerks auf den Zugverkehr unter besonderer Beachtung der jeweiligen Längsneigung: Von Norden her steigt die Strecke bis zur Multifunktionsstelle Sedrun mit 4,055‰ an und fällt danach gegen Süden mit 6,760‰ ab. Der Tunnel als Gesamtbauwerk ist in zwei Einspurröhren mit je 41 m<sup>2</sup> freiem Querschnitt ausgeführt; Gleisverbindungen bestehen an den Multifunktionsstellen Sedrun (Bild 1) und Faïdo.

Dieser Artikel fasst die wesentlichen Überlegungen zum fahrdynamischen Versuchsprogramm sowie die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

## 2 Versuchsprogramm

Ähnlich wie seinerzeit beim Lötschberg-Basistunnel [2] wurden im Rahmen des Inbetriebsetzungsprogramms des GBT in mehreren Schichten fahrdynamische Messfahrten geplant und absolviert. Im kommerziellen Betrieb sind die Parameter der Fahrdynamik kaum quantifizierbar, da deren Messung ein unbeeinflusstes tiefes Absenken und/oder die Variation der Fahrgeschwindigkeit zwingend erfordert. Die Messfahrten hatten zum Ziel, Aufschluss über das Verhalten typischer Kompositionen im regulären Geschwindigkeitsbereich zu geben und Rückschlüsse auf die Parameter der zugrundeliegenden fahrdynamischen Modelle zu ermöglichen. Besonderes Interesse galt dem Einfluss der Aerodynamik im Tunnel im Bereich höherer Geschwindigkeit.

Das Rollmaterial wurde in Analogie zum kommerziellen Fahrbetrieb aus Kompositionen des Fern- und Güterverkehrs ausgewählt. Die Fahrzeuge des Personenfernverkehrs waren hierzu mit

Messequipment minimal beladen, die Güterzüge entsprachen typischen beladenen Konstellationen im Ganzzugverkehr. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Zugkompositionen.

Die lokomotivbespannten Züge ermöglichten hierbei, abweichende Szenarien der Zuladung über die Modifikation der Wagenanzahl abzubilden. So entsprechen 15 leere InterCity-Wagen EWIV bezüglich der Tonnage etwa zwölf besetzten Wagen. Dies deckt sich mit dem Vorgehen bei früheren fahrdynamischen Versuchen der SBB. Beim Güterverkehr erlaubten die Zugformationen das Abbilden der Anhängelasten von 1 300 t beziehungsweise 1 500 t.

Die Maximalgeschwindigkeit der Messfahrten war analog zu den Höchstgeschwindigkeiten im kommerziellen Betrieb gewählt worden. Diese beträgt 200 km/h im Personenfernverkehr und 100 km/h im Güterverkehr. Das Versuchsprogramm umfasste verschiedene Ausrollversuche und Durchfahrten. Während der Ausrollversuche befand sich jeweils der gesamte Zug in homogener Längsneigung im homogenen Tunnelquerschnitt. In Ausrollversuchen gegen die Steigung wurde das vom Fahrwiderstand bestimmte Abfallen der Geschwindigkeit erfasst und analysiert.

Im Hinblick auf den schnelleren Fernverkehr fanden weitere Ausrollversuche im Gefälle statt, da die vorgängigen fahrdynamischen Berechnungen ergeben hatten, dass die beschleunigende Hangabtriebskraft kleiner als der bremsende Fahrwiderstand ausfällt und somit eine Geschwindigkeitsstabilisierung unterhalb der kommerziellen Höchstgeschwindigkeit eintreten würde. Zu diesen Versuchen musste die infrastruktureitige Geschwindigkeitsüberwachung deaktiviert werden, da andernfalls gemäß Notfallkonzept eine automatische Zielbremsung zur nächsten Nothaltestelle und eine Evakuierung angestoßen worden wären.

Bei Durchfahrten interessierten der absolute und der spezifische Energiebedarf.

zu den erreichbaren Geschwindigkeitsprofilen und zum Energiebedarf. Dieser wird exemplarisch an den Fahrten mit InterCity-Neigezügen (ICN) erläutert. Weiter wurden aus den Messgrößen die Fahrdynamikparameter und die Fahrdynamikbeiwerte ermittelt.



**Bild 1:** Multifunktionsstelle Sedrun unweit des Scheitelpunktes im Rohbau am 18. Juni 2012 (Foto: Steffen Schranil).



**Bild 2:** Beginn des fahrdynamischen Versuchsfahrtprogramms mit zwei ETR610 in Pollegio am 20. Dezember 2015 (Foto: Steffen Schranil).

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Ergebnisübersicht

Die Auswertung der fahrdynamischen Messfahrten aus dem Versuchsprogramm ermöglichte Aussagen

TABELLE 1					
Daten der Zugkompositionen im Versuchsprogramm Fahrdynamik.					
Fahrzeugtyp allgemein/SBB	Zugkomposition im Ausrollversuch	$m_{\text{tara}}$ t	$m_{\text{brutto,Test}}$ t	$v_{\text{max}}$ km/h	Datum der Messfahrten
ETR 610/RABe 503	610006	418	423	200	20./21.12.2015
ICN/RABe 500	500001 mit 500011(Doppeleinheit)	2x 355	2x 360	200	31.01./01.02.2016
Re 460/Re 460	Re 460 mit 12/15 EW IV- Wagen (4/5 A, 6/8 B, 2 Bt)	616/747	621/752	200	20./21., 26./27.03.2016
BR 185/Re 482	185 135 mit 21 Schotter-, 7 Flach-, 1 Rungewagen	–	1 584	100	12./13.03.2016

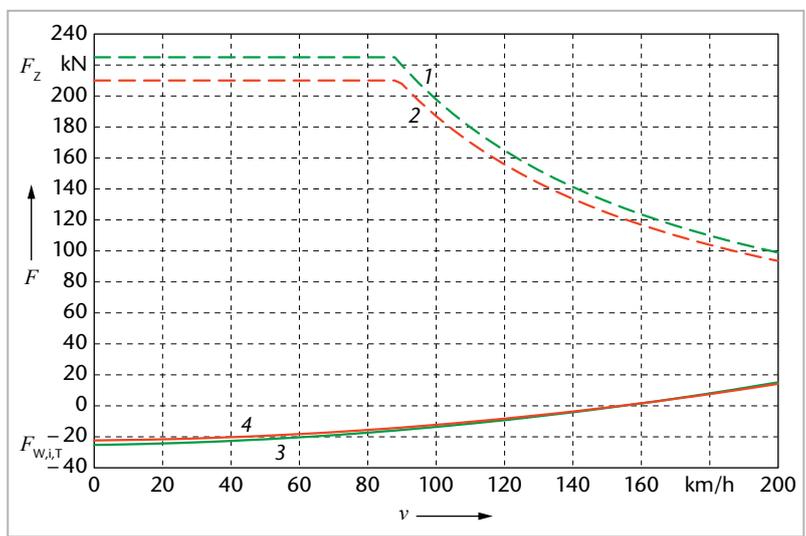
### 3.2 Geschwindigkeitsprofile der Messfahrten

Zum Personenfernverkehr bestand für die Triebzüge ETR610 (Bild 2) und ICN ein sehr ähnliches Versuchsprogramm. Nach Einfahrt in den Tunnel mit

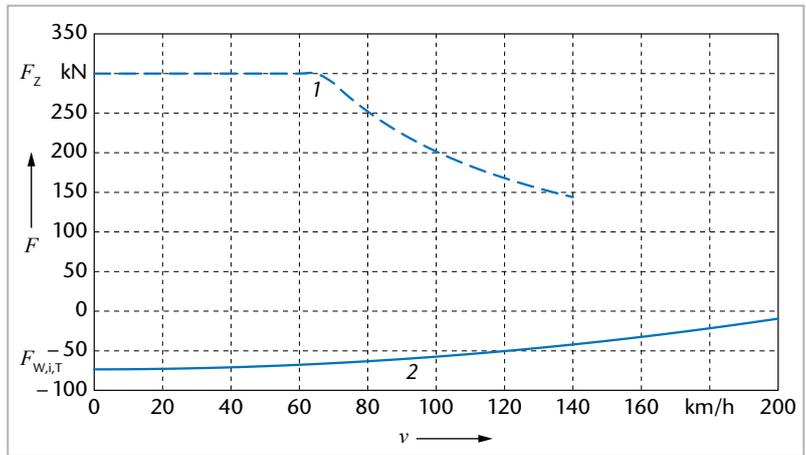
**TABELLE 2**

**Gemäß Messprotokoll auf den Rampen bergwärts erreichte Geschwindigkeiten von unterschiedlichen Fernverkehrszügen mit einer oder mit zwei Lokomotiven.**

Rampe	Re 460 einzeln		Re 460 vorn und hinten	
	12 Wagen	15 Wagen	12 Wagen	15 Wagen
Nord-Süd mit 4,055 ‰	185 km/h	171 km/h	200 km/h	200 km/h
Süd-Nord mit 6,760 ‰	178 km/h	162 km/h	200 km/h	200 km/h



**Bild 3:** Zugkraft  $F_z$  (1, 2) und resultierender Fahrwiderstand  $F_{w,i,T}$  (3, 4) mit Neigungs- und Tunnelwiderstand bei Fernverkehrstriebzügen im Gefälle der steileren Südrampe des GBT südlich von Sedrun (Grafiken 3, 4 und 6: SBB).  
 1, 3  $F_z$  und  $F_{w,i,T}$  des RABe 503, ETR610  
 2, 4  $F_z$  und  $F_{w,i,T}$  des RABe 500, ICN



**Bild 4:** Zugkraft 1 der Lokomotive Re482 und resultierender Fahrwiderstand 2 mit Neigungs- und Tunnelwiderstand bei Güterzug von 1 500 t im Gefälle der steileren Nord-Süd-Rampe des GBT südlich von Sedrun.

200 km/h wurde jeweils in der Steigungsstrecke die Zugkraft auf null gesetzt zum Zwecke des Ausrollens bis auf 100 km/h. Danach wurde wieder beschleunigt, so dass die Strecke bis zum Scheitelpunkt bei Sedrun in möglichst kurzer Zeit überwunden werden konnte. Im Gefälle wurde beginnend bei 180 km/h erneut ein Ausrollen vorgenommen. Dabei stand die Stabilisierung der Geschwindigkeit aufgrund des Gleichgewichts zwischen Hangabtriebskraft und Fahrwiderstandskraft im Fokus. Für die mit 6,760 ‰ steilere Südrampe wurden die gemessenen und berechneten Werte gegenübergestellt. Eine Stabilisierung konnte beim ETR610 bei 141 km/h und beim ICN bei 159 km/h beobachtet werden. Die Abszissenschnittpunkte, die Nullstellen, in Bild 3 entsprechen in guter Näherung den berechneten Stabilisierungsgeschwindigkeiten bei ETR610 und beim ICN mit je rund 150 bis 155 km/h. Die Daten der fahrdynamischen Berechnungen im Vorfeld konnten hiermit bestätigt werden und dienen nun zur Kalibrierung der Simulationsmodelle.

Der lokomotivbespannte InterCity erreichte in der 15-Wagen-Komposition auf der steileren Südrampe bergwärts maximal 162 km/h und auf der Nordrampe bergwärts maximal 171 km/h. Beim 12-Wagen-Zug waren es auf der Südrampe 178 km/h und auf der Nordrampe 185 km/h. Züge dieser Länge werden im kommerziellen Betrieb mit zwei Lokomotiven Re460 geführt. Die Messfahrten zeigten, dass mit zwei Lokomotiven bei beiden Kompositionen und auf beiden Rampen 200 km/h erreicht werden. Tabelle 2 fasst die mit lokomotivbespannten InterCity-Zügen bergwärts erreichten Geschwindigkeiten zusammen.

Regulär sind im Jahresfahrplan 2017 neun einstöckige Wagen EWIV mit einer Re460 vorgesehen. Für diese Komposition mit 504 t real brutto wurden die Ergebnisse der Messung auf der höheren Steigung der Süd-Nord-Rampe bergwärts zur unkritischen Seite nach unten extrapoliert. Bei 200 km/h wurden rund 106 kN Fahrwiderstand und 110 kN Restzugkraft der Re460 ermittelt. Damit ist diese Konstellation mit 200 km/h von einer Re460 in der Beharrung auch bergwärts fahrbar. Entsprechend wird im GBT erst ab zehn einstöckigen Wagen ein zweites Triebfahrzeug benötigt.

Die Messfahrten im Güterverkehr fanden mit maximal 100 km/h statt. Das Ausrollen erfolgte gegen die Steigung bis 60 km/h. Im Gefälle wäre dies im zulässigen Geschwindigkeitsbereich betrieblich nicht möglich gewesen, da bei dieser Geschwindigkeits- und Rollmaterialsituation die Hangabtriebskraft dominant ist (Bild 4). Somit erfordert eine Beharrung auf 100 km/h in den Gefällestecken des GBT einen Einsatz der Bremse, der im Gegensatz zur steileren und langsamer zu befahrenden Bergstrecke rein elektrisch erfolgen kann. Dieser Aspekt bewirkt den energetischen Vorteil des GBT im Güterverkehr.

In den Fahrten mit einer BR 185, sie entspricht der Re 482, und 1 500 t Anhängelast betrug die Fahrzeit zwischen Rynächt und Pollegio, jeweils mit Halt, bei GBT-Durchfahrt mit 100 km/h in Nord-Süd-Richtung 41,4 min und Süd-Nord-Richtung 45,6 min, wobei letztere die Geschwindigkeiten auf der Nordseite wegen einer ETCS-Beeinflussung nicht voll ausfahren konnte. Generell sind die Fahrzeiten in Richtung Süd-Nord wegen der steileren Südrampe (Bild 5) etwas länger.

Das Führen möglichst schwerer Züge mit nur einem, jedoch einem höchstleistungsfähigen Triebfahrzeug ist hierbei elementare Voraussetzung für eine wirtschaftliche Verkehrsverlagerung auf die Schiene und zugleich eine Herausforderung im geplanten Mischverkehr mit dem Personenfernverkehr im GBT.

### 3.3 Energiebedarf der ICN-Messfahrten

Im Nachgang zur Messnacht mit den beiden ICN wurden deren Energiedaten ausgewertet. Die Angaben zu den Messfahrten in Tabelle 3 basieren auf Minutenwerten der je zwei Energiezähler je Triebzug. Insgesamt wurden knapp 13 MWh Bahnenergie bezogen, knapp 2 MWh rekuperiert und knapp 1 MWh für Hilfs- und Komfortbetriebe (HB) konsumiert. Der Gesamtenergiebedarf der drei Messfahrtenpaare beläuft sich auf etwas über 12 MWh. Der Energiebedarf der Süd-Nord-Fahrten fällt aufgrund der geografischen Höhendifferenz höher aus als für die Nord-Süd-Fahrten. Bei der paarigen Betrachtung von Fahrten Süd-Nord und Nord-Süd kompensiert sich der Unterschied der potenziellen Energie aus der Höhendifferenz in den elektrischen Energiewerten.

Die Fahrten 97472 und 97473 enthalten die Ausrollversuche. Die daraus resultierenden niedrigeren Geschwindigkeiten bewirken trotz Wiederbeschleunigen nach Abschluss des Auslaufs kleinere absolute und spezifische Energiewerte als die regulären Fahrten. Die Fahrt 97472 war zusätzlich von einer



**Bild 5:**

Blick aus der Lokomotive 185 135 des Testgüterzugs bei der Fahrt Richtung Südportal des GBT bei Pollegio am 13. März 2016 (Foto: Steffen Schranil).

Zwangsbremmung zum Stillstand beeinflusst. Diese Bremsung erfolgte mit der pneumatischen Bremse, weshalb insgesamt deutlich weniger Energie rekuperiert werden konnte. Die übrigen Fahrten entsprechen weitestgehend dem geplanten kommerziellen Betrieb mit 200 km/h im Tunnel.

Im heutigen regulären ICN-Betrieb wird basierend auf früheren Messfahrten typischer ICN-Strecken der

**TABELLE 3**

#### Absolute und spezifische Energiewerte zu den Messfahrten mit zwei ICN in Süd-Nord- und Nord-Süd-Richtung.

Zug	Strecke km	Bezug kWh	Rekup. kWh	HB kWh	Gesamt kWh	Energie spezifisch kWh/km		Energie spezifisch Wh/Btkm	
97472	S-N 61	2043	-131	88	2000	16,4		46,2	
97473	N-S 74	1604	-366	152	1390	9,4	Ø 12,9	26,5	Ø 36,3
97474	S-N 80	2801	-323	135	2613	16,3		46,0	
97421	N-S 80	1860	-294	145	1711	10,7	Ø 13,5	30,1	Ø 38,1
97422	S-N 80	2773	-203	144	2714	17,0		47,8	
97423	N-S 80	1808	-268	140	1680	10,5	Ø 13,7	29,6	Ø 38,7
		12889	-1585	804	12108				
Energiewerte:	Bezug	Energiebezug							
	Rekup.	Rekuperationsenergie							
	HB	Energie für Hilfs- und Komfortbetriebe							
	Gesamt	Gesamtenergiebedarf							
	Ø	gemittelter spezifischer Wert							

SBB mit 23 Wh/Btkm gerechnet. In den Messfahrten im GBT wird dieser Wert erwartungsgemäß überboten. Grund dafür sind die im Testperimeter dauerhaft höhere Geschwindigkeit, da die 200 km/h im ICN-Verkehr bislang lediglich auf dem Streckenabschnitt Rothrist – Wanzwil – Subingen / Mattstetten zwischen Olten und Solothurn respektive Bern erreicht werden. Des Weiteren sind im Tunnel die Fahrwiderstände um den Tunnelfaktor vergrößert, was den Energiebedarf über die Strecke, errechnet mittels Wegintegral, steigert. Während der Tunnelfaktor als Veränderung des Fahrwiderstands im GBT gegenüber der freien Strecke mit 1,53 erwartet wurde, stieg der Energiebedarf um den Faktor 1,70. Dies geschah in Überlagerung der Effekte aus dauerhaft höherer Geschwindigkeit, geringerem Höhenunterschied und höherem Tunnelanteil unter betriebsnahen Bedingungen.

Gegenüber dem Verkehr über die Gotthard-Bergstrecke wird der Energiebedarf des ICN-Verkehrs zwischen Zürich und Lugano mit den geplanten Fahrzeitreduktionen im kommerziellen GBT-Betrieb gemäß heutigen Simulationen lediglich um den Faktor 1,21 steigen, da die Gotthard-Bergstrecke trotz kleinerer Geschwindigkeit heute bereits namhafte Tunnelanteile aufweist, länger ist und der GBT nur einen Teil der Strecke ausmacht. Im Güterverkehr konnte ein verkehrsleistungsspezifischer Energiebedarf von 18 Wh/Btkm beobachtet werden, was deutlich unter dem Energiebedarf der Bergstrecke liegt. Ausschlaggebend ist hier die stark reduzierte Rampenwirkung wegen des Fehlens der Bergstrecke, weshalb im flacheren Gefälle die höhere Streckengeschwindigkeit unter ausschließlicher Nutzung der elektrischen Bremse gehalten werden kann.

### 3.4 Ermittlung der Fahrdynamikparameter

Die fahrdynamischen Parameter [3] werden zur Kalibrierung der Zuglaufrechnung und als Simulationsparameter für die Energiebedarfsermittlung benötigt. Da bei den hier zu betrachtenden Infrastrukturen der Bogenwiderstand vernachlässigbar ist, lautet die allgemeine Formulierung des Fahrwiderstands:

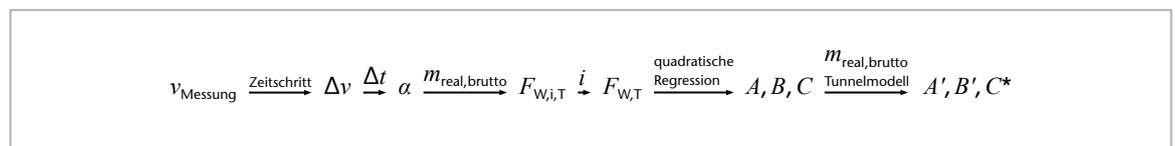
$$F_{W,i,T} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 + F_i = \tag{1}$$

$$= m \cdot g \cdot (A' + i) + m \cdot g \cdot B' \cdot v + \tau \cdot C^* \cdot v^2 \tag{2}$$

mit

<i>A</i>	konstanter Fahrdynamikparameter	in kN
<i>A'</i>	konstanter Fahrdynamikbeiwert	-
<i>B</i>	linearer Fahrdynamikparameter	in kN h/km
<i>B'</i>	linearer Fahrdynamikbeiwert	h/km
<i>C</i>	quadratischer Fahrdynamikparameter	in kN h <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>
<i>C*</i>	quadratischer tunnelbereinigter Fahrdynamikbeiwert	in kN h <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>
<i>F<sub>i</sub></i>	Neigungswiderstand	in kN
<i>F<sub>W,i,T</sub></i>	Fahrwiderstand inklusive Neigungs- und Tunnelwiderstand	in kN
<i>g</i>	Gravitationskonstante	in m/s <sup>2</sup>
<i>i</i>	Längsneigung	-
<i>m</i>	reale Bruttomasse des Zuges	in t
<i>v</i>	relevante Fahrgeschwindigkeit	in km/h
<i>τ</i>	Tunnelfaktor	-

Die Fahrdynamikparameter *A*, *B* und *C* stammen direkt aus den analysierten Fahrten. Die Fahrdynamikbeiwerte *A'*, *B'* und *C\** sind nun gemäß Bild 6 aus den Geschwindigkeitsverläufen der Ausrollversuche ermittelbar.



**Bild 6:** Ablaufschema zur Ermittlung der Fahrdynamikbeiwerte mittels Zeitschrittmethodik.

TABELLE 4								
Fahrdynamikparameter und Fahrdynamikbeiwerte aus dem Versuchsprogramm.								
Zug	Fahrdynamikparameter					Fahrdynamikbeiwerte		
	<i>m<sub>brutto,Test</sub></i> t	<i>τ</i> -	<i>A</i> kN	<i>B</i> kN h/km	<i>C</i> kN h <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>	<i>A'</i> -	<i>B'</i> h/km	<i>C*</i> kN h <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>
ETR 610	423	1,561	3,2	0,037	0,00145	0,00077	0,00001	0,00093
ICN (doppelt)	720	1,534	4,2	0,234	0,00141	0,00059	0,00003	0,00092
Re 460, 12 Wagen	621	1,539	4,3	0,054	0,00208	0,00071	0,00001	0,00135
Re 460, 15 Wagen	752	1,539	5,0	0,094	0,00168	0,00068	0,00001	0,00109
BR 185, Güterzug	1584	1,485	31,1	0,103	0,00325	0,00200	0,00001	0,00219

Dazu wird aus dem zeitaufgelösten Geschwindigkeitssignal die Geschwindigkeitsdifferenz zum nächsten Messwert berechnet. Bezogen auf den Zeitunterschied resultiert die inkrementelle Beschleunigung  $a$  zwischen beiden Messwerten. Diese Beschleunigung ergibt multipliziert mit der realen Bruttomasse des Messzuges die wirkende Fahrwiderstandskraft inklusive Neigungs- und Tunnelwiderstand.

Als Vorzeichenkonvention werden bremsende Kräfte hier mit positivem Vorzeichen versehen. Die Zuordnung der Fahrwiderstände über den gemessenen Geschwindigkeiten widerspiegelt die einwirkende Summe der Fahrwiderstandskräfte auf den jeweiligen Zug. Wird durch diese Wertepaare mithilfe der quadratischen Regression eine Funktionsgleichung gelegt, entsprechen die Parameter der quadratischen Gleichung den Fahrdynamikparametern  $A$ ,  $B$  und  $C$ . Meist ist diese quadratische Regression um den konstanten Anteil, Offset genannt, basierend auf früheren Messungen und Angaben der Hersteller zu korrigieren. Bereinigt um die reale Bruttomasse der Zugkomposition und kalibriert um das Tunnelmodell folgen gemäß dem Auswertungsalgorithmus schließlich die spezifischen Fahrdynamikbeiwerte  $A'$ ,  $B'$  und  $C^*$  aus den Fahrdynamikparametern.

Mit dieser Zeitschrittmethodik konnten die Werte in Tabelle 4 bestimmt werden. Basierend auf der Streuung der Messwerte können abweichende Funktionstypen in den Regressionen ein mindestens gleich hohes oder höheres Bestimmtheitsmaß aufweisen, jedoch entsprechen die Funktionsparameter dann nicht mehr der physikalischen Analogie der Fahrdynamikparameter. Zur Verwendung der Parameter in Modellen und Simulationen ist demnach eine quadratische Regression zwingend.

## 4 Ausblick

Mit dem fahrdynamischen Versuchsprogramm im GBT konnten erstmals die hierfür zugrundeliegenden Berechnungen und Simulationen überprüft und um praktische Erfahrungen im längsten Eisenbahntunnel der Welt ergänzt werden. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, dass eine stabile Regression der Fahrdynamikparameter aus Messwerten mit der beobachteten Streuung realistisch ist. Das theoretische fahrdynamische Wissen rund um den GBT konnte mit dem Versuchsprogramm um eine empirische Datenbasis ergänzt werden.

Aus den getesteten Geschwindigkeitsprofilen resultiert der Mehrwert für die Angebotsplanung und die Bahnproduktion: Es konnte gezeigt werden, welche Geschwindigkeiten mit welchen Zugkompositionen erreicht werden und wie das Betriebsprogramm allenfalls anzupassen ist. Ebenso waren die Fahrzeiten

von Interesse für die Betriebsstabilität im kommerziellen Betrieb. Für die Planung konnten verifizierte Fahrdynamikparameter und Fahrdynamikbeiwerte ermittelt werden, welche nunmehr helfen, die hohe Präzision der Fahrplanung und Bahnproduktion weiter zu verbessern. Eine Übernahme der Ergebnisse des abgeschlossenen Versuchsprogramms zur Verbesserung bestehender Rechnungen, Simulationen und Prognosen wird vorgeschlagen. Zur Separierung des Tunnelwiderstands wird angeregt, mit vergleichbaren Kompositionen weitere Ausrollversuche außerhalb des Tunnelbauwerks durchzuführen. Ein Vergleichstest mit verschiedenartigen Güterzugkompositionen ist überdies innerhalb und außerhalb des GBT anzustreben.

Die Plausibilisierung der Versuchsergebnisse mit bestehenden Fahrdynamik- und Tunnelmodellen verlief positiv. Dies ist neben dem empirischen Ermitteln der fahrdynamischen und energetischen Parameter im GBT ein relevanter Erkenntnisgewinn für das Verständnis und die analytische Beschreibung des Systems Bahn.

## Literatur

- [1] Schranil, S.; Stachetzki, J.: Energetische Optimierung von Tunnelquerschnitten. In: Elektrische Bahnen 113 (2015), H. 10, S. 488–497.
- [2] Voegeli, H.: Fahrwiderstände im Lötschberg-Basistunnel. In: Elektrische Bahnen 106 (2008), H. 6, S. 260–271.
- [3] Wende, D.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs; 1. Auflage, Teubner, 2003.

### AUTORENDATEN



**Dr. Steffen Schranil** (31), Studium Verkehrsingenieurwesen in Vertiefung Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme an der TU Dresden; Doktorat im Bereich Bahnbetriebsforschung an der ETH Zürich, Themenschwerpunkte: Bahnenergieversorgung, elektrische Schienenfahrzeuge, Gesamtsystem elektrische Bahn; seit 2013 Fachkader bei SBB Energiemanagement.

Adresse: SBB Energiemanagement, Hilfikerstr. 3, 3000 Bern 65, Schweiz;  
Fon: +41 79 1723968;  
E-Mail: steffen.schranil@sbb.ch



**Dipl.-Ing. Valérie Lavanchy** (28), Studium Maschineningenieurwesen mit Schwerpunkt in Biomechanik an der EPF Lausanne; seit 2015 Mitarbeiterin der SBB im Fachbereich Fahrdynamik.

Adresse: wie oben;  
Fon: +41 79 6213818;  
E-Mail: valerie.lavanchy@sbb.ch