Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 90 (1999)

Heft: 11

Artikel: Energieeffizienz im Schienenverkehr : neue Eisenbahnkonzepte senken den Energieverbrauch um 50%

Autor: Brunner, Conrad U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-901946

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Energieeffizienz im Schienenverkehr

Neue Eisenbahnkonzepte senken den Energieverbrauch um 50%

Der Energieverbrauch und die Umweltbelastung der Eisenbahn sind im Vergleich zum Strassenverkehr nach wie vor gering. Um diesen Vorsprung auch in Zukunft sichern zu können und um die Fortschritte des privaten Personen- und Güterverkehrs zu kompensieren, muss sich die Effizienz des Schienenverkehrs jedoch weiter verbessern. Mit leichten, aerodynamischen Zügen und neuen Antriebskonzepten lässt sich der Verbrauch elektrischer Energie pro transportierte Nutzeinheit annähernd um die Hälfte senken.

Grundsätzliches zum Schienenverkehr

Die Energieeffizienz des öffentlichen Schienenverkehrs im Vergleich zum privaten Strassenverkehr lässt sich aufgrund der physikalischen Grundlagen leicht analysieren: Ein Stahlrad auf einer Stahlschiene läuft mit einem Reibungswiderstand, der ungefähr eine 10er-Potenz kleiner ist als ein Gummipneu auf einer Strasse. Rad und Lager ergeben für typische Radgrössen von Eisenbahnen (∅=92 cm) eine Fahrwiderstandszahl von 0,002 (Stahlrad/Stahlschiene) und von Personenwagen (∅=60 cm) von 0,02 (Gummipneu auf Asphaltstrasse). Der Fahrwiderstand ist abhängig vom Rollwiderstand einerseits und vom Lagerwiderstand der Achsen anderseits. Da diese Lager mit Kugel- und Wälzlager etwa gleich gut ausgerüstet werden, werden die Abweichungen des Fahrtwiderstands vor allem durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Räder und der Schiene beziehungsweise der Strasse verursacht. Je härter die Berührungsebene ist, desto weniger Energie muss für die Walkarbeit des Rades aufgewendet werden. Dieser Vorteil des auf einer Stahlschiene rollenden Stahlrades ist der Ursprung der Effizienz des öffentlichen Verkehrs mit Schienenfahrzeugen. Und gleichzeitig ist das damit verbundene hohe Leergewicht der historische Schwachpunkt der Bahn, der bislang viel zu wenig beachtet wurde.

Gemeinsam ist den beiden konkurrenzierenden Verkehrssystemen ein Auslastungs- und ein Taraproblem. Die mittlere Auslastung eines fünfplätzigen Personenwagens ist mit 1,7 Personen (also 34%) etwa gleich gut (oder schlecht) wie die mittlere Sitzplatzauslastung der Reisezüge der SBB 1997 (25%). [1–3] Ein moderner Personenwagen der Mittelklasse mit 1200 kg braucht etwa 240 kg Totgewicht (Tara) pro Sitzplatz, ein 43 t schwerer SBB-Reisezugwagen mit 86 Plätzen in der 2. Klasse allein bringt es auf 500 kg, der ganze Zug zusammen mit der Lok, dem Speise- und Gepäckwagen auf 700 kg. Ein Sitzplatz im französischen TGV, im deutschen ICE, im italienischen Pendolino und ähnlichen Zugsystemen entspricht über 1000 kg Zuggewicht. Bild 1 zeigt das Leergewicht pro Sitzplatz von einer Reihe unterschiedlicher Zugtypen. Für den Gütertransport sieht das Verhältnis für die Bahn nicht besser aus: Ein Lastwagen mit 28 t oder 40 t Gesamtgewicht hat eine nutzbare Transportleistung von 16 bis 28 t, das heisst, die Nutzlast beträgt etwa 60 bis 70% des maximalen Gesamtgewichts. Ein moderner vierachsiger Güterwagen hat ein Leergewicht von rund 24 t und kann dabei rund 32 t Nutzlast transportieren, das heisst, die Nutzlast ist etwa 57% des maximalen Gesamtgewichts. Wird der Anteil der Lok mit berechnet, sinkt der Nutzlastanteil auf etwa 50%.

Der Luftwiderstand ist von der aerodynamischen Form und Grösse der Stirnfläche einerseits, der Abwicklung und der Endfläche des Fahrzeugs anderseits abhängig. Ein 340 m langer IC-Reisezug der SBB mit 12 Wagen des Typs EW IV (inkl. Speise- und Gepäckwagen) hinter einer modernen Lok Re 460 bringt es bei einer Stirnfläche von rund 10 m² und 800 Sitzplätzen mit einem gesamten Luftwiderstandsbeiwert von 2,3 auf rund 0,03 m²/Sitzplatz. Ein Personenwagen (Pw) mit einem guten Luftwiderstandsbeiwert von 0,3 bringt es bei einer Stirnfläche von 1,8 m² auf einen etwa drei Mal grösseren Wert von 0,1 m²/Sitzplatz. Der Luftwiderstand nimmt mit steigender Geschwindigkeit im Quadrat zu. Deshalb wird sein Anteil an der gesamten verbrauchten Leistung (inkl. Heizung, Klimaanlage, usw.) bei konstanter Geschwindigkeit für IC-Züge in der Ebene ab etwa 140 km/h dominierend (Bild 2). Grund-

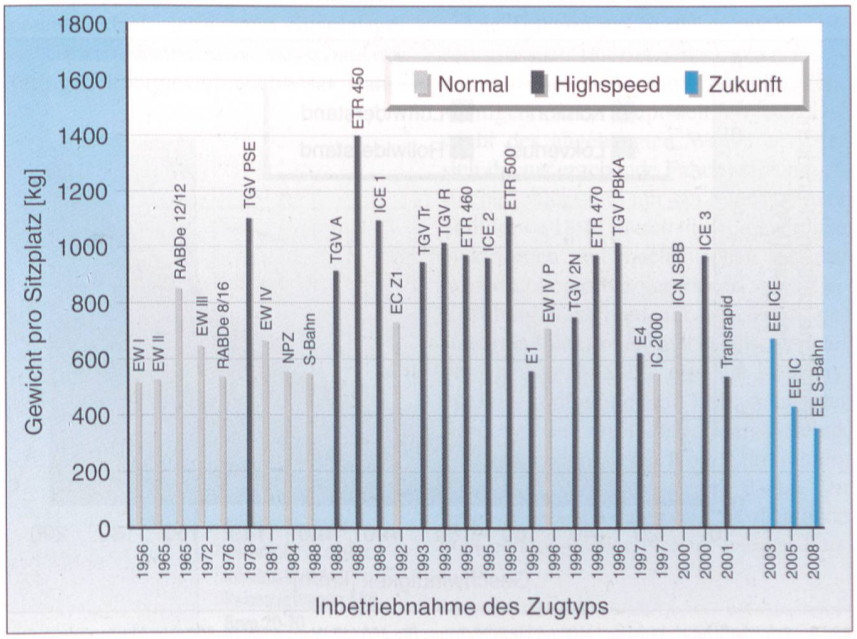

Bild 1 Leergewicht pro Sitzplatz von verschiedenen Zügen (Quelle Enper)

Adresse der Autoren
Conrad U. Brunner, Dipl. Arch. ETH/SIA
Energieplaner, 8001 Zürich
Renato Gartner, Dipl. Arch. HTL
Bauphysiker, 5430 Wettingen

sätzlich gilt dieser Zusammenhang für alle Verkehrsmittel wie Flugzeuge, Schienenfahrzeuge und Strassenfahrzeuge. Die Reibungskräfte nehmen linear, die Luftwiderstandskräfte aber mit der zweiten Potenz zu. Letztere werden dadurch bei mittleren und hohen Geschwindigkeiten dominant.

Ein weiteres Problem stellt der Nutzungsgrad der eingesetzten Energie dar. Im elektrischen Bahnbetrieb wird 15-kV-Wechselstrom mit $16^2/_3$ Hertz über lange Oberleitungen zum Zug herangeführt und bei modernen Loks der 6100-kW-Klasse mit einem mittleren Wirkungsgrad von etwa 80% in Zugleistung am Rad umgewandelt. [4] Zudem kann diese Lok im Gefälle und beim Bremsen etwa 60% der kinetischen Energie zurückgewinnen. Demgegenüber ist der Wirkungsgrad eines Explosionsmotors von etwa 100 kW im wechselnden Lastverkehr im Freien mit 15 bis 20% (bei Diesel mit 20 bis 30%) weit vom Wirkungsgrad eines Elektromotors entfernt. Der Explosionsmotor von Personenwagen kämpft vor allem mit einer niedrigen Effizienz im Teillastbetrieb, beim Kaltstart und im Leerlauf, Betriebsbedingungen also, wie sie im Stadtverkehr unvermeidlich sind. Für den Lastwagen geht es um weitere Effizienzverbesserungen des aufgeladenen Dieselmotors, um Gewichtseinsparung, aerodynamische Verbesserung und um die stetige Verminderung der Schadstoffemission.

Der eingesetzte Energieträger ist ein weiterer Indikator der Energie- und Umwelteffizienz der beiden Verkehrssysteme: CO_2-Emission, Nuklearstrom, erschöpfliche fossile Energien müssen dazu bewertet werden. Dabei ist der jahreszeitliche, tägliche und stündliche Lastgang der elektrischen Energieerzeugung zu berücksichtigen, weil sich die Zusammensetzung des Parks der eingesetzten Kraftwerkstypen verändert. Um die aktuell verbrauchte Energie zu charakterisieren, muss der direkt eingesetzte Kraftwerkspark eruiert werden. Für eine mittel- und längerfristige Betrachtung muss mit den Daten der europäischen Mischproduktion gerechnet werden. Werden die hier erwähnten direkten Effekte der Energienutzung summiert, so ergibt sich der in Tabelle I dargestellte Endenergieverbrauch.

Daraus lässt sich schliessen, dass der Vorteil der Schiene auf Stufe des direkten Endenergieverbrauches in der Schweiz von ungefähr 1:3 für Personen und 1:10 für Güter heute noch relativ komfortabel ist. Allerdings kann das 3-Liter-Auto und der entsprechende Öko-Lastwagen diesen Vorteil bald schrumpfen lassen. Wenn für den zusätzlichen Strombedarf international vermehrt fossil befeuerte Kraftwerke eingesetzt werden, führt dies zu grösseren CO_2-Emissionen und damit zu ungünstigeren Werten für die elektrischen Bahnen. Auch hier kann im ungünstigsten Moment (kalter Winter nachts) mit importiertem Braunkohlestrom ein hoher CO_2-Ausstoss verursacht werden.

In der genaueren Analyse des Energieverbrauchs muss auch der im gesamten Verkehrssystem Schiene oder Strasse investierte Anteil grauer Energie berücksichtigt werden. [5] Elektrische Oberleitungen, Brücken, Tunnels, Schallschutzmassnahmen, Bahnhöfe sowie die Herstellung des Rollmaterials usw. lassen den indirekten Energieeinsatz beträchtlich ansteigen. Dabei leidet das Schienensystem unter relativ grossen «Fixkosten» in Bahnhöfen und Rangieranlagen und historisch gewachsenen Netzen. Dadurch kommen beim Reisezugverkehr im Schnellzug (gemäss Maibach GVF 97) [6] zu einem Teil Endenergieverbrauch noch einmal ungefähr drei weitere Teile indirekten Energieverbrauchs dazu. Beim Regionalzug mit geringerer Auslastung wird das Verhältnis noch ungünstiger. Beim privaten Personen- und Lastwagen wird nach diesen Berechnungen der direkte Energieverbrauch nicht im selben Masse erhöht. Damit sinkt insgesamt das Verhältnis Schiene zu Strasse im Perso-

Tabelle I Endenergieverbrauch von Strasse und Schiene

a: Personenverkehr
b: Gütertransport

a)	Schiene (IC)	Strasse (PW)
Fahrwiderstandszahl	0,002	0,02
Tara (kg pro Sitzplatz)	240	600
Auslastung Personen	25%	34%
Luftwiderstand (m^2/Pers.)	0,03	0,10
Energienutzungsgrad	70%	20%
Endenergie (kJ/Pers.-km)	520	1700
b)	**Schiene (Güterzug)**	**Strasse (LKW)**
Tara (t pro Nutztonne)	0,9–1,0	0,45–0,75
Auslastung Güter	48%	40%
Endenergie (kJ/Tonnen-km)	330	3200

Tabelle II Gesamtenergieverbrauch unter Berücksichtigung der grauen Energie

Gesamtenergie (kJ)	Schiene (IC/Güterzug)	Strasse (PW/LKW)
pro Personen-km	1220	3050
pro Tonnen-km	1040–2290	5210

Quelle: Maibach GVF 1997

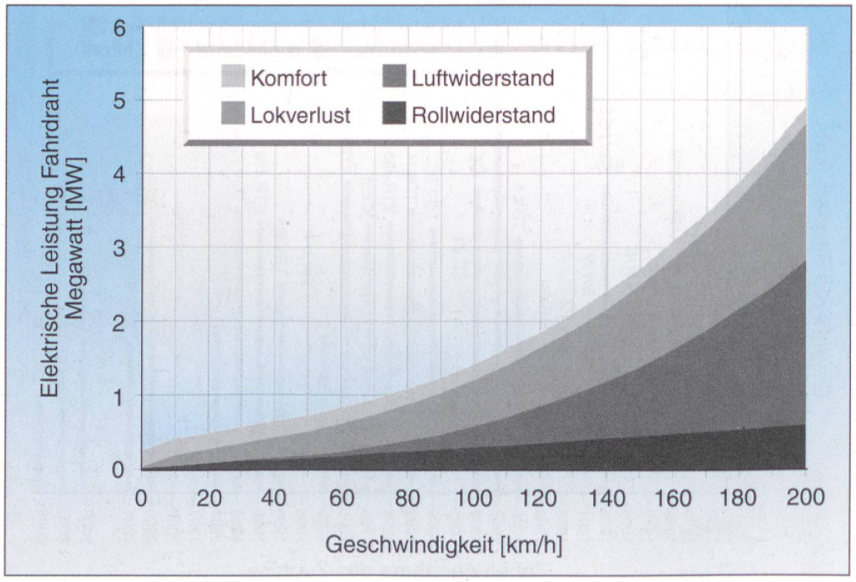

Bild 2 Erforderliche elektrische Leistung eines IC-Zuges (Re 460 / 12 Wagen EW IV, 600 t) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit in der Ebene (Berechnungen Enper)

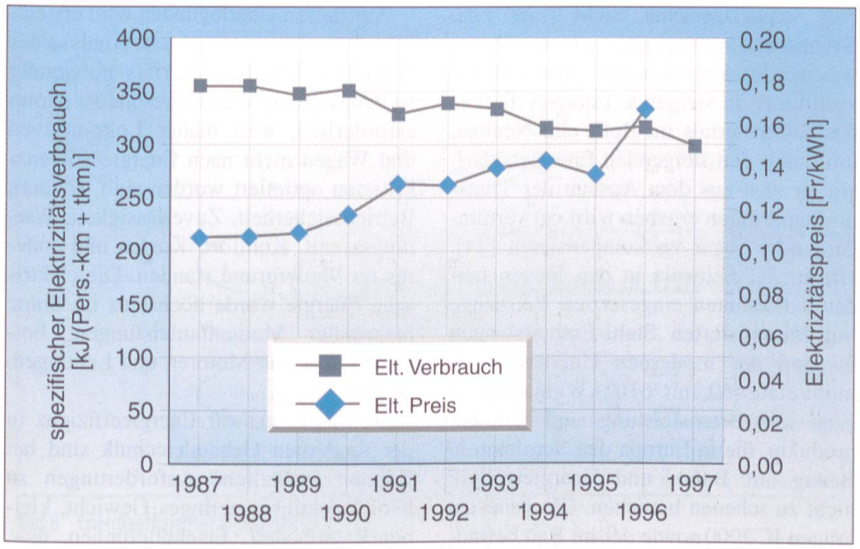

Bild 3 Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs der SBB für Traktion, 1987 bis 1997 (Quelle: SBB, BFS Statistik öffentlicher Verkehr, Berechnungen Enper)

nenverkehr bei Schnellzügen auf 1:2,5, im Güterverkehr auf 1:2,3 bis 1:5 (Tabelle II).

Der Energieverbrauch der Schiene

Gemäss Elektrizitätsstatistik [7,8] verbrauchten die Schweizer Bahnen 1997 zusammen 8,7 PJ (2,410 TWh/a) elektrische Energie, was einen Anteil von 5,0% am gesamten Endverbrauch an Elektrizität ausmacht. Gemäss dem 8. Jahresbericht des Förderprogramms Energie 2000 [9] entfielen 1996/97 1,3 PJ (von total 8,7 PJ) auf fossile Energie (Brenn- und Treibstoffe) sowie 2,054 TWh auf elektrische Energie (Bahnstrom und stationäre Anlagen, inkl. Verluste). Bezogen auf die 52,9 Mrd. Brutto-Tonnenkilometer (1995) ergibt dies einen spezifischen Energieeinsatz von 164 kJ / Brutto-tkm. Bezogen auf die transportierte Einheit (Personen und Güter) ergeben sich 437 kJ / (Pers.-km + tkm)*. Aufgrund einer Modellrechnung von CUB [10] beträgt dabei der spezifische Energieeinsatz der Schiene für Personen 520 kJ / Pers.-km bzw. 330 kJ / tkm für Güter.

Der spezifische Energieverbrauch der Bahn (Bild 3) hat sich in den letzten Jahren kaum verändert, denn die tendenzielle Verbrauchszunahme durch den grösser werdenden Anteil klimatisierter Reisezugwagen und durch die schneller fahrenden Züge konnte dank der gleichzeitigen Einführung neuer Lok-Generationen mit geringeren Energieverlusten und besserer Rekuperation der Bremsenergie annähernd ausgeglichen werden. Die ab 1989 eingesetzten Doppelstockwagen der S-Bahn und die ab 1998 eingesetzten IC-2000-Wagen der SBB versprechen, dank geringerem Sitzplatzgewicht, eine tendenzielle Verbesserung des künftigen Energieverbrauchs der Bahn.

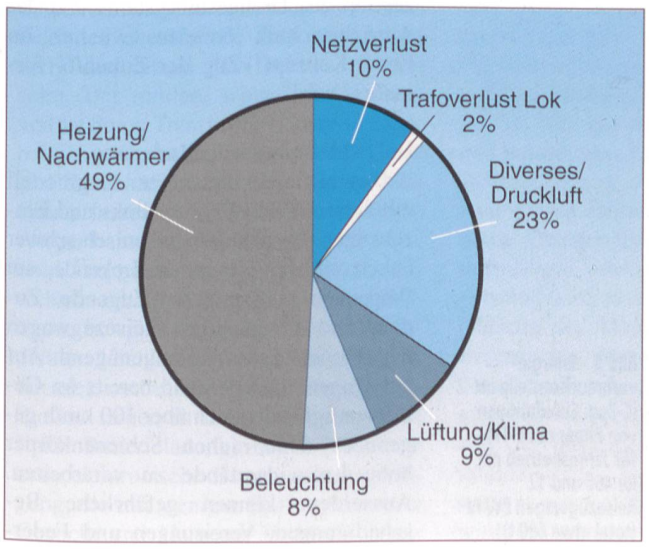

Bild 4 Energieverbrauch in einem klimatisierten Reisezugwagen SBB Bpm 20-70 (Berechnungen Enper)

Da allerdings das Rollmaterial ungefähr während 40 Jahren eingesetzt wird, sind naturgemäss die Veränderungen durch den Ersatz von Rollmaterial erst allmählich spürbar. Eine wichtige Aufgabe entsteht in der systematischen Erneuerung und Aufwertung (Refit) des Rollmaterials, spätestens zur halben Nutzungszeit.

Der Energieverbrauch von Reisezügen

Grundsätzlich lässt sich der Endenergieverbrauch eines Reisezuges – unabhängig vom Antriebssystem und dem Energieträger – in vier Bereiche aufteilen [11,12]:

- Netz: Umformungs- und Transportverluste vom Unterwerk zum Stromabnehmer am Fahrdraht
- Traktion: Antriebsenergie inklusive Hilfsaggregate, minus allfällige Erzeugung aus rekuperierter Bremsenergie
- Funktion: bahnspezifische Funktionen wie Bremsen, Türbetrieb, Federung und Neigevorrichtung, Kommunikationsmittel usw.
- Komfort: Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Beleuchtung, Wasser und Warmwasser, Toiletten usw.

Bei den hierzulande meist elektrisch angetriebenen Zügen ergibt die Gliederung der vier Bereiche etwa folgendes Bild. Die Netzverluste werden – gemäss SBB – pauschal mit rund 10% veranschlagt. Sie sind stark von der momentanen Lastsituation im entsprechenden Streckenabschnitt und von der Produktionsart (50 Hz plus Umrichter oder direkt $16^2/_3$ Hz) abhängig.

Die Traktion macht mit ungefähr 71% den grössten Teil der eingesetzten Energie aus. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass hauptsächlich das Gewicht der angehängten Wagen und der sich daraus ergebende Fahrwiderstand zu Buche schlägt und nur ein relativ kleiner Teil (etwa 18%) durch die eigentlichen elektrischen und mechanischen Verluste in der Lokomotive verursacht wird. Die Erfüllung verschiedener elektrisch gesteuerter Funktionen macht einen Anteil von (heute) etwa 2% aus. Die Komfortenergie kommt derzeit (mit steigender Tendenz) auf etwa 20%. Man beachte, dass es sich bei diesen Werten um Jahresmittelwerte handelt, von denen zu einer gegebenen Jahreszeit beträchtliche Abweichungen verzeichnet werden kön-

* Dieser Wert ergibt sich als Quotient des Gesamtenergieverbrauchs und der Summe aus Gesamttonnen- und Gesamtpersonenkilometern.

nen. Vor allem im Winter kann aufgrund des hohen Heizbedarfs der Anteil der Komfortenergie beträchtlich steigen. Insgesamt ergibt sich für den Elektrizitätsverbrauch der Bahnen ein ungünstiges Winter-Sommer-Verhältnis von rund 55/45. Laut Detailanalysen von klimatisierten Reisezugwagen gliedert sich der Energieverbrauch im Wagen gemäss Bild 4.

Steigerung der Energieeffizienz bei Reisezügen

Der öffentliche Schienenverkehr wird sich nur so lange halten können, wie seine systembedingt höheren Produktionskosten durch die geringere Belastung der Umwelt überkompensiert werden. In einzelnen Mobilitätssegmenten ist die Schiene wettbewerbsfähig. Die Bahn muss aber im Bereich Lärm, Hygiene und Energie grosse Fortschritte machen. Die Deutsche Bahn (DB AG) hat sich dazu ambitiöse Ziele gesetzt [13]: Der spezifische Energieverbrauch pro transportierte Einheit soll mittelfristig deutlich gesenkt werden, und zwar um 25% spezifischer Primärenergie bis 2005 (bezogen auf 1990). Die SBB haben (bis heute) ein vergleichbares Energieeffizienzprogramm erst für den Gebäudebereich formuliert, der einen Anteil von 10% am gesamten Energieverbrauch der Bundesbahnen hat. Die SBB stellen sich bisher auf den Standpunkt, dass ein ähnliches Programm in der Schweiz nicht notwendig sei, weil 80 bis über 90% des elektrischen Stromes für die Traktion aus einheimischen Wasserkraftwerken stammt. Zudem haben sie Bezugsrechte aus französischen Kernkraftwerken, deren Strom sie heute unter dem Einstandspreis am Markt absetzen müssen. Spätestens mit der Neat soll das Angebot im Personen- und Güterverkehr so steigen, dass der bestellte Strom auch genutzt werden kann.

Aus schweizerischer Sicht wäre eine Kompensationsstrategie – trotz gegenwärtiger Stromschwemme – sinnvoll: Investitionen in steigende Energieeffizienz des Rollmaterials im Refit und Neubau, um damit den steigenden Energiebedarf, wie er sich aus dem Ausbau der Transportkapazitäten ergeben wird, zu vermindern oder sogar zu kompensieren [14]. Die in der Schweiz in den letzten beiden Jahrzehnten eingesetzten Reisezüge mit klimatisierten Stahl-Einheitswagen IV und der modernen Universallokomotive Re 460 mit 6100 kW maximaler Zug- und Bremsleistung sind Spitzenprodukte, die in Europa den Vergleich in Bezug auf Bahn- und Energietechnik nicht zu scheuen brauchen. Die neuesten Wagen IC 2000 sowie der im Bau befindliche Neigezug ICN entsprechen dem aktuellen Entwicklungsstand der modernen Bahntechnik in Bezug auf Komfort und Energieverbrauch. Eine weitergehende Verbesserung der Kosten- und Energieeffizienz muss jedoch neue Wege gehen.

Pläne zur Steigerung der Energieeffizienz bei Reisezügen müssen – nach den Regeln der Energiespartechnik – eine saubere Energiebilanz zum Ausgangspunkt haben. Diese basiert auf Einzelmessungen im Labor, im Betrieb und auf statistischen Auswertungen mit mittleren Fahrleistungen von Lokomotiven und Reisezugwagen sowie den entsprechenden Auslastungen. Dabei müssen alle Betriebszustände wie Vorheizen, Stand, Fahrt (konstante Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bremsen, Steigung und Gefälle), Rangieren, Reinigen anteilmässig berücksichtigt werden. Zudem muss ein typisches Streckenprofil und ein jahreszeitlicher Ablauf der Klimawerte für jeden Zugtyp berücksichtigt werden. Bild 5 zeigt eine entsprechende Simulation für einen Zug mit Re-460-Lok und zwölf Reisezugwagen [15].

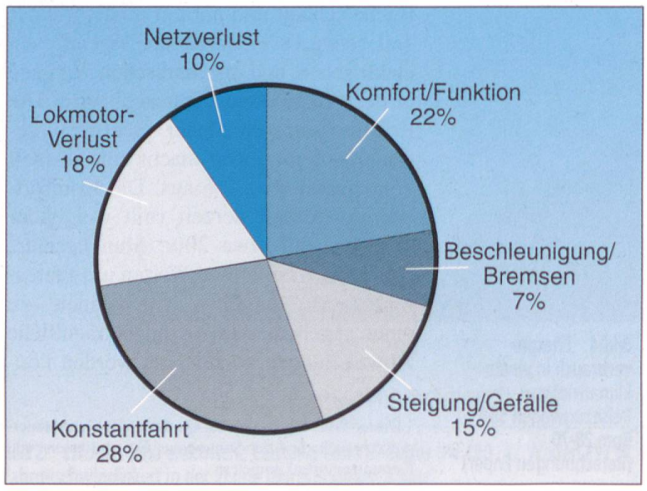

Bild 5 Energieverbrauchsanteile im IC-Zug: Simulationen von Enper mit E-Trac für Jahresbetrieb mit Re 460 und 12 Reisezugwagen EW IV (total etwa 600 t)

Aus diesen Überlegungen wird ersichtlich, dass eine systematische Analyse des heutigen SBB-Rollmaterials notwendig ist. Diese Analyse ist insbesondere darum erforderlich, weil bisher Lokomotiven und Wagen nicht nach Energieeffizienzkriterien optimiert worden sind, sondern Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit, Wartungsarmut, Komfort, Kosten und anderes im Vordergrund standen. Die elektrische Energie wurde höchstens im Sinne maximaler Momentanleistungen, beispielsweise von Motoren und Leitungen, berücksichtigt.

Im Gegensatz zur Energieeffizienz in der modernen Gebäudetechnik sind bei Bahnen zusätzliche Anforderungen zu berücksichtigen: geringes Gewicht, kleiner Raumbedarf, Erschütterungen, usw. Zudem sind – wegen der seltenen Wechselstromfrequenz von $16^2/_3$ Hertz – teilweise nicht marktgängige, teure Sonderanfertigungen von Komponenten nötig.

Als wichtigste Elemente und als Ansatz zur energetischen Verbesserung gelten folgende Bereiche.

Gewichtseinsparung

Die bisherigen Anstrengungen (z.B. IC 2000) haben sich – innerhalb des gewählten Lok/Wagen-Prinzips – auf einen Ersatz der Stahl-Wagenkasten durch Aluminium-Hohlkastenprofile konzentriert. Damit lassen sich nur geringe energetisch wirksame Einsparungen erreichen, weil erstens nur ein kleiner Teil des Gesamtsystems Reisezug eine Gewichtsersparnis erfährt und weil anderseits damit thermische Nachteile (dünnere und damit geringere Aussenwanddämmung) in Kauf genommen werden müssen. Rasch wirksame Refit- und Neubaukonzepte mit geringerem Gewicht beginnen mit leichterem Innenausbau (Sitze, Verkleidungen usw.). Mittelfristig lässt sich ein leichterer Zug nur mit einer radikalen Neukonzeption des Drehgestellsystems und der Antriebstechnik erzielen, wie er im Enper-Konzept «Zug der Zukunft» formuliert wird.

Luftwiderstandsverminderung

Das bisherige Schweizer Zugmodell mit abtrennbaren Universalloks und Einzelwagen führt zu aerodynamisch schwer beherrschbaren Zonen am Lokende, am Wagenübergang und am Zugende. Zudem sind die gängigen Reisezugwagen mit offenem Unterbau ungenügend: Auf der Wagenunterseite sind bereits im Geschwindigkeitsbereich über 100 km/h gegenüber dem rauhen Schienenkörper hohe Luftwiderstände zu verarbeiten. Ausserdem können gefährliche Beschädigungen, Vereisungen und Feder-

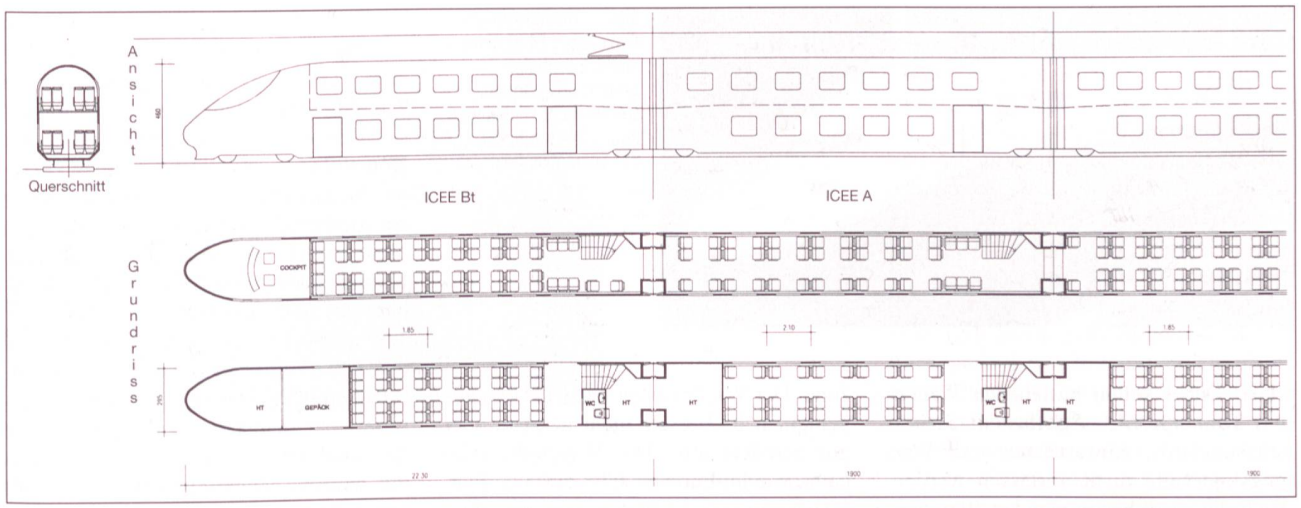

Bild 6 Energieeffizienter IC-Zug (EE IC)
Siebenteiliger Zug mit Triebwagen und doppelstöckigen Wagen mit Jakobsdrehgestell (v_{max} = 200 km/h, 210 t, 670 Sitzplätze), Design Enper 1999: Steuerwagen, Mittelwagen Typ A und B

blockierungen auftreten. Im Refit können kleinere aerodynamische Verbesserungen im Bereich der Fenster- und Türrahmen sowie der Lüftungsgitter realisiert werden.

Grössere Verbesserungen sind praktisch nur bei Neubauten möglich. Dadurch kann auch die Seitenwindempfindlichkeit, die vor allem bei Hochgeschwindigkeitszügen gefürchtet wird, verbessert werden.

Energieeffizienz bei Komfort und Funktion

Die am einfachsten umsetzbare Möglichkeit, den Energieverbrauch zu senken, ist die Halbierung des Komfortenergieverbrauches durch die thermische Verbesserung der Wagenhülle (inkl. Fenster) und bedarfsabhängige Beleuchtungs-, Heizungs-/Lüftungs- und Klimaanlagen. Die Untersuchungen der thermischen Optimierung des Wagenkastens haben gezeigt [12], dass die diesbezüglichen UIC-Normen (UIC = Union internationale des chemins de fer) keineswegs mehr dem Stand der Technik entsprechen. Der mittlere winterliche Wärmeverlust durch Transmission kann ohne erheblichen Zusatzaufwand und mit geringen Wandstärken etwa halbiert werden. Damit lassen sich die Voraussetzungen für ein behagliches Innenraumklima und eine kompakte, energieeffiziente Lufttechnik schaffen. Regelbare Elektromotoren, beispielsweise für Pumpen, Verdichter, Ventilatoren, Türantriebe helfen, die elektrische Leistung zu vermindern. Zudem stehen in der Umformertechnik (inkl. Batterieladung) heute zahlreiche neue elektronische Bausteine zur Verfügung, die mit weniger Platz, geringerem Gewicht und kleineren Verlusten arbeiten. Der weitgehende Ersatz pneumatischer Systeme (Türen usw.) durch direkte Elektroantriebe vermindert die diesbezüglichen Verluste.

Der energieeffiziente Zug der Zukunft

Der Zug der Zukunft muss neue Wege gehen, um die bereits bisher erfolgte Entwicklung der Kosten- und Energieeffizienz markant weiterzubringen. [16, 17] Im Gespräch sind zum einen neuartige Systeme ohne Rad-/Schienenreibung (Swissmetro, Magnetschwebebahn usw.) für Geschwindigkeiten bis 500 km/h. Zum anderen sind in den letzten 20 Jahren vor allem neue Bahnsysteme im Hochgeschwindigkeitsbereich (250–350 km/h) entwickelt und eingeführt worden. Dagegen werden für den häufigsten Einsatzbereich der Bahn vom Regionalzug bis zum Intercity (Spitzengeschwindigkeiten zwischen 120 und 200 km/h) konventionelle Rad-/Schienensysteme noch für sehr lange Zeit ihr Feld halten können.

Glücklicherweise sind aus der Vielfalt der im Betrieb stehenden europäischen und japanischen Züge einzelne Elemente sichtbar, die in optimaler Kombination zum Erfolg führen. Dazu wird weniger einen Quantensprung in der Materialtechnologie oder der Fertigungstechnik notwendig sein, als vielmehr die Optimierung des Materialeinsatzes und des Bauprinzips. Durch diese Optimierung könnte auch eine neue Vereinheitlichung gewisser Bauprinzipien des Rollmaterials und der Infrastruktur erfolgen, die die internationale Verbindung der Bahnsysteme weniger hindernisreich gestalten wird. Ein weiterer – nicht unerwünschter – Nebeneffekt wäre dabei, dass endlich wieder grössere Serien von Rollmaterial entstehen, die eine industrielle Fertigung mit tieferen Kosten ermöglichen würden.

Der Zug der Zukunft nutzt die eingangs erwähnten Vorteile der Schiene: Geringer Reibungsverlust und – bei richtiger Anordnung des Wagenprofils – geringer Luftwiderstand. Da kürzere Reisezeiten wegen der Konkurrenz zur Strasse erwünscht sind und damit die Spitzen- und Reisegeschwindigkeiten steigen, muss der Zug der Zukunft – auch als IC in der Schweiz in schwierigem Gelände – in Bezug auf Stabilität, Bremsverhalten auf eine maximale Reisegeschwindigkeit von 200 km/h ausgelegt sein. Auch in unseren flachen Nachbarländern ist eine Zugentwicklung im mittleren Geschwindigkeitsbereich notwendig, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass das Streckennetz für Hochgeschwindigkeitszüge bis 350 km/h mit vertretbarem Aufwand beliebig ausgebaut werden kann. Der Investitionsaufwand in besiedeltem Gebiet für schallgeschützte Hochgeschwindigkeitsbahnen mit grossen Kurvenradien und geringen Steigungen ist in den letzten Jahrzehnten weiter gestiegen. Die politische Akzeptanz ist gering. Die technologischen Erkenntnisse der Hochgeschwindigkeitszüge in Japan, Europa und den USA können auch für Züge im mittleren Geschwindigkeitsbereich nutzbar gemacht werden.

Auf der Basis eines Intercity-Zuges mit einem Abstand von 30 bis 60 Minuten zwischen den Haltestellen in dichter besiedelten Gebieten in Mitteleuropa wird im folgenden eine Zugkonfiguration (Bild 6) vorgeschlagen, die ungefähr einen halb so grossen spezifischen Energieeinsatz wie ein heutiger IC-Zug auf-

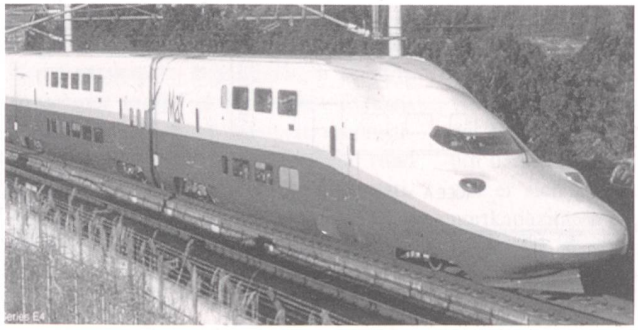

Bild 7 Hochgeschwindigkeitszug E4 (Ostjapanische Eisenbahngesellschaft), Doppelstockwagen, Triebwagen (v_{max} = 240 km/h, 428 t, 817 Sitzplätze) (Bild: JR)

weist. Dabei sollen bestehende Wagen- und Tunnelprofile, Achslasten, Sicherheitsstandards, Einsatzdauer und Wartungsintervalle nicht verlassen werden. Auch die marktbestimmenden Benützeranforderungen an den Komfort (Freiraum, Sitzqualität, Ausblick durch die Fenster) sollen nicht der Energieeffizienz geopfert werden. Und – last but not least – muss ein Zugdesign gewählt werden, das die Sitzplatzkosten gegenüber heute stark vermindert.

Doppelstockwagen

Die bisherigen Erfahrungen mit Doppelstockwagen in der Schweiz mit der S-Bahn und dem IC-2000 sowie im Ausland (Bild 7 und 8) sind ermutigend. Obwohl die Menschen heute immer noch leicht grösser werden, gelingt es mit einer Gesamthöhe der Wagen von 4,6 m über der Schienenoberkante einen bequemen zweistöckigen Wagenkasten mit schönen Fenstern zu bauen. Das IC-Streckennetz der Schweiz wird gegenwärtig auf diese Profilhöhe ausgebaut. Bereits ist Luzern, bald auch Genf doppelstöckig befahrbar. Die bisherigen Doppelstöcker haben sowohl in Bezug auf rasches Ein- und Aussteigen mit breiten Türen und bequemen Treppen wie auch in Bezug auf Sitzkomfort erste Erfahrungen erbracht. Was positiv überrascht, sind tiefere Kosten pro Sitzplatz. Für IC-Züge mit auf 19 m verkürzten Wagen genügt, wie im TGV-Duplex, [18] eine Eingangs- und Treppenzone. Der Wagenkasten muss für den allgemeinen IC-Einsatz nicht neigbar, aber gut gefedert sein. Der Wagenübergang kann, wie im Eurostar ETR 500 von Fiat, aerodynamisch deutlich besser geschlossen werden. Deutlich verbesserbar sind dagegen die bedarfsabhängig geregelte Beleuchtung und Klimatisierung der Wagen. Der Einsatz von Wärmerückgewinnung und Wärmepumpen verhilft zu kleineren Luftmengenströmen und geringeren elektrischen Leistungen. Ziel ist eine thermisch optimierte Wagenhülle (Dach, Wand, Fenster, Türen, Rahmen, Boden) ohne Wärmebrücken, die ein angenehmes, zugfreies Raumluftklima für die Passagiere im Sommer und im Winter erlaubt. Raucher müssen unter Umständen in separaten Wagen Platz nehmen, weil dadurch in den rauchfreien Wagen eine bessere Innenluftqualität garantiert werden kann. Die Innen- und Aussentüren werden verlustarm elektrisch (nicht mehr pneumatisch) angetrieben. Die Aussentüren und die Wagenübergänge müssen druckdicht geschlossen werden können. Eine hygienisch einwandfrei geschlossene Toilette ist selbstverständlich. Damit entsteht insgesamt ein ruhigeres und angenehmeres Fahrgefühl mit besserem Wagenklima.

Jakobsdrehgestelle

Die Nutzung des Jakobsdrehgestells, bei dem am Wagenstoss beide angrenzenden Wagenkasten auf einem gemeinsamen Drehgestell ruhen, ist inzwischen erprobt. Schweizer Trams und französische TGV, spanische Talgo und andere Züge benutzen diese Konstruktionsart seit langem zur vollen Zufriedenheit der Konstrukteure. Sie erfordert einen kürzeren Wagen (19 m statt 26 m), der dafür bei gleichem Tunnelprofil 10 bis 20 cm breiter werden darf. Damit lassen sich die Komfortbedürfnisse der 2. Klasse verbessern und die Bestuhlung in der 1. Klasse unter Umständen ebenfalls (wie in der S-Bahn) auf 4 Sitze pro Wagenbreite erhöhen. Der bisherige schweizerische (und deutsche) Widerstand gegen das Jakobsdrehgestell beruht darauf, dass die gesamte Zugkomposition aus einer festen Anzahl gekoppelter Wagen besteht und nicht mehr beliebig verlängert oder verkürzt werden kann. Für die Wartung der Züge sind daher neue Anlagen mit etwa 150 m langen Hallen erforderlich. Ferner müssen leichte Wagenkasten gebaut werden, damit die Achslast unter 16 t gehalten werden kann und keine abnützungsverstärkende Belastungen auf die Schienen und den Gleiskörper entstehen.

Bild 8 TGV-Duplex, Doppelstockwagen mit Jakobsdrehgestell der SNCF (v_{max} = 300 km/h, 385 t, 377 Sitzplätze) (Bild: La Vie du Rail)

Trieb- und Steuerwagen

Im Zug der Zukunft muss das alte Zugprinzip der separaten Universallok durch direkt angetriebene Wagen ersetzt werden. Die ersten japanischen Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszüge wiesen bereits 1964 Wagenantriebe mit einzelnen 200-kW-Motoren pro Drehgestell auf. [19] Heute wird sowohl der italienische Pendolino ETR 470, als auch der geplante IC N in der Schweiz (Bild 9) und der ICT in Deutschland nach dem Triebwagenprinzip gebaut. Die heutige Motor- und Regeltechnik erlaubt es, hohe Wirkungsgrade in einem breiten Lastbereich gerade auch für Elektromotoren unter 500 kW zu erzielen. Durch die Dezentralisierung des Antriebs auf die Wagen wird das Anfahren in der Steigung und bei schlechtem/nassen Schienenzustand verbessert. Zudem wird die Möglichkeit der Bremsrekuperation optimiert, weil grosse Bremskräfte nicht allein von der Lok verarbeitet werden müssen. Die Triebwagentechnik erlaubt es, Stromabnehmer und -umformer einerseits, angetriebene und nicht angetriebene Wagen anderseits in optimaler Konfiguration zusammenzufügen. Damit können im – für einen bestimmten Einsatz – festgekoppelten Zug weitere Aggregate wie Batterien und Druckluftspeicher, Umformer und Transformatoren und anderes zentral angeordnet werden. So werden Kosten beim Bau und im Betrieb gespart, Gewicht vermindert und Energie eingespart. Die regel-

Bild 9 Intercity-Neigezug ICN der SBB mit Triebwagen (v_{max} = 200 km/h, 355 t, 457 Sitzplätze)
(Bild: Adtranz)

technische Verbindung der Wagen mit einem Zugbus ist in Pendelzügen heute Stand der Technik. Zusätzlich können damit Regelbefehle (z.B. für das Vorheizen, bei der Ein- und Ausfahrt bei Tunnels) zentral gesteuert werden. Die sichere elektrische Verbindung der Wagen auf 15-kV-Stufe ist ebenfalls seit TGV und Pendolino Stand der Technik. Dadurch ist es möglich, pro Wagengruppe mit 3 bis 7 Wagen einen Stromabnehmer einzusetzen und die Umformung und Transformation an einer einzigen Stelle anzuordnen. Durch das Triebwagensystem könnten alte Lokomotivgenerationen (Re 6/6 und Re 4/4) ausserdienst gestellt und neue energieeffiziente Lokomotiven (Re 460, Re 465) im Güterzugbetrieb eingesetzt werden.

Der geschilderte IC-Zug der Zukunft ist übersichtlicher und kürzer, was geringere Wege im Bahnhof ergibt. Der Zug mit direkt angetriebenen Wagen und gleichen Drehgestellabständen fährt ruhiger. Die Doppelstockanordnung ergibt eine natürliche Gliederung der Passagierströme für kurze (untere Ebene) und längere Fahrten (oben) und erlaubt einen rollstuhlgerechten Eingang. Das Sitzplatzgewicht kann von 700 kg (EW IV / Re 460) über 550 kg (IC 2000 / Re 460) weiter bis auf rund 310 kg vermindert werden. Die einzelnen Wagen mit 26 bis 36 t sind stabil gebaut und haben durch ihre verkürzte Länge und das Zwischendeck einen stabileren Kasten. Die früher schwer beherrschbaren Vibrationen und Resonanzschwingungen, Ermüdungsbeanspruchungen und Komfortmängel können so besser vermieden werden. Die bisherigen Wagenbausysteme mit Stahl- und Aluprofilen können noch fortentwickelt werden, bevor teure Glas- und Kohlefaserwerkstoffe eingesetzt werden müssen. Immerhin sind für Scheibenbremsen neuerdings auch besser hitzebeständige Keramikwerkstoffe geprüft worden. Der Energieverbrauch kann mit diesen Massnahmen für einen IC-Zug Genf gleicher Sitzplatzkapazität auf der simulierten Fahrt von Zürich nach Genf Aeroport von 172 auf 91 kJ / Pers.-km auf 53% gesenkt werden (Bild 10).

Eine parallele Entwicklung muss den Regionalzug und die S-Bahn für den Geschwindigkeitsbereich von maximal 120 bis 160 km/h umfassen. Hier sind einerseits ein rascher und bequemer Zugang an den Stationen und anderseits extremer Leichtbau für die hohen Beschleunigungs- und Bremswerte erforderlich. Zudem sollten auch diese Züge modular aufgebaut werden, damit – nach Tagesbedarf – rasch kurze (3er), mittlere (6er) und längere (9er bis 12er) selbstfahrende Kompositionen zusammengestellt werden können. Der Energieverbrauch kann auch in diesem Bereich etwa halbiert werden.

Energieeffizienter Güterzug

Der Transport von festen, flüssigen oder gasförmigen Gütern auf der Schiene braucht einen – analog zum Personenverkehr – beachtlichen Produktivitäts- und Effizienzschub im nächsten Jahrzehnt, wenn die billige Konkurrenz der Strasse einigermassen in Schach gehalten werden soll. [20] Nach jahrzehntelanger massiver Förderung des Strassenbaus, der Autobahnen und der alpenquerenden Tunnels befindet sich der gemächliche Güterzug auf einem mehr als 50jährigen Schienennetz arg im Hintertreffen. Der Diesellastwagen mit Sattelaufleger hat bereits eine erste Verbesserung der Motortechnik, der Aerodynamik, im Nutzlastverhältnis und beim Schadstoffausstoss hinter sich. Sein Entwicklungspotential ist aber bei weitem noch nicht ausgereizt.

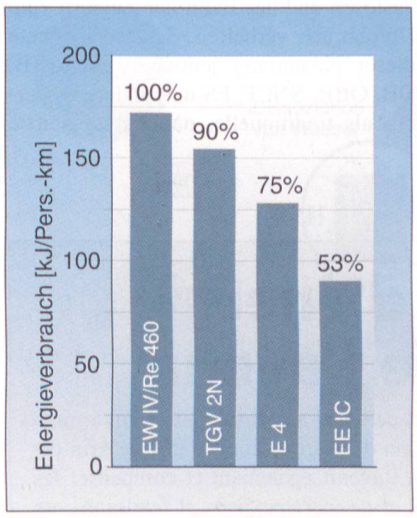

Bild 10 Energieverbrauch EE IC
Vergleich mit heutigem Reisezug sowie japanischem und französischem Doppelstöcker auf der Teststrecke Zürich–Genf Aéroport, Simulation mit E-Trac

Der Güterzug hat in den letzten Jahren eine teilweise widersprüchliche Entwicklung durchgemacht: Der Transport von gesamten Lastwagen auf Güterwagen (sogenanntes Huckepacksystem) verschlechtert das Nutzlastverhältnis und ist in Höhe und Breite der transportierten Lastwagen sehr eng begrenzt. Zudem werden dabei die teuren Nutzfahrzeuge nicht voll genutzt. Der Transport von Blockzügen mit ganzen Wagenladungen (von Heizöl über Erz bis Zuckerrüben) ist eine wichtige, aber nur für bestimmte Start-Zielverbindungen geeignete Transportart, die typischerweise 50% Leerfahrten aufweist. Der Container-Verkehr, der sich im Schiffsgüterverkehr weltweit durchgesetzt hat, fristet im schweizerischen Binnenverkehr immer noch ein Schattendasein. Eine angepasste Zwischenform ist der Transport von Sattelauflegern oder Wechselbehältern ohne Zugmaschine. Während in flachen amerikanischen Gebieten lange Containerzüge doppelstöckig auf ultraleichten dreiteiligen Fahrschemeln (mit Jakobsdrehgestellen) effizient und preisgünstig verkehren können, scheitert dieses Vorhaben an unseren durch Brücken und Tunnels begrenzten Profilhöhen und -breiten und an den zulässigen Achslasten. Während die SNCF mit einem schnellen TGV-Cargo (Bild 11) für die französische Post experimentiert, der selbstfahrende Diesel-Cargosprinter der DB AG mit automatischer Kupplung eine neue Frachtzubringerflotte in Verkehr nimmt, jammern wir hierzulande über ungenügende Preiszuschläge für den alpenquerenden Verkehr.

Die Crux unseres überalterten, zu Zweidrittel immer noch zweiachsigen, lärmintensiven Güterwagenbestandes mit Klotzbremsen sind die alten sicherheitstechnischen Anlagen und die Beschränkung auf Fahrgeschwindigkeiten im Bereich von 80 bis 100 km/h. Damit wird eine Parallelführung von Güterzügen mit dem IC-Verkehr in der Schweiz praktisch auf die knappen Nachtstunden begrenzt.

Die deutsche Variante mit separaten Nord-Süd- und Ost-West-Trassen, die für den Güterverkehr reserviert werden, ist in unserer Topographie, bei hoher Besiedlungsdichte, a priori nicht möglich. Denkbar wäre dagegen eine schnelle, weniger lärmintensive Güterzugkomposition mit Scheibenbremsen, die im IC-Stundentakt eingeschoben, dank modernen Betriebsleitsystemen auf den selben Trassen sicher und ruhig fährt. Die vorhandenen Zugmaschinen erlauben diese Betriebsweise in Doppeltraktion mit vernünftigen Zuggewichten ohne weiteres und ermöglichen wesentlich höhere Rückgewinnung der Bremsenergie. Die Versuche der SBB mit sehr langen und schweren Güterzügen (1600 t) am Gotthard haben die unkontrollierbaren Risiken von heterogen zusammengesetzten Kompositionen gezeigt. Der Engpass liegt beim knappen Bestand an effizienten Güterwagen für Flüssigkeiten, Container und Sattelschlepper. Der Kunde verlangt heute Lieferungen «just in time», das heisst hohe Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit auch im Güterverkehr.

Die Entwicklung eines in der Schweiz bis zu 160 km/h (200 km/h im europäischen Flachland) schnellen, 1200 t schweren Güterzuges verspricht einen Produktivitätssprung für den inländischen und internationalen Schienengüterverkehr. Der doppelt bespannte Zug weist etwa 15 bis 20 moderne Rollschemel auf, die bei 12 t Tara rund 50 t Nutzlast in Containern aufnehmen können. Damit kann bei der erforderlichen spezifischen Zugleistung von 10 kW/t und mit rund 16 t Achslast ein Nutzlastverhältnis von gegen 70% erzielt werden. Durch den gleichzeitigen Einsatz von Zug- und Schiebelokomotiven kann die Bremskraft zu einem grösseren Anteil rekuperiert werden. Durch die Standardisierung des Rollmaterials können rasch beladbare Kompositionen gefahren werden, die nicht nur eine höhere Reisegeschwindigkeit, sondern eine wesentlich geringere Start-Ziel-Zeit aufweisen. Durch die raschere Umschlagszeit lassen sich die Kosten der Terminals und des Rollmaterials in vernünftiger Zeit amortisieren.

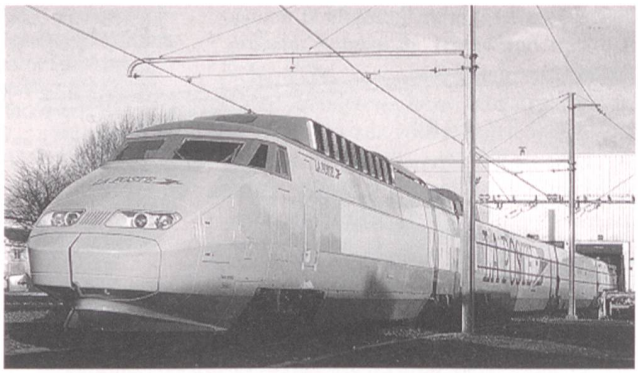

Bild 11 TGV-PTT, Hochgeschwindigkeitszug der SNCF für die französische Post (Bild: La Vie du Rail)

Fazit für die Energieeffizienz der Schiene

Der öffentliche Landverkehr braucht eine neue Grundhaltung: Nachhaltigkeit in der Beanspruchung von Raum und Energie für die Mobilität, Sicherheit und Komfort für die Menschen werden längerfristig in den Vordergrund treten. Die dazu notwendigen Zusatzinvestitionen werden von der Allgemeinheit aber nur dann mitgetragen, wenn die ökologische Belastung des öffentlichen Verkehrs deutlich geringer als durch den «bequemeren» Privatverkehr auf der Strasse ist. Der Schienenverkehr hat seinen guten Ruf durch Defizite, Verspätungen, Unfälle, hohe Preise, wenig kundengerechten Service und veraltetes Rollmaterial und rückständige Infrastruktur stark belastet. Die Welle der Privatisierung und Entschuldung kann neue positive Kräfte auslösen und der Bahn der Zukunft zum Durchbruch verhelfen. Scheitern könnte dieser Neuanfang jedoch, wenn SBB, DB, ÖBB, SNCF, FS und andere weiterhin als traditionelle, national begrenzte Infrastruktur-Institutionen begriffen werden, deren Selbsterneuerungskraft durch die angehäufte Verschuldung, die administrative Komplexität und durch das Beharrungsvermögen begrenzt bleibt.

Literatur

[1] SBB Geschäftsbericht 1997, Zahlen 1997, Bern 1998.

[2] Bundesamt für Statistik: Schweizerische Verkehrsstatistik 1995, Bern 1998.

[3] Bundesamt für Statistik: Der öffentliche Verkehr 1996, Bern 1999.

[4] *M. Meyer, M. Aeberhard:* Energieverbrauch bei elektrischen Bahnen. Schweizer Eisenbahn-Revue (1997) 1–2.

[5] *S. Mauch, W. Rothengatter, et al.:* Externe Effekte des Verkehrs. UIC, Zürich und Karlsruhe 1994.

[6] *M. Maibach, Ph. Schenkel, D. Peter, S. Gehrig:* Umweltindikatoren im Verkehr. GVF, Bern 1997.

[7] Bundesamt für Energie: Schweizerische Gesamtenergiestatistik, Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE, Nr. 16, Zürich 1998.

[8] Bundesamt für Energie: Schweizerische Elektrizitätsstatistik 1997, Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE, Nr. 8, Zürich 1998.

[9] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: Aktionsprogramm Energie 2000, 8. Jahresbericht, Bern 1998.

[10] *C.U. Brunner, T. Pelli:* Simulationsprogramm für den Energieverbrauch von Reisezügen. Elektrische Bahnen (1998) 11.

[11] *W. Bialonski et al.:* Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr. Bundesministerium für Verkehr, Aachen 1990.

[12] *C.U. Brunner, M. Farner, R. Gartner, H. Huber, J. Nipkow:* Energiesparen bei Reisezügen, Enper-Bericht Nr. 4, Bundesamt für Energie, Zürich 1997.

[13] DB AG: Umweltbericht 1996, Berlin 1996.

[14] *M. Keller et al.:* Energieperspektiven, Teil Verkehr, Szenarien I bis III. Bern 1996; Szenario IV, Bern 1997.

[15] *C.U. Brunner, M. Farner, R. Gartner, H. Huber, J. Nipkow:* Energiesparen bei Reisezügen. Eisenbahn-Revue International (1998)1–2.

[16] *K.O. Schallaböck, M. Hesse, et al.:* Konzept für eine Neue Bahn. Wuppertal 1995.

[17] *B. Schulte-Werning, Th. Huber, et al.:* Umweltverträglicher Hochgeschwindigkeitsverkehr auf der Schiene. ETR (1998) 8/9.

[18] *L. Bromberger:* Le Duplex le plus rapide du monde. La Vie du Rail & des Transports (1995), N° 2490.

[19] *Y. Sato:* Hochgeschwindigkeitstriebzüge Serie E4 der East Japan Railway Company. Elektrische Bahnen 96(1998) 6.

[20] *M. Maibach, Ch. Schreyer, M. Lebküchner, S. Mauch:* Zukunftsgüterbahn. NFP 41, Bern 1998.

50% de moins d'énergie pour le train de l'avenir

La consommation d'énergie des chemins de fer et leur impact sur l'environnement sont toujours modestes en comparaison de la circulation routière. Afin cependant de pouvoir assurer cet avantage à l'avenir également et compenser les progrès des transports privés de personnes et de marchandises, il faudra encore améliorer l'efficacité du trafic ferroviaire. Des trains aérodynamiques, légers et de nouveaux concepts de traction permettront de réduire de près de la moitié la consommation d'énergie électrique par unité de transport utile.