

Bahnstromversorgung, Quo Vadis?

Vor rund 100 Jahren beschlossen die Schweizerischen Bundesbahnen, ihr Netz zu elektrifizieren, um von Kohleimporten unabhängig zu werden. Heute wird nahezu der gesamte Betrieb elektrisch abgewickelt, der steigende Energiebedarf ist eine aktuelle Herausforderung. Dieser Artikel rekapituliert die Entwicklung der elektrischen Eisenbahn in der Schweiz und schlägt einen neuen Ansatz zum Umgang mit steigendem Energiebedarf vor, ohne dabei den Kapazitätsbedarf zu vernachlässigen.

1. VON DER DAMPF- ZUR ELEKTRO-TRAKTION

1.1. DER WEG ZUR STAATSBAHN

Am 9. August 1847 fuhr der erste Zug in der Schweiz: Die sogenannte „Spanischbrötlibahn“ zwischen Zürich und Baden, betrieben von der privaten Schweizerischen Nordbahn. Der Ertrag der Bahn genügte allerdings kaum zur Deckung der Betriebskosten, an einen privatwirtschaftlichen Ausbau der Bahn war nicht zu denken. Folglich beschloss der Bund, gestützt auf Art. 21 der Bundesverfassung [1] von 1848, ein gesamtschweizerisches Eisenbahnnetz planen zu lassen und die Eisenbahn (de facto) zur Zuständigkeit des Bundes zu erklären. Wenig später – im Eisenbahngesetz von 1852 – wurde dies jedoch revidiert, die Eisenbahn war nun Sache der Kantone und Privaten

Nicht nur durch Netzausbau, sondern auch durch ganzheitliche Systemoptimierung kann dem steigenden Energiebedarf begegnet werden.

[2/35–38,3]. Sofort entstanden viele private Eisenbahngesellschaften; die fünf wichtigsten vor Gründung der SBB waren die

- Schweizerische Nordostbahn,
- Schweizerische Centralbahn,
- Vereinigten Schweizerbahnen,
- Gotthardbahn und
- Jura-Simplon-Bahn.

Im Februar 1898 entschied das Schweizer Volk, diese Bahnen zu verstaatlichen, um den weiteren Betrieb auf deren Strecken zu sichern – am Neujahrstag 1902 nahmen die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) den Betrieb auf [4,5].

1.2. ENERGIEKRISE IM ERSTEN WELTKRIEG

Bis zum Beginn des ersten Weltkriegs wickelten die SBB ihren Betrieb – mit Ausnahme



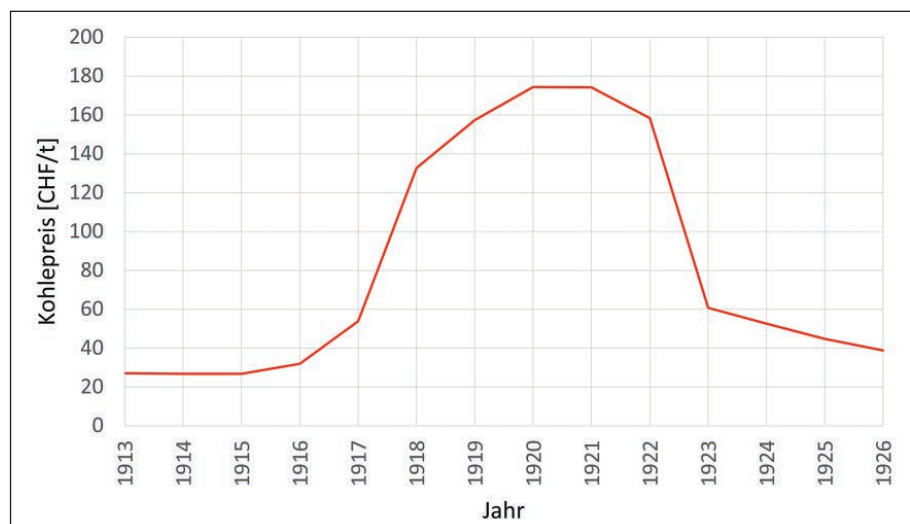
Axel Bomhauer-Beins, MSc ETH
Wissenschaftlicher Assistent, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich
bomhauer-beins@ivt.baug.ethz.ch



Prof. Dr. Ulrich Weidmann
Professor für Verkehrssysteme, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich
weidmann@ivt.baug.ethz.ch

der Simplonstrecke – vollständig mittels Dampftraktion ab. Dies sollte sich mit Kriegsbeginn rächen: Der Bundesrat verfügte die Reduktion der Zugskilometer um 24%, Schnell- und Luxuszüge fielen aus, der Fremdenverkehr kam zum Erliegen. 1916 begann die Kohleeinfuhr zu sinken und die Preise zu steigen (Bild 1), ein Jahr später wurde der Fahrplan zwecks Einsparung von täglich 11 000 t Kohle stark eingeschränkt. 1918 war die „preisliche Schmerzgrenze“ erreicht und die SBB beschlossen die Elektrifizierung des gesamten Netzes, 1920 begann die Einführung elektrischer Lokomotiven [4].

BILD 1: Entwicklung des Kohlepreises 1913 bis 1926
(Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten aus den statistischen Tabellen 1913–1926 gemäss [4])



1.3. WAHL DES STROMSYSTEMS

Grundsätzlich standen drei Stromsysteme zur Auswahl:

- Gleichstrom, dessen Tauglichkeit bereits 1879 durch Werner von Siemens nachgewiesen worden war [4],
- Drehstrom, mit welchem BBC Baden experimentierte, sowie
- Einphasenwechselstrom, von der Maschinenfabrik Oerlikon (MFO) erforscht [6].

Wegen Absatzschwierigkeiten versuchte die Elektroindustrie bereits Anfang des

20. Jahrhunderts, die Elektrifizierung der SBB voranzutreiben; die Ingenieure lieferten sich dabei einen heftigen Konkurrenzkampf um das zu wählende Stromsystem. Als Folge dessen bewilligten die SBB 1913 zwar die baulichen Massnahmen für die Elektrifizierung der Gotthardstrecke, legten das Stromsystem aber nicht fest. Mit Beginn des ersten Weltkriegs wurden die Arbeiten ausgesetzt – Kohleknappheit und steigende Preise (Bild 1) sowie die sich bewährende, elektrisch betriebene Simplonlinie erhöhten jedoch den Druck auf die SBB. Ende 1915 nutzten die Befürworter des Einphasenwechselstroms die Gunst der Stunde, um die Elektrifizierung als Pfeiler einer unabhängigen und neutralen Schweiz zu positionieren; im Februar 1916 bewilligten die SBB schliesslich die Elektrifizierung der Gotthardstrecke mit Einphasenwechselstrom [7]. Technische Vorteile sind die anwendbare hohe Spannung (somit niedrige Übertragungsverluste) sowie die einpolige Fahrleitung. Auch ein Erfolg bei der BLS im Jahre 1913 dürfte beigetragen haben: Bei Steigungen von bis zu 27 ‰ zog eine Lok vom Typ Be 5/7 (MFO) Züge mit 300 t Gesamtmasse bei 45 km/h – eine damals unerreichte Leistung [8].

2. BAHNSTROMVERSORGUNG GESTERN UND HEUTE

2.1. ENTSTEHUNG UND DECKUNG DES ENERGIEBEDARFS

Auf Grundlage der Erfahrungen mit Probelokomotiven wurde ein Pflichtenheft erstellt, dessen Inhalt exemplarisch in Tabelle 1 wiedergegeben ist. Ergebnis war das „Krokodil“ Ce 6/8II (1919) mit einer Stundenleistung von etwa 1,5 MW; spätere Lokomotivserien (der 1920er-Jahre) wiesen bereits Leistungen im Bereich von 1,6 MW bis 2,7 MW auf. Mit der weiteren Entwicklung stieg die Leistungsfähigkeit: Die Stundenleistung einer Ae 6/6 (4,3 MW, ab 1952) bzw. einer Re 4/4II (4,6 MW, ab 1964) war bereits rund dreimal so hoch wie jene des Krokodils. Mit Dauerleistungen von gut 6 MW bzw. 7 MW sind die Re 465 und die Re 6/6 heute die leistungsstärksten Lokomotivserien der Schweiz – für die spezifische Leistung ergibt sich ein ähnliches Bild.

Zwar sei der Verbrauch elektrischer Energie der SBB mangelhaft dokumentiert [9], dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die bezogene Gesamtleistung seit Beginn der Elektrifizierung stetig gestiegen ist: Einerseits sind die elektrischen Leistungen der Lokomotiven gestiegen (Tabelle 2, Bild 2), andererseits auch die Laufleistungen (kontinuierlicher Angebotsausbau). Für

	Streckenfahrt		Anfahrleistung	
	Steigung	10 ‰	26 ‰	26 ‰
Anhängelast	300 t	430 t	300 t	430 t
Geschwindigkeit	65 km/h	50 km/h	50 km/h	35 km/h
Überlastfähigkeit	–	20% für 15 Min.	–	–
Maximale Dauer	–	–	4 Min.	

TABELLE 1: Schematisierte Darstellung der Anforderungen aus dem Pflichtenheft für das „Krokodil“ Ce 6/8II (Quelle: Eigene Zusammenstellung aus historischen Quellen gemäss [4])

Lokomotive	Indienststellung	Stundenleistung [PS]	Stundenleistung [kW]	Spezifische Leistung [kW/t]
Be 5/7	1913	2500	ca. 1840	17,27
Be 4/7	ab 1919	1760 2040	ca. 1300 1500	13,64
Ce 6/8II	ab 1920	2240	ca. 1650	12,87
Ae 4/7	ab 1927	3120	ca. 2300	18,66
Ae 8/14	1931	11 100	ca. 8160	36,64
Be 6/8	ab 1941	3640	ca. 2680	21,25
Ae 4/4	ab 1944	4000	ca. 2940	36,77
Re 4/4I	ab 1946	2480 2520	ca. 1820 1850	31,96
Ae 6/6	ab 1952	6000	ca. 4410	36,77
Ae 4/4II	1962	6240	ca. 4590	57,37
Re 4/4II	ab 1964	6320	ca. 4650	58,10
Re 6/6	ab 1972	10920	ca. 8030	66,93
Re 460	ab 1991	8300	ca. 6100	72,67

TABELLE 2: Leistungsentwicklung ausgewählter, in der Schweiz eingesetzter Elektrolokomotiven für Normalspur, 15 kV, 16,7 Hz (Quelle: Daten aus [18,19] und von <http://blog.sbb.ch/re-460/2014/11/20/>)

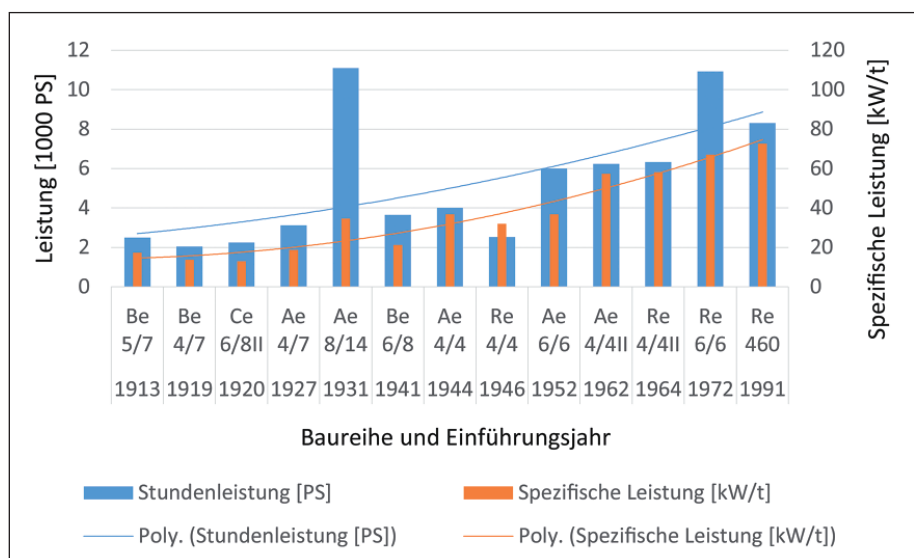


BILD 2: Entwicklung der Dauer- und spezifischen Leistungen schweizerischer Lokomotiven anhand einiger Beispiele. Vernachlässigt man Baureihen mit besonders hohen Leistungen auf Grund spezieller Anforderungen, zeigt sich ein deutlich steigender Trend (Quelle: Eigene Darstellung (Visualisierung der Daten aus Tabelle 2))

die Jahre 1965 bis 2007 lässt sich der Trend steigenden Energiebedarfs und steigender Laufleistung aus den Statistiken ablesen – Bild 3 zeigt den Verlauf für alle Bahnen der Schweiz. Gleichzeitig ist jedoch auch erkennbar, dass der Energiebedarf pro Zug-

kilometer tendenziell sinkt – unter anderem durch verbesserte Fahrzeugtechnik und betriebliche Massnahmen.

Zur Deckung des Energiebedarfs verfügen die SBB seit Beginn der Elektrifizierung über eigene Kraftwerke und ein eigenes »

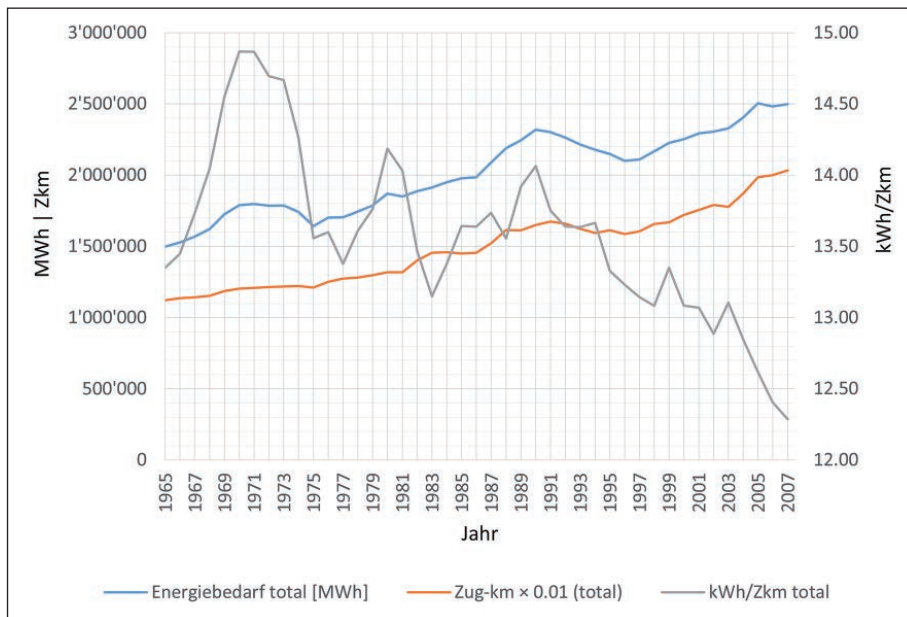


BILD 3: Gesamter Energiebedarf aller Eisenbahnen in der Schweiz in MWh und in der Schweiz gefahrene Zugskilometer (in 100 Zkm) auf der Primärachse (links); spezifischer Energiebedarf in kWh/Zkm auf der Sekundärachse (rechts)
 (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf statistischen Daten der Jahre 1965 bis 2007, abgerufen von <http://www.bfs.admin.ch/> im August 2015, sowie aus [20–23])

Bahnstromnetz; es handelt sich um ein synchrones Netz mit einer Sonderfrequenz von 16,7 Hz. Für den Betrieb ihrer ersten elektrischen Strecke, Brig–Iselle (Elektrifizierung 1906, damals noch Drehstrom), übernahmen die SBB im selben Jahr das vom Kanton Wallis erbaute Wasserkraftwerk Massaboden; bei der Elektrifizierung der Gotthard-Strecke spielten die 1917 und 1922 in Betrieb genommenen Wasserkraftwerke Ritom und Amsteg eine tragende Rolle. Mit fortschreitender Elektrifizierung kamen neue Kraftwerke und Beteiligungen hinzu, das Bahnstromnetz wurde ausgebaut.

2.2. DAS BAHNSTROMNETZ HEUTE

Heute betreiben die SBB sieben Wasserkraftwerke und sieben Frequenzumformer (Kopplung Bahnstromnetz–Landesnetz) und halten Beteiligungen an vier weiteren Kraftwerken. Zudem ist das SBB-Bahnstromnetz über zwei Kopplungen mit dem DB- und über eine mit dem ÖBB-Netz verbunden [10].

Die Energieübertragung erfolgt über das üblicherweise zweipolige Bahnstromnetz mit Spannungen von 132 kV bzw. 66 kV. Es verbindet Kraftwerke und Frequenzumformer mit den 73 Unterwerken, welche die Energie in die Fahrleitung einspeisen – die gesamte Leitungslänge beträgt ca. 1800 km

[11]. Das Bahnstromnetz muss dabei hohen Anforderungen genügen: Während die Erzeugungsschwerpunkte in den Alpen liegen (Kraftwerke Ritom, Göschenen, Amsteg, Massaboden, Vernayaz und Châtelard), treten vor allem im Mittelland – bedingt durch den Taktfahrplan – hochdynamische Lastsituationen mit signifikanten Lastspitzen (gleichzeitiges Anfahren) und Tiefasten (gleichzeitiges Abbremsen) auf. Dies stellt nicht nur für die Energieerzeugung eine Herausforderung dar, sondern auch für das Übertragungsnetz. Dessen historisch gewachsene Struktur ist jedoch weit vom Ideal eines vermaschten Netzes entfernt; beim grossen Blackout von 2005 zeigte sich die Schwäche des Versorgungsnetzes: Die ganze Schweiz stand für mehrere Stunden still. „Doch der Totalstillstand war kein Schicksalsschlag, sondern hausgemacht“ [12], schreibt das Schweizer Radio und Fernsehen SRF und bezieht sich damit sowohl auf die sternförmige Netzstruktur als auch die Prioritäten bei der Störfallbehandlung. Auslöser war

damals eine Schutzabschaltung der Nord-Süd-Verbindung zwischen Amsteg und Rotkreuz (Tessin–Deutschschweiz) auf Grund einer kurzzeitigen Überlastung der Leitung – gleichbedeutend mit einer Trennung der Last von der Erzeugung [13] (vgl. auch Bild 4). Solche Ausfälle sind in Zukunft zu verhindern, was durch verschiedene Mass-

nahmen – Optimierung der Wasserkraftwerke, Verbesserung des Lastflusses und der Lastaufteilung [11] – angestrebt wird.

3. HERAUSFORDERUNGEN HEUTE UND MORGEN

3.1. SITUATION, PROGNOSEN UND HANDLUNGSANSÄTZE

Im Bericht von 2007 hält die Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit (AG LVS) des Bundesamtes für Energie fest, die angespannte Situation im 132-kV-Hochspannungsnetz der SBB wie auch im Landesnetz gefährde die mittel- und langfristige Versorgungssicherheit und empfiehlt 28 Ausbauprojekte bis 2015 für das Bahnstromnetz sowie 39 für das Landesnetz. Kernempfehlung ist die Verbesserung der Netzstruktur durch stärkere Vermaschung sowie eine stärkere Kopplung mit dem Landesnetz, um den Austausch zwischen den Netzen zu verbessern und so die Sicherheit zu erhöhen [14]. Allerdings anerkennt die AG LVS auch Schwierigkeiten und Langwierigkeit bei Neubauten von Frequenzumformern und insbesondere Übertragungsleitungen. In Bild 4 sind die vorgeschlagenen Ausbauprojekte für das Bahnstromnetz der SBB dargestellt, einige davon wurden oder werden realisiert, andere scheiterten am Widerstand von Naturschützern oder anderer Interessengruppen.

In ihrem Faktenblatt zur Energiestrategie [10] prognostizieren die SBB einen Anstieg des Energiebedarfs um 25 % bis 2030, bei den Leistungsspitzen gar von rund 40 %. Neben den Vorschlägen der AG LVS haben auch die SBB eine Energiestrategie zum Umgang mit dieser Entwicklung durch folgende fünf Ansätze entwickelt:

- Energie sparen durch die Umsetzung eines konzernweiten Energiesparprogramms.
- Wasserkraftwerke ausbauen und mit dem Landesnetz verbinden.
- Kernenergieausstieg vorbereiten durch Umsetzung des Energiesparprogramms.
- Beschaffung erneuerbarer Energien aus Wind- und Wasserkraftprojekten.
- Optimierung des Bahnstromnetzes durch Kopplung mit dem Landesnetz.

3.2. AKTUELLE FORSCHUNG

Auch die Forschung widmet sich dem Thema „Energiesparen“ im Bahnbetrieb. Dabei lassen sich verschiedene Stossrichtungen erkennen, welche sich meist mit einem

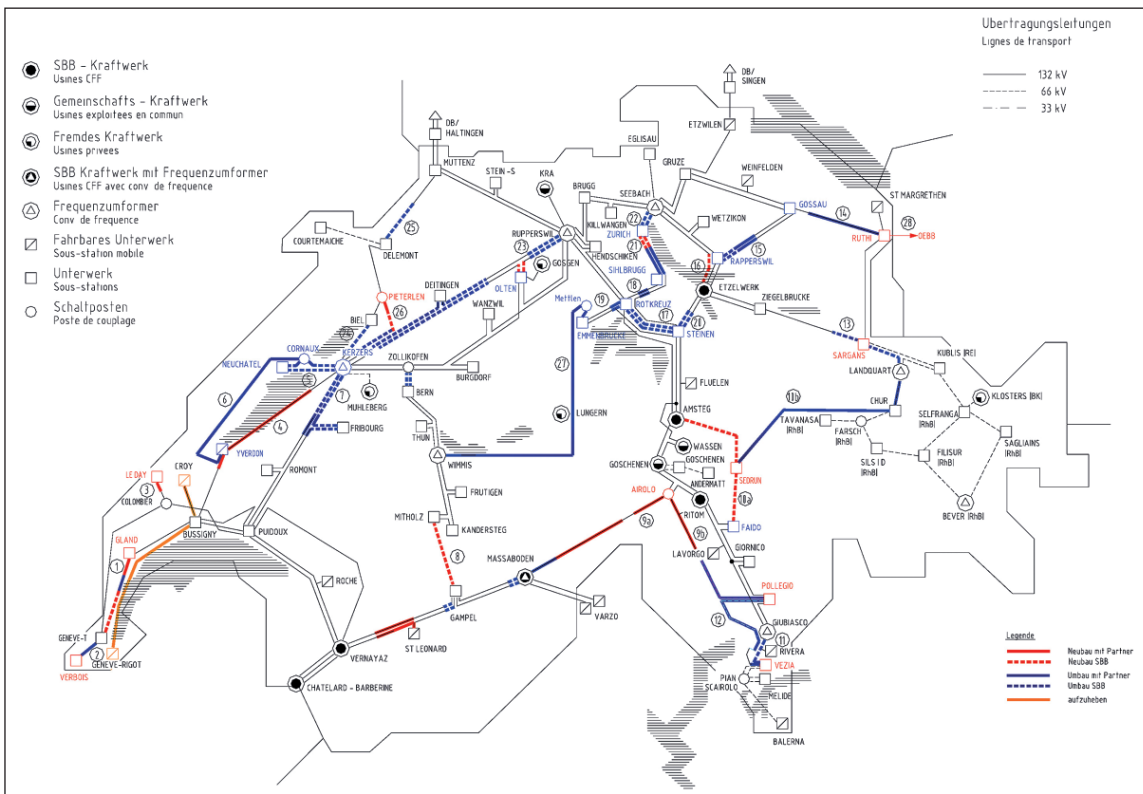


BILD 4: Ausbauvorschläge der Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit für das Übertragungsnetz der SBB
(Quelle: [14, S. 26])

der Subsysteme *Betrieb, Infrastruktur oder Fahrzeuge* befassen; von anderen Autoren auch klassiert in die Bereiche *Regeneration, Energiespeichersysteme und Zugsteuerung* [15].

Am Beispiel der Metro von Melbourne konnte bereits 1989 nachgewiesen werden, dass Echtzeithinweise zum Fahrstil an den Lokführer den Energiebedarf signifikant reduzieren können [16]. In späteren Arbeiten wurden systematische Ansätze zur Automatisierung entwickelt, so dass immer ein situationsgemäss optimales Geschwindigkeitsprofil an den Lokführer übermittelt werden kann. Mit dem im Einsatz befindlichen System der adaptiven Lenkung folgen die SBB diesem Ansatz (wobei hier nur eine Sollgeschwindigkeit übermittelt wird).

Energiespeicher sind ein weiteres Kernthema der Forschung. Durch die Platzierung solcher im Fahrzeug kann die beim Bremsen gewonnene Energie an Bord gespeichert werden, eine Übertragung über das Bahnstromnetz entfällt. Beim Anfahren steht die Energie wieder direkt im Fahrzeug zur Verfügung, was das Bahnstromnetz erneut entlastet. Ein ähnlicher Ansatz existiert für die infrastrukturseitige Energiespeicherung: Werden Speicher nahe an Knoten mit hohem Aufkommen und somit hohen Lastschwankungen positioniert, kann die elektrische Energie nahe ihrem Erzeugungsort bzw. dem Ort des Bedarfs gespeichert und wieder zur Verfügung gestellt werden. Auch auf diese Art kann das Bahnstromnetz ent-

lastet werden. Zur Realisierung beider Arten von Energiespeichern existieren verschiedene Möglichkeiten; Schwungradspeicher, Akkumulatoren und Kondensatoren sind die am häufigsten vorgeschlagenen Varianten.

Optimierungspotenzial birgt auch das Bahnstromnetz selber: Energienetze sind seit Längerem in Forschung und Lehre der Elektrotechnik präsent; auch im verkehrswissenschaftlichen Umfeld sind vermehrt Publikationen zu diesem Thema zu finden. Es werden rückspesiefähige Unterwerke (bidirektionale Kopplung Bahnstromnetz–Landesnetz, v.a. bei Gleichstrom), koordinierte Spannungsregelung zwischen (Gleichstrom-)Unterwerken sowie allgemein der Austausch zwischen Bahnstrom- und Landesnetz untersucht.

Das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich verfolgt seit Längerem den Ansatz, verschiedene Subsysteme gemeinsam zu betrachten, um Synergieeffekte erkennen und nutzen zu können. So wird in einem aktuellen Forschungsprojekt aufgezeigt, dass sich mittels dynamischer Optimierung der Kapazität durch Automation, bestehend aus

- automatischer Fahrplanerstellung in Echtzeit,
- Optimierung der Fahrkurven (Geschwindigkeitsprofile),
- Betrachtung des Zusammenhangs Fahrplanerstellung–Zugführung als Regelkreis,

- automatischer Zugführung und
- optimierter Reservezuteilung

nicht nur die Kapazität der Strecken erhöhen (homogenere Geschwindigkeit), sondern auch der Energiebedarf senken lässt (Vermeidung unnötiger Brems- und Beschleunigungsmanöver) [17].

3.3. EIN SYSTEMWEITER ANSATZ

In einem neuen Forschungsprojekt des IVT soll die Idee der Betrachtung mehrerer Subsysteme zur Findung einer systemoptimalen Lösung fortgeführt werden. Während in den Subsystemen Fahrzeuge, Betrieb und Infrastruktur jeweils Ansätze und Lösungen existieren, sollen nun alle drei Subsysteme gemeinsam betrachtet werden (Bild 5). Hierzu wird die Herleitung eines funktionalgenerischen, energieorientierten Modells angestrebt, welches das Gesamtsystem Bahn unter dem Gesichtspunkt des (Traktions-)Energiebedarfs abbilden soll. Durch die Auswertung von statistischen Daten wird ein Verständnis für die Entstehung und Verteilung des Energiebedarfs angestrebt, welches wiederum die Ableitung von präzisen Optimierungszielen erlauben soll; neue Technologien zur Optimierung sollen zusammengestellt und in das Modell integriert werden.

Auch eine zweite Herausforderung des Eisenbahnsystems soll in die Betrachtung ein- »

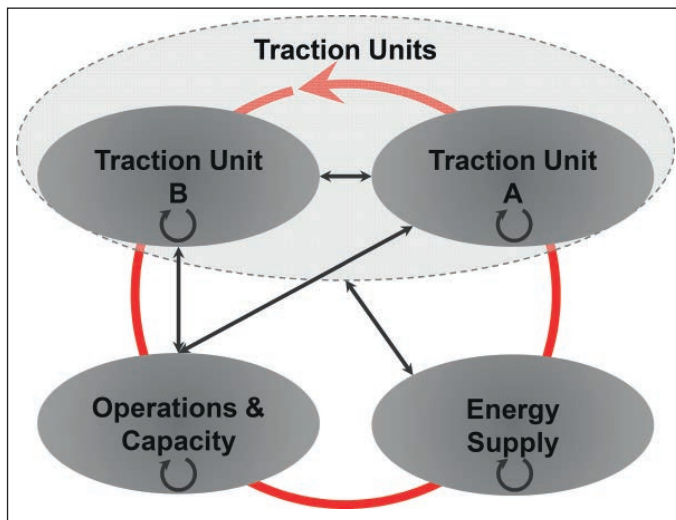


BILD 5: Die drei Subsysteme des Eisenbahnsystems, bestehende Optimierungsansätze (graue Pfeile) und vom IVT vorgeschlagener Optimierungsansatz (roter Pfeil)

bezogen werden: Steigende Bevölkerungszahlen verbunden mit einem steigenden Mobilitätsbedürfnis führen zu immer höheren Auslastungen der Strecken, verschiedene Strecken gelangen bereits an ihre Kapazitätsgrenze. Auf diesen Strecken, welche vor allem Ballungsräume verbinden, ist eine optimale Kapazitätsnutzung (z.B. durch homogene Geschwindigkeiten und optimale Zugführung) von essentieller Wichtigkeit. In diesem Kontext muss die Energiefrage zwangsläufig in den Hintergrund treten, um die Hauptaufgabe des Systems – Beförderung von Personen und Waren – nicht zu gefährden.

In das zu entwickelnde Modell ist folglich auch die Auslastung einer Strecke zu integrieren, verschiedene Randbedingungen und Optimierungsziele sind zu ermitteln und festzulegen. Auf diese Art soll es ermöglicht werden, das System als Ganzes zu optimieren – sowohl im Hinblick auf den Energiebedarf als auch auf die Kapazität.

Eine mögliche Lösung für ein Netz oder einen Netzbereich könnte somit zum Beispiel für hochbelastete Strecken infrastrukturelle (Energiespeicher) und operative Massnahmen (Fahrplananpassung für homogene Geschwindigkeiten) umfassen, während für eine schwach befahrene Nebenstrecke Massnahmen wie Fahrzeitverlängerungen (Geschwindigkeitsreduktion) und fahrzeugseitige Energiespeicher denkbar sind.

4. FAZIT

Seit Beginn des elektrischen Bahnbetriebs in der Schweiz vor rund 100 Jahren ist das Bahnstromnetz historisch mit dem Fortschritt der Elektrifizierung gewachsen. Das entstandene sternförmige Netz ist heute an seiner Belastungsgrenze angelangt – eine Situation, in der sich nicht nur die Schweiz und ihre Bahnen befinden.

Dieser Herausforderung kann durch den Ausbau von Übertragungsnetzen und Kraftwerken begegnet werden. Allerdings erweist sich vor allem ersteres als schwieriges Unterfangen, Projekte scheitern immer wieder am Widerstand aus der Bevölkerung. Ein zusätzlicher Ansatz besteht in der Optimierung des Netzes durch den Einsatz neuer Technologien: Verbesserte Fahrstrategien, adaptive Lenkung, infrastruktur- und fahrzeugseitige Energiespeicher usw. In einem neuen Forschungsprojekt des IVT sollen diese Ansätze kombiniert und systemweit betrachtet werden, um so einen Beitrag zur Bewältigung der aktuellen energetischen und operativen Herausforderungen durch die Bereitstellung einfach(er) zu realisierender Massnahmen zu leisten. ◀

Literatur

[1] Schweizerische Eidgenossenschaft: Bundesverfassung vom 12. Herbstmonat 1848. Abgerufen von <http://www.parlament.ch/> am 19.08.2015.
 [2] S. Wiederkehr: Institutionen, Strukturen, Prozesse. Überblickskommentare zu Jung/Wiederkehr: Escher Briefe, Band 4, S. 18–45. Abgerufen von <http://www.briefedition.alfred-escher.ch/> am 19.08.2015.
 [3] P. Fischer: Spanischbrötlbahn. Baden-Verlag, Baden-Dättwil: 2. Auflage 1996.
 [4] A. Bomhauer-Beins: Eine Geschichte der Entwicklung der Elektrolokomotive in der Schweiz vom Krokodil zur Lok 2000. Maturitätsarbeit. Kantonsschule Glattal, Dübendorf: 2006.
 [5] SBB: Geschichte. Abgerufen von <http://www.sbb.ch/sbb-konzern/ueber-die-sbb/geschichte.html> am 19.08.2015.
 [6] W. Trüb: 100 Jahre elektrische Bahnen in der Schweiz. Orell Füssli, Zürich: 1988.
 [7] K. T. Elsasser: Elektrifizierung der Gotthardbahn: «Weisse» Kohle für den Gotthard. In: 125 Jahre Gotthardbahn. Sonderdruck Swiss Engineering, Oktober 2007. Abgerufen von <http://www.museumfabrik.ch/eisenbahn.html> am 20.08.2015.
 [8] H. von Arx, P. Schnyder und H. P. Treichler [Hrsg.]: Bahnsaga Schweiz. AS Verlag: 1996.
 [9] H. Killer: 10.4083 – Interpellation: Energiestatistik der SBB, Dezember 2010. Abgerufen von <http://www.parlament.ch/> am 13.08.2015.
 [10] SBB AG: Energiestrategie 2015: Faktenblatt. Februar 2015.
 [11] S. Schranil: Steigerung der Energieeffizienz im System Vollbahn. Vortrag. Dresden: 07.11.2014.

[12] Der Blackout 2005 – Ein schwarzer Tag für die SBB. SRF Online, 2014. Abgerufen von <http://www.srf.ch/news/schweiz/der-blackout-2005-ein-schwarzer-tag-fuer-die-sbb> am 14.08.2015.
 [13] R. Kallmann (2005): Der schweizweite Bahnstromausfall vom 22. Juni 2015. In: Bulletin SEV/VSE (17), S. 33–35.
 [14] Bundesamt für Energie BFE [Hrsg.]: Schlussbericht der Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit. Februar 2007.
 [15] S. Hillmansen (2012): Electric railway traction systems and techniques for energy saving. In: IET Professional Development Course on Electric Traction Systems.
 [16] P. G. Howlett, I. P. Milrow, and P. J. Pudney (1994): Energy-efficient train control. In: Control Engineering Practice, 2(2), S. 193–200.
 [17] U. Weidmann, M. Laumanns, M. Montigel und X. Rao (2014): Dynamische Kapazitätsoptimierung durch Automatisierung des Bahnbetriebs. In: Eisenbahn-Revue 12, S. 606–611.
 [18] Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur [Hrsg.]: Schweizerischer Lokomotivbau 1871-1971. Winterthur: 1971.
 [19] info24 – ÖV Schweiz-Europa: Die Lokomotiven Re 460 der Schweizerischen Bundesbahn SBB. Abgerufen von <http://re460.jimdo.com/startseite/die-lokomotiven-re-460/> am 18.08.2015.
 [20] Bundesamt für Statistik [Hrsg.]: Schweizerische Verkehrsstatistik. Bern: 1978–1984.
 [21] Bundesamt für Statistik [Hrsg.]: Statistische Resultate – 11: Verkehr – Der öffentliche Verkehr. Bern: 1985–1989.
 [22] Eidgenössisches Amt für Verkehr [Hrsg.]: Schweizerische Verkehrsstatistik. 1965–1975.
 [23] Eidgenössisches Statistisches Amt [Hrsg.]: Schweizerische Verkehrsstatistik. Bern: 1976–1977.

Weiterführende Literatur

- R. Gohl: Das grosse Buch der Schweizerischen Bundesbahnen: 100 Jahre SBB – 1902 bis 2002. Bruckmann-Verlag, München: 2001.
- H. Schwabe: Die Entwicklung des Schweizerischen Eisenbahnnetzes 1847–1980: Anhang zu den Sammelbänden «Schweizer Bahnen damals». Pharos Verlag, Basel.
- H. G. Wägli: Schienennetz Schweiz. AS Verlag, Bern: 1980.
- [s.n.] (1916): Die Elektrifizierung der S.B.B., Gotthardstrecke Erstfeld–Bellinzona. In: Schweizerische Bauzeitung 8 (67/68), S. 98–100.
- Statistische Tabellen der SBB, 1913–1926. SBB-Archiv, Bern.
- Statistische Jahrbücher der SBB, 1927–1963. SBB-Archiv, Bern.

► SUMMARY

Where are we going with supplying power for the railway's?

In a brief outline of Swiss railway history the author recapitulates developments from the first railway company through to the completely electrified network. He schematically recounts how the need for energy originates and how it is met. He then goes on to discuss present-day challenges and approaches to dealing with them, before concluding with an optimisation strategy taking in the whole system, which (along with upgrading measures) might contribute to reducing the load on the railway's electricity network. The core of this strategy consists in considering the vehicles, the infrastructure and the operations all together and in including not only the energy requirements but also the line capacity in the calculation.