

Energetische Optimierung von Tunnelquerschnitten

Steffen Schranil, Bern (CH); Jana Stachetzki, Zürich (CH)

Tunnelquerschnitte energetisch zu optimieren, ist eine nachhaltige Planungsoption für zukünftige Bahninfrastrukturen. Sind hohe Geschwindigkeiten und eine dichte Zugfolge geplant, macht es energetisch wie finanziell Sinn, einen tendenziell größeren Tunnelquerschnitt vorzusehen. Bei Einspur-tunneln ist eine Vergrößerung des Querschnitts besonders wirtschaftlich, bei Doppelspurtunneln treten qualitativ dieselben Effekte auf.

ENERGETIC OPTIMIZATION OF CROSS-SECTIONS OF TUNNELS

The energetic optimization of the cross-sections of tunnels represents an option for the sustainable planning of future railway infrastructures. In case that high speeds as well as shorter headways for the trains are foreseen it becomes reasonable under energetic and financial aspects to choose larger cross-sections of the tunnels. In particular for single-track tunnels the enlargement of cross-sections is highly profitable; for double-track tunnels similar results are obtained.

OPTIMISATION ÉNERGETIQUE DES SECTIONS TRANSVERSALES DE TUNNELS

L'optimisation des sections transversales de tunnels sous l'aspect énergétique est une option de planification durable pour les infrastructures ferroviaires futures. Aux cas que des grandes vitesses et des petits espacements entre les trains sont prévus il devient raisonnable d'envisager sous les points de vue énergétiques et financiers l'application de sections transversales plus grandes. En particulier pour les tunnels à voie unique, un agrandissement de la section transversale s'avère d'être plus économique; des effets similaires se produisent pour les tunnels à double voie.

1 Einführung

Für die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) ist die Leistungsfähigkeit des Bahnsystems zentral, stellen sie doch das dichtest belastete Bahnsystem der Welt mit im Jahr 2014 täglich rund 101 Zügen je Hauptgleis und täglich rund 1,2 Mio. Kundinnen und Kunden im Personenverkehr dar. Im größten Energiesparprogramm der Schweiz ist der Geschäftsbereich SBB Energiemanagement bestrebt, bis zum Jahr 2025 jährlich 600 GWh Energie einzusparen. Der Fokus der Maßnahmen umfasst neben technischen und betrieblichen Themen zunehmend planerische Fragestellungen im Gesamtsystem Bahn. So können neben der gesteigerten Energieeffizienz die Betriebskosten reduziert werden. Gleichzeitig resultiert ein Beitrag an das Konzernziel ökologische Nachhaltigkeit und die Energiestrategie des Bundes, der sich die SBB verpflichtet haben.

Die Topografie der Schweiz einerseits und diese Charakteristika der Eisenbahn andererseits münden bei Trassierungsfragen in zahlreiche Ingenieur- und Kunstbauten. Insgesamt gehörten in 2014 auf dem Netz der SBB Infrastruktur 5926 Brücken mit 98,7 km Gesamtlänge und 317 Tunnel mit insgesamt 275 km Länge zum Infrastrukturinventar der SBB.

Ingenieurbauten sind wesentlicher Kostenbestandteil von Ausbauprojekten. Es macht daher Sinn,

Bau- und Betriebskosten derartiger Anlagen sorgfältig abzuwägen. Vor dem Hintergrund zukünftiger Tunnelprojekte in der Region Ostschweiz stehen verschiedene Planungsvarianten zur Alternative. Hierbei sollen die Energiekosten als Bestandteil der Betriebskosten und die Ausbruchkosten als Bestandteil der Baukosten analysiert werden. Insbesondere stehen den Mehrkosten beim Ausbruch eines größeren Querschnitts reduzierte Betriebskosten für die Traktionsenergie gegenüber. Dies läuft auf eine Optimierungsfragestellung hinaus, welcher in Abhängigkeit konkreter Szenarien des Betriebsprogramms nachgegangen werden soll. Es wird noch zu zeigen sein, dass hierzu die Argumentation über Grenzkosten gegenüber einem Referenzfall zielführend ist.

Zunächst werden die relevanten Infrastrukturparameter und die im Betrieb geplanten Schienenfahrzeuge vorgestellt. Die heute absehbaren Parameter des zukünftigen Betriebsprogramms nebst den buchhalterischen Aspekten bilden die Voraussetzung für die energetische Optimierung der Tunnelquerschnitte. Als praktisches Beispiel dienen jeweils Parameter der Planung für den Chestenbergertunnel im schweizerischen Kanton Aargau. Diese Referenz dient der Plausibilisierung, jeder andere längere Tunnel könnte an seine Stelle treten. Für die Untersuchungen waren unter anderem auch die Ausarbeitungen [1] bis [13] Grundlagen.

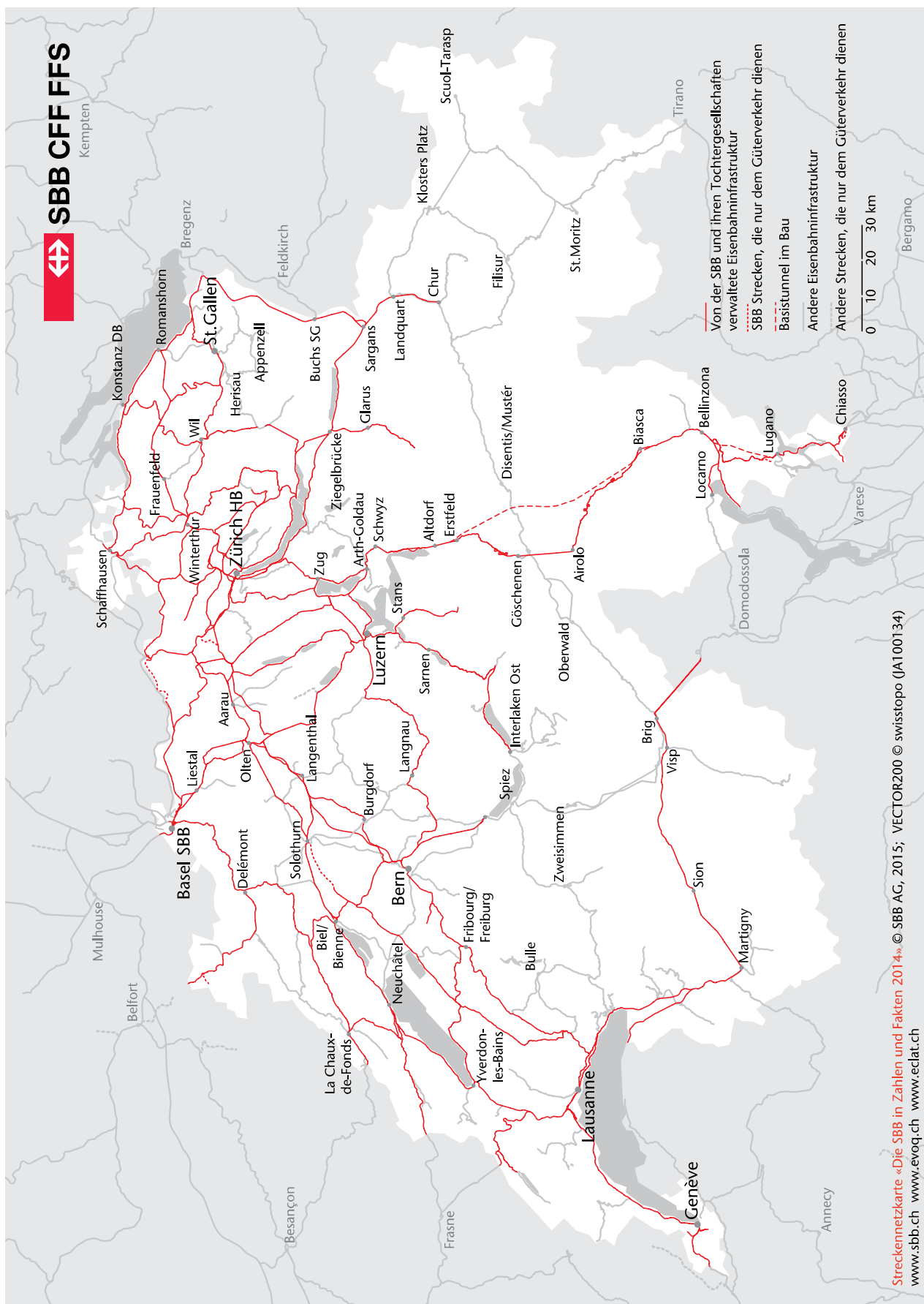


Bild 1: Übersichtsskizze zum Streckennetz der SBB Infrastruktur mit Lage der Neubaustrecke Chestenberg (Skizze: SBB).

Bahnenergieversorgung

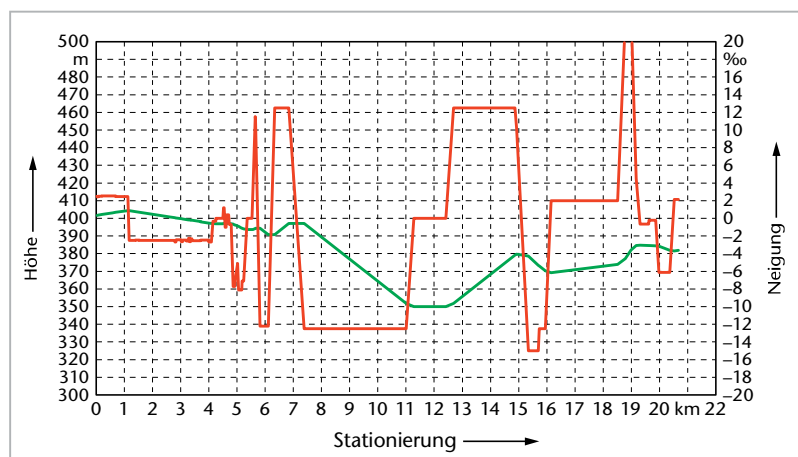


Bild 2: Längsneigungsprofil (rot) und Höhenprofil (grün) des Nordgleises der Neubaustrecke.

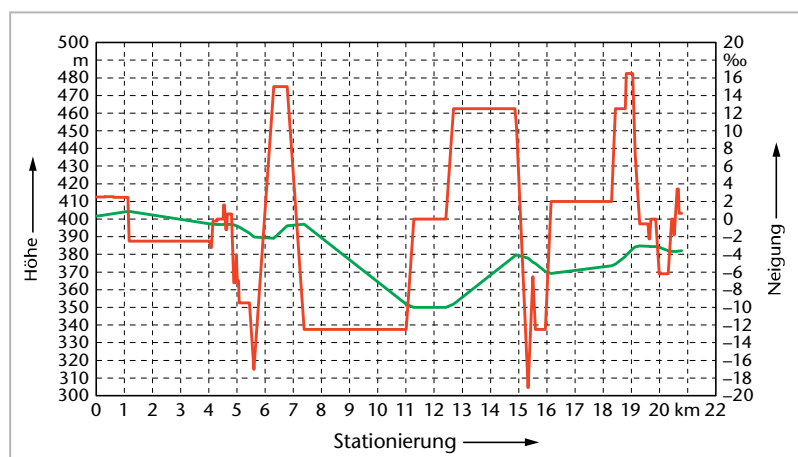


Bild 3: Längsneigungsprofil (rot) und Höhenprofil (grün) des Südgleises der Neubaustrecke.

2 Infrastrukturdaten

2.1 Trassierung

Das für die Plausibilisierung der Überlegung verwendete Infrastrukturprojekt Neubaustrecke Chestenberg liegt in einem der meistbefahrenen Korridore der Schweiz zwischen dem Abzweig Gruemet und dem Bahnhof Aarau auf der Ost-West-Achse von Zürich nach Olten. Die geplante Doppelspurstrecke verfügt dann über ein Südgleis, vorzugsweise für die Fahrtrichtung Zürich – Olten, und ein Nordgleis, vorzugsweise für die Fahrtrichtung Olten – Zürich. Bild 1 gibt einen Überblick über den Planungsumfang, welcher in die bestehende Strecke von Zürich HB nach Olten einbindet.

Die gesamte Trassierung hat eine Länge von knapp 21 km und ist in der Orientierung Ost – West auf Seite Zürich beginnend kilometriert. Aus den Projektierungsunterlagen [8] konnte für das Nord- und das Südgleis das Längsneigungsprofil und das

Höhenprofil aufgezeichnet werden (Bilder 2 und 3). Mit wenigen auf maximal 400 m Länge begrenzten Ausnahmen im Nord- und Südgleis beträgt die maximale Längsneigung 12,5‰ und entspricht somit den Kriterien einer Flachbahn. Die Überwindung der punktuell größeren Neigungen wird unter Nutzung der kinetischen Energie angenommen, sodass für die fahrdynamischen Überlegungen mit 12,5‰ maßgebender Längsneigung gerechnet und argumentiert wird.

2.2 Geschwindigkeitsprofil

Die betriebliche Höchstgeschwindigkeit auf der heutigen SBB-Infrastruktur beträgt 200 km/h. Technisch gesehen erlauben der demnächst fertige Gotthard-Basistunnel und der zur Infrastruktur des Bahnunternehmens BLS gehörende Lötschberg-Basistunnel bereits im aktuellen Ausbaustand eine Geschwindigkeit von 250 km/h. Geschwindigkeiten darüber hinaus sind zum heutigen Zeitpunkt im schweizerischen Bahnnetz nicht absehbar [4]. Die Neubaustrecke Chestenberg ist eingebettet in optionale langfristige Anschlussprojekte im Osten wie im Westen. Diese Situation könnte das Geschwindigkeitsprofil ändern. Aus beiden Handlungssträngen ergeben sich zwei relevante Höchstgeschwindigkeiten:

- 200 km/h für Neubaustrecke Chestenberg bis etwa 2045
- 250 km/h ab Inbetriebnahme der optionalen Anschlussprojekte nach 2045

Für zunächst maximal 200 km/h wurden bei SBB Fahrplan und Netzdesign Zuglaufrechnungen mit bestehendem Rollmaterial im Referenzstreckentunnel durchgeführt [6]. Es zeigte sich für beide Fahrtrichtungen, dass dieses Geschwindigkeitsniveau nicht von allen Zügen erreicht wird. Für die weiteren Untersuchungen im vorliegenden Projekt bedeutet dies, dass für sämtliche Varianten sehr sorgfältig mit den traktionstechnisch erreichbaren Geschwindigkeiten umzugehen ist. Dies gilt umso mehr vor dem Hintergrund, dass für eine 8 km lange Strecke, entsprechend der Länge des Chestenbergtunnels, der Fahrzeitgewinn gegenüber homogen 200 km/h bei homogen 250 km/h maximal 29 s beträgt, jedoch einen wesentlich höheren Aufwand für Bau und Betrieb erfordert. Im realen Bahnbetrieb fällt der Zeitgewinn kleiner aus, da mit den erwarteten kleinen Zugkraftüberschüssen, die eine lange Beschleunigungsstrecke und -zeit erfordern, erst auf die höhere Geschwindigkeit beschleunigt werden muss. Eine externe Antriebssimulation [7] weist maximal 15 s aus. Es zeichnet sich daher ab, dass eine Beschränkung auf 200 km/h Höchstgeschwindigkeit betriebstechnologisch durchaus ausreichend und energetisch überaus sinnstiftend ist.

2.3 Tunnelbaukosten

Aus abgeschlossenen Tunnelbauprojekten sind nach Struktur und Größenordnung die Tunnelbaukosten ableitbar. Sie sind je laufendem Meter Tunnellänge in Bild 4 dargestellt und referenzieren auf den freien Tunnelquerschnitt über Schienenoberkante am fertigen Tunnelbauwerk; brutto ist ein größerer Querschnitt auszurechnen. Als Referenztunnel dienen für Einspurröhren 41 m² freier Querschnitt, für Doppelspurröhren 70 m² freier Querschnitt. In gewissen Grenzen sind diese Werte linear extrapolierbar. Diese eingeschränkte Korrelation rührt insbesondere von der Baustelleninstallation her, da für massiv abweichende Tunnelquerschnitte beispielsweise abweichende Materiallogistik und Baustelleneinrichtung konzipiert werden. Über weitere Tunnelquerschnittsbereiche ist die Kostenstruktur eindeutig nichtlinear: Extrem kleine Tunnel, jenseits der Bahnanwendung, erschweren die Baustelleneinrichtung aus technischen Gründen, extrem große Tunnel, ebenfalls jenseits der Bahnanwendung, erschweren die Materiallogistik aus Volumengründen. Im hier zu diskutierenden Bahnkontext sind diese nichtlinearen Effekte irrelevant und werden deshalb an dieser Stelle nicht vertieft.

Die Tunnelbaukosten setzen sich aus den Ausbruch- und den Ausbaukosten zusammen. Erstere beziehen sich in diesem Projekt auf Schildvortrieb und Rohausbau, letztere enthalten die Bahntechnik. Die Tunnelerstellung im Tagebau spielt an dieser Stelle keine Rolle. Zu unterscheiden sind jedoch die Topologie aus zwei Einspurtunneln beziehungsweise einem Doppelspurtunnel: Die doppelte Bohrung der beiden Einspurtunnel dominiert die Kosten dieser Topologie, wie Bild 4 illustriert. Wird der Tunnelquerschnitt variiert, so ändern sich quasi ausschließlich die Ausbruchkosten. Aus diesem Grund macht es im Kontext der Baukosten finanziell Sinn, wo immer möglich, eine Doppelspurröhre statt zwei Einspurröhren zu errichten. Es wird fahrdynamisch noch gezeigt, dass dies im Bahnbetrieb energetisch ebenso zu bevorzugen ist.

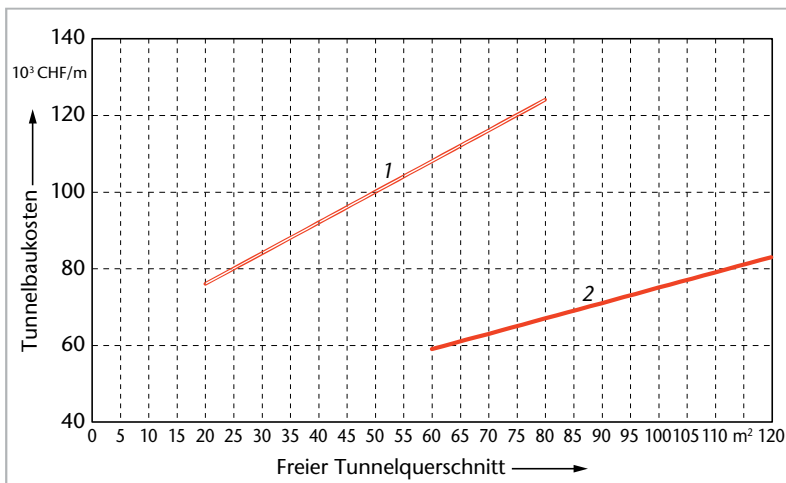


Bild 4:

Extrapolierte Tunnelbaukosten je laufendem Meter Strecke in Abhängigkeit vom freien Tunnelquerschnitt einerseits für zwei Einspurröhren (1) und andererseits für eine Doppelspurröhre (2), basierend auf Referenztunnel.

3 Daten der einzusetzenden Fahrzeuge

3.1 Fahrzeugübersicht

Großprojekte wie neuzubauende Tunnelbauwerke sind im Planungsprozess, in der Realisierung und in der Betriebsphase langfristig angelegt. Für das vorliegende Tunnelenergieprojekt ist nun Rollmaterial auszuwählen, an welchem die fahrdynamischen Berechnungen ausgeführt werden. Dieses Rollmaterial beschränkt sich auf den Fernverkehr der SBB, da im Regionalverkehr die zu diskutierenden höheren Geschwindigkeiten bislang nicht zum Tragen kommen. Insofern werden fünf Fahrzeugtypen betrachtet (Bild 5):

- IC 2000: Der doppelstöckige IC 2000 mit Re 460 ist heute das SBB-Standardrollmaterial im Ost-West-Verkehr. Die Berechnungen an dieser Stelle gehen von einer zehnteiligen, einfach lokomotivbespannten Zuggarnitur mit Bordrestaurant aus.
- ICN: Der Triebzug ICN (InterCity-Neigezug) prägt neben dem IC 2000 das Erscheinungsbild



Bild 5:

Rollmaterial im Chestenberg-Projekt (Fotos 1, 2 und 4: Steffen Schranil).

1 IC 2000

2 ICN

3 FV Dosto (XX:Bombardier)

4 RABe 503

5 Giruno (Foto: Stadler)

Bahnenergieversorgung

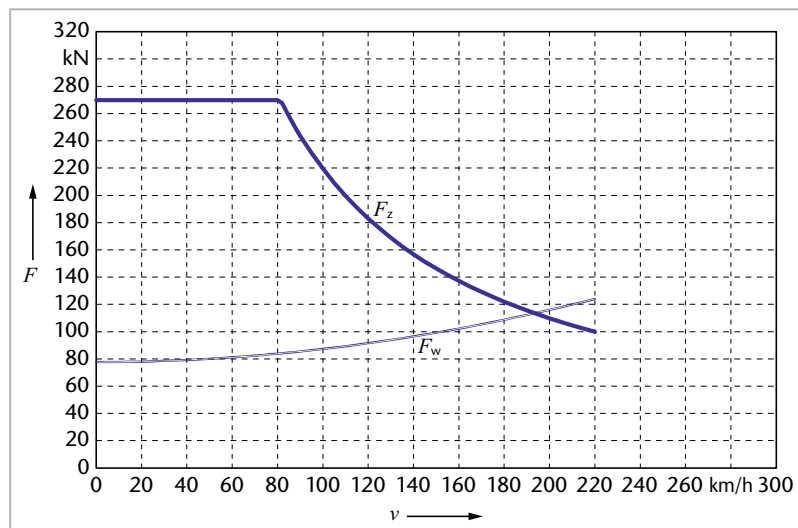


Bild 6:

Zugkraft F_z und Fahrwiderstände F_w im Tunnel beim IC 2000 in Funktion von der Geschwindigkeit v .

im SBB-Fernverkehr. Als siebenteilige Einheit ist er mit Neigetechnik zum bogenschnellen Fahren ausgestattet und mit maximal 200 km/h unterwegs.

- **FV Dosto:** Mit dem doppelstöckigen FV Dosto (Twindexx) stößt zukünftig ein Fernverkehrstriebzug zur SBB-Flotte. Die Berechnungen in diesem Projekt gehen von einer achteiligen 200-m-Einheit (IC 200) aus. Die Fahrzeuge sind mit einer aktiven Wankkompensation zum teilbeschleunigten Bogenfahren ausgestattet.
- **RABe 503:** Die RABe 503 (ETR 610, Cisalpino) sind die technisch im Wesentlichen identische Nachbauserie der ETR 610. Auch sie verfügen über Neigetechnik und bestehen aus sieben Wagen. Als einzige bisherige Serie der SBB sind sie bereits für 250 km/h zugelassen.
- **Giruno:** Der Triebzug Giruno (EC 250) befindet sich aktuell in der Projektierung und wird für nunmehr 250 km/h ausgelegt. Er ist elfteilig, rund 200 m lang und einstöckig. Die früher angedachte Ausrüstung mit aktiver Neigetechnik wurde inzwischen aufgegeben.

3.2 Traktionstechnische und fahrdynamische Parameter

Für die fahrdynamischen Betrachtungen im Tunnel sind einerseits die traktionstechnischen Parameter Anfahrzugkraft und mechanische Leistung am Rad sowie die reale Bruttomasse aus Taramasse zuzüglich realistischer Zuladung für die Zugkräfte F_z von Interesse [10; 13]. Andererseits bestimmen Fahrwiderstand in der Ebene sowie Neigungs- und Tunnelwiderstand die zu überwindenden Widerstandskräfte F_w . Die verbleibende Differenz aus beiden Kräften bestimmt das Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge für die jeweilige Geschwindigkeit. Weiterhin sind im Interesse der Beschleunigungsreserve bei der höchsten Geschwindigkeit etwa 10 % mehr Zug- als Widerstandskräfte vorzusehen, um die traktionstechnisch fahrbare Geschwindigkeit auf endlicher Streckenlänge zu erreichen.

Die Qualität der Ergebnisse ist hierbei von der Qualität der Inputparameter (Tabelle 1) abhängig. Aus diesem Grund werden jeweils Werte aus dem Typenblatt und aus Messungen verwendet [9; 10; 11]. Für den Giruno liegen noch keine Parameter vor. Die Höchstgeschwindigkeit wurde wie folgt erhöht:

- beim IC 2000 auf 220 km/h entsprechend der Auslegung der Re 460
- beim ICN nach Ertüchtigung auf 220 km/h
- beim FV Dosto gemäß Option des Herstellers auf 230 km/h
- beim RABe 503 nach Ertüchtigung auf 280 km/h

Somit lässt sich der Antagonismus zu den Fahrwiderständen besser visualisieren. Als Auslastung (Load Factor) werden jeweils 33 % angesetzt. Die fahrdynamischen Parameter in der Ebene sind mit der resultierenden realen Bruttomasse skaliert. Dennoch bergen die Fahrwiderstände beim FV Dosto und beim RABe 503, welche noch nicht messtechnisch verifiziert werden konnten, eine gewisse Unsicherheit. Daher sollten die Parametersätze für neue Fahrzeugserien zwingend messtechnisch bestimmt werden.

Um die Fahrwiderstände im Tunnel gemäß [2; 5; 12] exemplarisch aufzeigen zu können, wird für die Bilder 6 bis 9 mit 12,5 ‰ Längsneigung

TABELLE 1

Traktionstechnische und fahrdynamische Parameter der Fahrzeuge im Projekt.

			IC 2000	ICN	FV Dosto	RABe 503
Bruttouzugs-masse	m_{Brutto}	t	578	368	485	429
Leistung am Rad	P_{mech}	MW	6,1	5,2	7,5	5,5
Anfahrzugkraft	F_{An}	kN	270	210	480	225
konstanter Fahrdynamikparameter A		kN	6,8	2,1	5,5	3,2
linearer Fahrdynamikparameter B		kN h/km	0,000	0,019	0,000	0,030
quadratischer Fahrdynamikparameter C		kN h ² /km ²	0,00070	0,00056	0,00059	0,00056

und einem hier fiktiven freien Tunnelquerschnitt von 60 m^2 gerechnet. Im Zuge der Tunneloptimierungen wird dieser Querschnitt später variiert. Es zeigt sich unabhängig davon, dass bei der gegebenen Längsneigung die Geschwindigkeiten um 250 km/h fahrdynamisch nicht erreichbar sind. Unter Beachtung der Beschleunigungsreserve kommt der IC 2000 auf rund 180 km/h , der ICN auf zirka 200 km/h , der FV Dosto auf rund 210 km/h und der RABe 503 auf rund 190 km/h . Während beim lokomotivbespannten IC 2000 mit einer zweiten Lokomotive nachgeholfen werden könnte, wäre bei Triebzügen mit 200 m Länge eine mechanische Leistung am Rad zwischen 8 MW und 9 MW vorzusehen. Die Plausibilisierung dieser Situation folgt aus der kubisch mit der Geschwindigkeit steigenden Traktionsleistung, nachdem der Energiebedarf quadratisch mit der Geschwindigkeit steigt. Diesem Umstand Rechnung tragend, wird für Tunnel in Längsneigung bis $12,5\text{ ‰}$ eine maximale Geschwindigkeit von 200 km/h empfohlen. In der Ebene und bei geringen Längsneigungen, wie bei der Neuen Eisenbahn-Alpen-Transversale (NEAT), sollten auch im Tunnel 6 MW für 250 km/h Höchstgeschwindigkeit genügen.

3.3 Einsatz im Chestenberg

Die Neubaustrecke mit dem Chestenbergtunnel wird im stark frequentierten Ost-West-Verkehr des SBB-Liniennetzes liegen. Mit den heutigen Fahrgastprognosen für die kommenden Jahrzehnte wird dort einstöckiges Rollmaterial kaum mehr genügen. Aus diesem Grund ist heute davon auszugehen, dass 400 m langes doppelstöckiges Rollmaterial die Neubaustrecke befahren wird. Um die Diskussion über die Fortschreibung der Flottenstrategie von SBB Personenverkehr an dieser Stelle auszuklammern, dienen FV Dosto in Doppeltraktion als Referenzmaterial. Deren fahrdynamische Parameter wurden, weil Messungen an verkehrenden Fahrzeugen bislang nicht möglich waren, aus Messungen an IC 2000 extrapoliert und plausibilisiert. Sollte sich herausstellen, dass der Fahrwiderstand beim FV Dosto größer als angenommen ist, verstärkt dies den noch aufzuzeigenden Trend zu größeren Tunnelquerschnitten.

4 Daten des Betriebsprogramms

Mit heutigem Stand hat SBB Personenverkehr über das Liniennetz für den Horizont 2030+ noch nicht entschieden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Ost-West-Verkehr weiterhin den Großteil der Nachfrage zu befriedigen hat und das Fern-

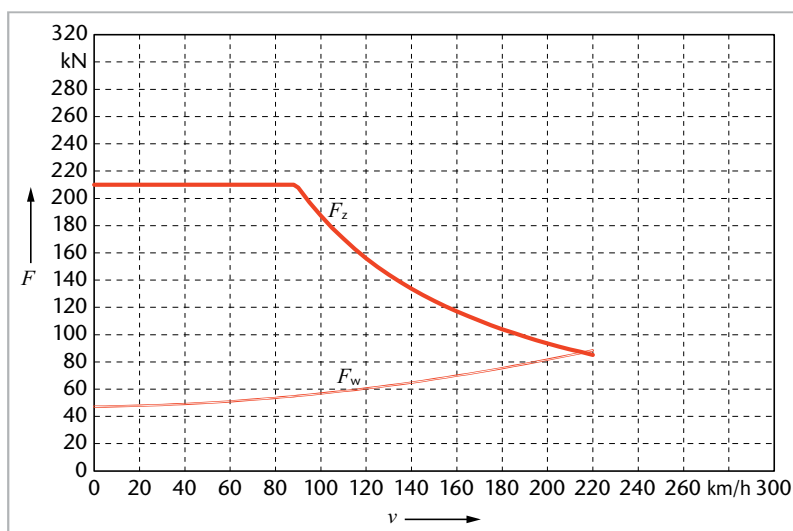


Bild 7:
 F_z und F_w beim ICN analog Bild 6.

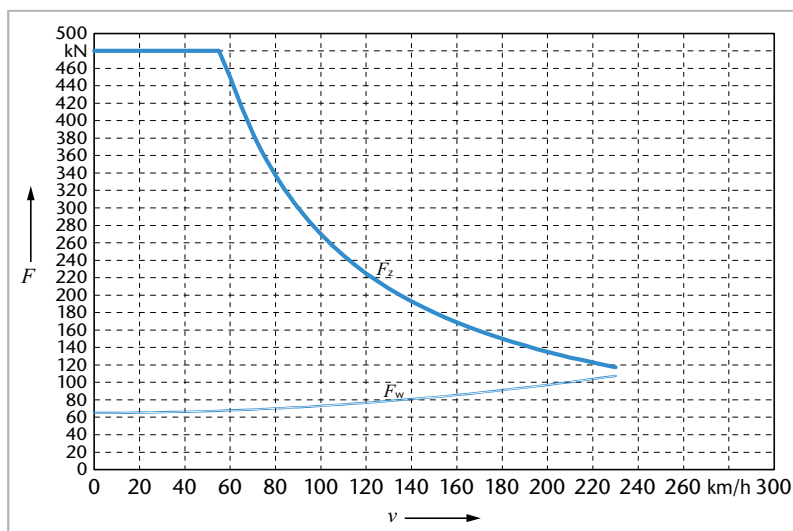


Bild 8:
 F_z und F_w beim FV Dosto analog Bild 6.

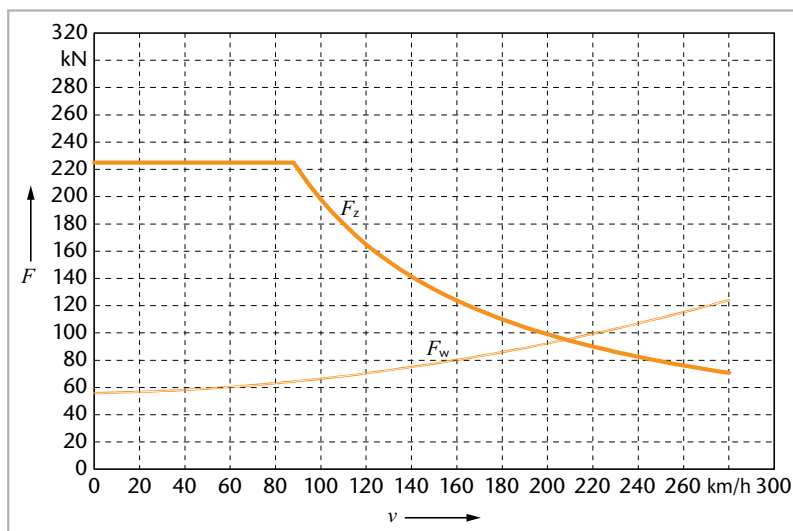


Bild 9:
 F_z und F_w beim RABe 503 (Cisalpio) analog Bild 6.

Bahnenergieversorgung

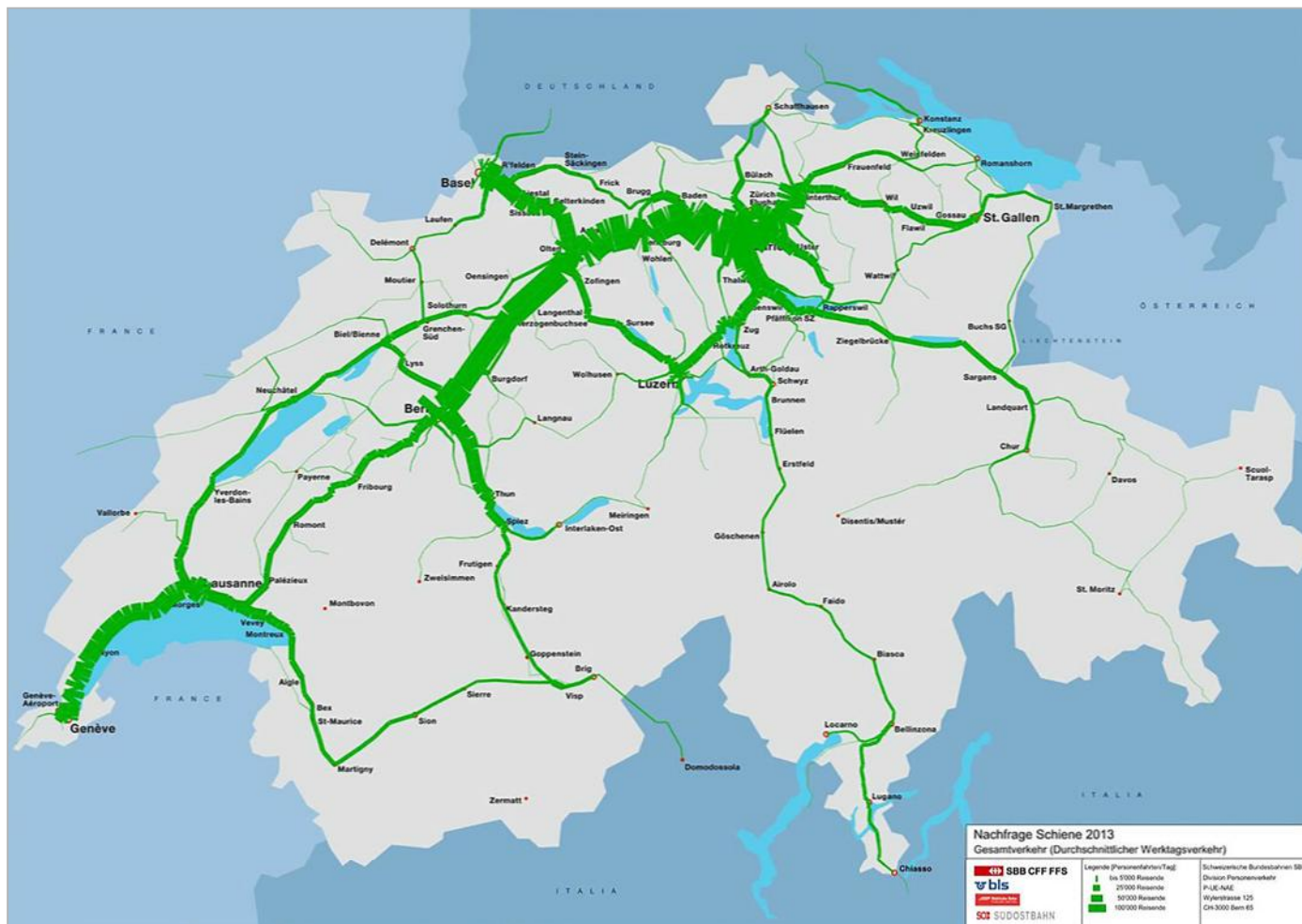


Bild 10: Nachfrage im Schienenpersonenverkehr Schweiz 2013 (Grafik: SBB).

verkehrsnetz schwerpunktmäßig diese Relationen abbildet [4]. Basierend auf den Nachfrageprognosen (Bild 10) ist abzuleiten, dass die Nachfrage im Ost-West-Verkehr, insbesondere in den Abschnitten Winterthur – Zürich – Bern und Lausanne – Genève überproportional steigen wird. Mit den heute bekannten Eckdaten zum zukünftigen Angebot ist ableitbar, dass im Korridor Zürich – Basel, Zürich – Solothurn und Zürich – Bern je vier groberschließende Verbindungen mit InterCity und vergleichbaren Angeboten je Stunde sowie insgesamt vier mittlerschließende Verbindungen mit InterRegio und RegioExpress durch das Limmattal führen. Basierend auf diesen Überlegungen wird für die Neubaustrecke Chestenbergertunnel als Betriebsprogramm im Personenfernverkehr angesetzt:

- 16 Züge je Stunde und Richtung in Systemstunden, in der Hauptverkehrszeit mehr, sonst weniger Fahrten
- 16 Betriebsstunden an 365 Tagen im Jahr
- 200 km/h Streckengeschwindigkeit
- 100 bis 150 Jahre technische Nutzungsdauer des Tunnels, davon 60 Jahre Abschreibung

5 Tunneloptimierung

5.1 Grenzkosten und Abzinsung als Optimierungsmethoden

Die energetische Optimierung von Tunnelquerschnitten wird mit Grenzkosten gegenüber einem Referenz-tunnel argumentiert. Aus den Kenntnissen vergangener Tunnelprojektierungen wird davon ausgegangen, dass sowohl in der Anlage zweier Einspur-tunnel als auch eines Doppelspur-tunnels die Kosten sich bei größerem Tunnelquerschnitt erhöhen, bei geringerem reduzieren. Es wird aerodynamisch in der Auswertung diverser Modellansätze und Messungen zu Grunde gelegt, dass sich die Energiekosten im Betrieb bei einem größeren Tunnelquerschnitt reduzieren, bei einem kleineren Tunnelquerschnitt erhöhen. Die Summe beider Grenzkosten sollte somit auf ein Minimum führen.

Die Tunnelbaukosten variieren je nach Tunnelquerschnitt; sie sind in Bild 4 auf einen laufenden Meter Tunnellänge bezogen. Der Fahrwiderstand ist über die gefahrene Strecke zu integrieren und mit dem

Energiepreis zu multiplizieren. Erfolgt die fahrdynamische Integration über einen Meter Tunnelfahrt, so beziehen sich Tunnelbaukosten und Traktionsenergiekosten auf dieselbe Tunnellänge. Diese hebt sich folglich heraus und es resultiert ein jeweils optimaler Tunnelquerschnitt für die Anlage als eine Doppelspurrröhre beziehungsweise zwei Einspurrröhren. Eine Aussage über die absoluten (Grenz-) Kosten kann über die Multiplikation mit der Tunnellänge erlangt werden; dies ist von der eigentlichen Querschnittsoptimierung jedoch methodisch unabhängig.

Beim Tunnelbau fallen naturgemäß die Baukosten vor Inbetriebnahme und die Energiekosten nach Inbetriebnahme an. Im Sinne der Nettobarwertmethode (NPV) sind die „Einnahmen“ aus geringeren Grenzkosten der Traktionsenergie abzuzinsen. Das bedeutet, dass zukünftig erwirtschaftetes Kapital bezogen auf den heutigen Zeitpunkt weniger Wert hat als heute erwirtschaftetes Kapital; Annahme: Kalkulationszinssatz 1,75 % pro Jahr. Andererseits steigt nach heutigem Prognosestand der Traktionsenergiepreis über die Jahre. Insofern ist es sinnstiftend, zunächst den jährlichen Traktionsenergiepreis als Grenzkosten gegenüber einem Referenztunnel auszuweisen und diesen Barwert mit der Energiepreissteigerung, angenommen 2,20 % pro Jahr nach 2030, sowie der Abzinsung gegen die Grenzkosten des Tunnelbaus zu rechnen. Bei den SBB kompensieren sich beide gegenläufigen Trends zugunsten des Energiepreises. Eine geringere Preissteigerung beim Traktionsenergiepreis oder die Vergrößerung des Kalkulationszinssatzes würden das monetäre Optimum in Richtung kleinerer Tunnel beeinflussen. Entsprechend rentieren sich bei größerer Energiepreissteigerung oder kleinerem Kalkulationszinssatz nochmals vergrößerte Tunnel.

Die Tunnelanlagen zweier Einspurrröhren (Bild 11) und einer Doppelspurrröhre (Bild 12) werden nun nacheinander finanzstatistisch und finanzdynamisch betrachtet. Dazu sind jeweils die Grenzkosten des Tunnelbaus und die Grenzkosten der Traktionsenergie gegenüber einem Referenztunnel aufgetragen. Deren Summe ergibt über den Lebenszyklus für variable Tunnelquerschnitte ein Optimum.

5.2 Einspurrtunnel

Im Einspurrtunnel wird ein Referenzquerschnitt von 41 m^2 angesetzt; dies entspricht den baulichen Verhältnissen beim Gotthard-Basistunnel. Als maßgebende Geschwindigkeit gelten im Chestenbergertunnel 200 km/h mit 400-m -Doppelstocktriebzügen. Die Energie zur Überwindung der Längsneigung schlägt sich in der Grenzkostenbetrachtung nicht nieder. Tunnelbaukosten und Energiekosten sind bei der Betrachtung als Grenzkosten am Referenzquerschnitt null, die absoluten Kosten sind es freilich nicht. In der finanzstatistischen Betrachtung macht

es Sinn, vom Referenztunnel mit 41 m^2 freiem Tunnelquerschnitt zunächst nicht abzuweichen. Erst bei höheren Geschwindigkeiten und dichterem Betriebsprogramm würde sich dies zugunsten größerer Tunnelquerschnitte ändern.

Werden in die bestehenden Analysen nun die buchhalterischen Aspekte Energiepreisentwicklung und Kalkulationszinssatz integriert, ändert das Optimum des Tunnelquerschnitts seine Lage. Es zeigt sich, dass über die lange Lebensdauer eines Tunnelbauwerks der Energiepreis trotz Abzinsung dominant bleibt und das Optimum beeinflusst (Bild 11). Rein

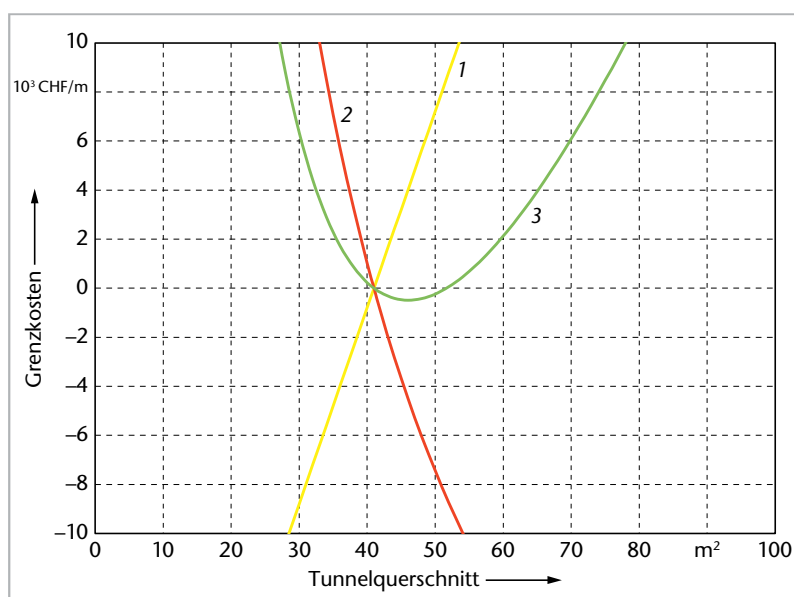


Bild 11:

Tunneloptimierung zweier Einspurrröhren in finanzdynamischer Betrachtung.

- 1 Grenzkosten des Tunnelbaus
- 2 Grenzkosten der Traktionsenergie
- 3 Summe der Grenzkosten gegenüber Referenztunnel

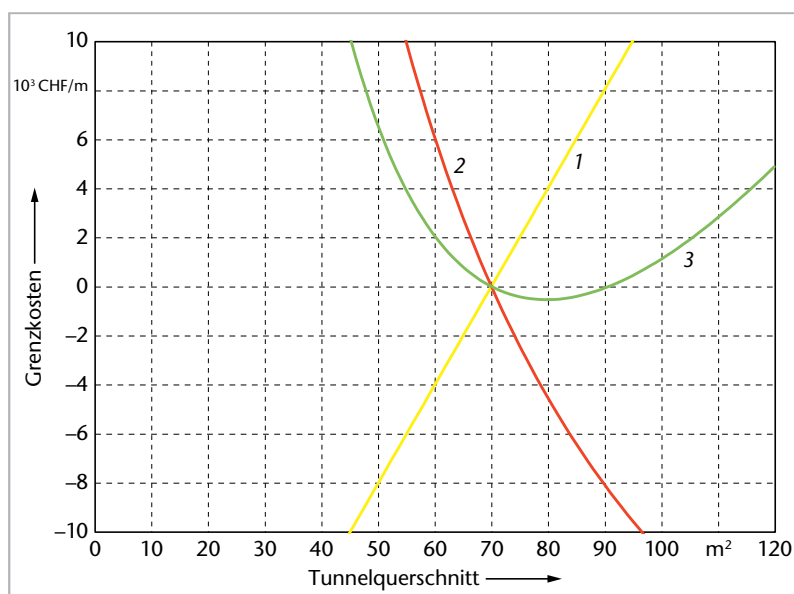


Bild 12:

Tunneloptimierung einer Doppelspurrröhre in finanzdynamischer Betrachtung.

Bahnenergieversorgung

energetisch ist es überdies stets sinnvoll, einen größeren Tunnelquerschnitt zu wählen. In der finanzdynamischen Betrachtung macht es unter den diskutierten Annahmen zu Tunnelbaukosten, Fahrdynamik, Betriebsprogramm und buchhalterischen Effekten nunmehr Sinn, vom Referenztunnel abzuweichen und stattdessen einen freien Tunnelquerschnitt von rund 50 m^2 zu favorisieren. Dies gilt umso mehr, da die fahrdynamischen Ansätze zum Tunnelwiderstand und damit zu den Traktionsenergiekosten in diesem Projekt noch vergleichsweise konservativ sind.

5.3 Doppelspurtunnel

Bei der Anlage einer Doppelspurröhre fallen die Baukosten insgesamt niedriger aus und die Grenzkosten für abweichende Tunnelquerschnitte schlagen nur einfach zu Buche. Als Referenztunnel dient hier ein freier Querschnitt von 70 m^2 . Als maßgebende Geschwindigkeit gelten erneut 200 km/h mit 400 m Doppelstocktriebzügen. In der finanzstatischen Betrachtung macht es erneut Sinn, vom Referenztunnel mit 70 m^2 freiem Tunnelquerschnitt vorerst nicht abzuweichen. Bei höheren Geschwindigkeiten und dichterem Betriebsprogramm würde sich dies zugunsten größerer Tunnelquerschnitte ändern.

In der finanzdynamischen Betrachtung ändert das Optimum des Tunnelquerschnitts seine Lage. Grund für die gegenüber den Einspurtunneln größere Änderung sind die niedrigeren Grenzkosten, da bei der Doppelspurröhre nur eine größere Röhre zu erstellen ist. Es zeigt sich, dass über die lange Lebensdauer eines Tunnelbauwerks der Energiepreis trotz Abzinsung erneut dominant bleibt (Bild 12). In der Grafik sind die Grenzkosten des Tunnelbaus, die Grenzkosten der Traktionsenergie und die Summe der Grenzkosten gegenüber dem Referenztunnel aufgetragen. In der finanzdynamischen Betrachtung macht es unter den diskutierten Rahmenbedingungen Sinn, vom Referenztunnel abzuweichen und stattdessen einen freien Tunnelquerschnitt von rund 80 m^2 zu favorisieren. Da in diesem Modell sogar ein noch größerer Tunnel finanziellen Mehrwert stiften würde, wird ein Teil der insbesondere buchhalterischen

Unsicherheiten auf die sichere Seite vergleichsweise geringerer Baukosten kompensiert.

6 Fazit und Empfehlung

Die angegebenen Analysen zeigen, dass es für die Anlage von Eisenbahntunneln ein gegen ein Minimum konvergierendes Grenzkostenmodell gibt. Über die lange Nutzung dieser Infrastrukturen lohnt es sich bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Zuganzahlen, einen tendenziell größeren Querschnitt zu wählen. Das zugrunde liegende Modell ist dabei von folgenden Schlüsselparametern abhängig:

- Grenzkosten für Tunnelbau
- Fahrzeugparameter für hohe Geschwindigkeiten
- Betriebsprogramm und Fahrgeschwindigkeit
- Energiepreis und Kalkulationszinssatz

Steigende Grenzkosten beim Tunnelbau bewirken die Verschiebung des Optimums hin zu kleineren Tunneln. Größere fahrdynamische Parameter führen zu einem größeren Tunnelquerschnitt als Optimum. Gleiches gilt für steigende Zuganzahlen und/oder höhere Fahrgeschwindigkeiten im Betrieb. Je höher der Energiepreis und dessen Steigerung, umso eher rentiert sich ein größerer Tunnelquerschnitt. Je höher der Kalkulationszinssatz, desto später rentiert sich ein größerer Querschnitt. Wird der jeweilige Referenzquerschnitt vergrößert, so kostet bezüglich Grenzkosten der nun neue Referenztunnel nichts; im gleichen Atemzug sinken jedoch die Grenzkosten der Energieeinsparnis der vergrößerten Tunnel, sodass es kein abweichendes Grenzkostenoptimum gibt. Rein energetisch macht es stets Sinn, tendenziell größere Tunnelquerschnitte zu wählen.

Für die Projektierung von Tunneln, welche mit hoher Zuganzahl und hoher Geschwindigkeit durchfahren werden, macht es energetisch wie monetär Sinn, nach Kriterien des Energiebedarfs zu optimieren. Aufgrund der geringeren Baukosten sind Doppelspurtunnel interessant. Energetisch betrachtet weisen sie ein kleineres Versperrmaß, definiert als Quotient aus Zuganströmfläche und Tunnelquerschnitt, auf, was den Fahrwiderstand und damit den Traktionsenergiebedarf reduziert.

Darüber hinaus ist jeweils die Anlage von Druckentlastungsschächten [3] zu prüfen, da diese den freien Querschnitt und somit die eigentlichen Ausbruchkosten quasi unverändert lassen, jedoch Druckwellen im Tunnel reduzieren sowie den *wirksamen* freien Tunnelquerschnitt vergrößern. Für den Chestenbergtunnel auf der geplanten Neubaustrecke wird die Anlage einer Doppelspurröhre mit rund 80 m^2 freiem Tunnelquerschnitt empfohlen. Alternativ kommen zwei Einspurröhren mit je rund 50 m^2 freiem Tunnelquerschnitt bei gegenüber der Doppelspurröhre höheren Baukosten in Frage.

PROJEKT NEUBAUSTRECKE CHESTENBERG

Das schweizerische Bundesamt für Verkehr (BAV) hat die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) mit der vertieften Studie zur Neubaustrecke (NBS) Chestenberg zwischen dem bestehenden Heitersbergtunnel und Aarau beauftragt. Die Untersuchungen haben zum Ziel, die bereits durchgeführte Studie zur Linienführung hinsichtlich technischer Fragestellungen zur Tunnelprojektierung und Umweltbeeinträchtigung zu ergänzen. Nach Abschluss der vertieften Untersuchungen durch die SBB wird das BAV eine Grundsatzentscheidung über die Linienführung möglicher Ost-West-Verbindungen treffen. Hierbei stehen verschiedene Optionen im Raum; die Ergebnisse der energetischen Tunneloptimierung lassen sich im Grundsatz auch auf andere Varianten übertragen.

Literatur

- [1] *Busslinger, A.; Hagenah, B.; Reinke, P.; Rudin, C.*: Aerodynamics and Climate in the Loetschberg Base Tunnel – Prediction and Findings; Paper, 2011.
- [2] *Gaillard, M. A.*: Zur Aerodynamik der Zugbegegnung im Tunnel und auf offener Strecke; Dissertation ETH Zürich Nr. 4874, 1973.
- [3] *Hagenah, B.; Reinke, P.; Shaha, J.; Ravn, S.*: Wirksamkeit von Druckentlastungsschächten beim Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr in Tunneln; Paper STUVA, 2005.
- [4] *Häne, T.*: Die neue Gotthardbahn; Bericht SBB, 2014.
- [5] *Hucho, W.-H.*: Aerodynamik der stumpfen Körper; 2. Auflage, Vieweg+Teubner, 2011.
- [6] *Kunz, R.*: Fahrzeitrechnung Chestenberg; Simulationsbericht SBB, 02.04.2015.
- [7] *Lerjen M.; Meyer, M.*: Fahrzeitberechnung Chestenbertunnel; Simulationsbericht emkamatik, 10.08.2015.
- [8] *Cavozzi, M.*: ZEB Gruemet – Rapperswil (Chestenberg) – Angaben zur Gleisgeometrie; Paper SBB, 04.03.2015.
- [9] *Schadel, J.*: Fahrwiderstände / spezifische Verbrauchswerte – Berechnungen mit μ Pas und Vergleich mit Messungen; SBB Bericht, 2014.
- [10] *Schranil, S.*: Seminar Fahrdynamik und Energiebedarf, Teil 2: Berechnung von Fahrwiderständen; Seminar SBB, 27.04.2015.
- [11] *Voegeli, H.*: Fahrwiderstände im Lötschberg-Basistunnel. In: Elektrische Bahnen 106 (2008), H. 6, S. 260–271.

AUTORENDATEN



Dr. Steffen Schranil (30), Studium Verkehrsingenieurwesen in Vertiefung Planung und Betrieb elektrischer Verkehrssysteme an der TU Dresden; Doktorat im Bereich Bahnbetriebsforschung an der ETH Zürich; Themenschwerpunkte: Bahnenenergieversorgung, 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. Jana Stachetzki (29), Studium Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt Raum- und Infrastrukturplanung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT); seit 2012 Mitarbeiterin der SBB, seit 2014 stellvertretende Gesamtprojektleiterin im Projekt Neubaustrecke Chestenberg.

Adresse: SBB Infrastruktur Projekte Ostschweiz,
Vulkanplatz 11, 8048 Zürich, Schweiz;
Fon: +41 79 8790194;
E-Mail: jana.stachetzki@sbb.ch

[12] *Weidmann, U.*: Systemdimensionierung und Kapazität; IVT-Skript 2.2, ETH Zürich, 2011.

[13] *Wende, D.*: Fahrdynamik des Schienenverkehrs; 1. Auflage, Teubner, 2003.

Anzeige

Grundlagen zu Elektrischen Triebfahrzeugen und ihrer Energieversorgung

Das Buch wendet sich an Studierende der elektrischen Energietechnik, der Regelungstechnik und des Maschinenbaus. Es gibt einen Überblick über die Grundlagen der elektrischen Zugförderung und beschreibt schwerpunktmäßig die Drehstromantriebstechnik. Danach wird die Energieversorgung der Bahnen (16 2/3 Hz, 50 Hz, GS) unter besonderer Berücksichtigung der Leistungselektronik und der Netzurückwirkungen behandelt.

Die dritte Auflage berücksichtigt maßgebliche Entwicklungen, die ihren Weg in die Bahnpraxis gefunden haben oder bald finden werden. Dies betrifft besonders die Technik der permanent-erregten Synchronmaschinen sowie des umrichtergeführten Mittelfrequenz-Transformators zum Ersatz des besonders bei der Bahnstromfrequenz 16 2/3 Hz sehr schweren Haupttransformators, neue Zweikraft- oder Hybrid-Fahrzeuge sowie die neue Topologie des Modularen Multilevel Converters (MMC) in der Bahnstromerzeugung 16 2/3 Hz.

Andreas Steimel
3. Auflage 2014, ca. 412 Seiten, 170 x 240 mm
Broschur mit interaktivem eBook (Online-Lesezugriff im MediaCenter)

ISBN: 978-3-8356-7134-8



Bestellung unter:

Tel.: +49 201 82002-14
Fax: +49 201 82002-34
bestellung@vulkan-verlag.de

Preis: € 57,-