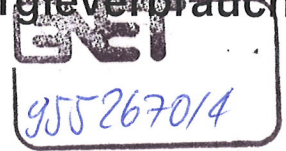


# Vom Gratisstrom zur Energiesparlokomotive – Energieverbrauch bei elektrischen Bahnen

Dr. Markus Meyer, Dipl. El.-Ing. ETH  
Professur für Leistungselektronik und  
Messtechnik der ETH Zürich

Martin Aeberhard, Dipl. El.-Ing. ETH  
SLM Schweizerische Lokomotiv- und  
Maschinenfabrik AG, Winterthur



EF-Archiv 194795

## Energiesparen – keine Notwendigkeit bei der Bahn?

Ist die elektrische Energie zur Förderung von Zügen wirklich kostenlos? Nicht nur die heute tiefen Energiepreise können einen zu dieser Annahme verleiten. Die Eisenbahn ist, abgesehen von der Frachtschifffahrt, das Verkehrsmittel mit dem geringsten spezifischen Energieverbrauch überhaupt. Bei elektrischen Bahnen beträgt der Anteil der Energiekosten am Verkaufspreis einer Verkehrsleistung nur rund 4 %. Beim Linienluftverkehr beläuft sich dieser Anteil auf gut 10 % (oder auf etwa 35 %, wäre das Kerosin im internationalen Luftverkehr nicht von Steuern und Abgaben befreit).

Bei Bahngesellschaften mit eigenen Kraftwerken lassen sich die Energieverbrauchs-kosten nicht an einem einzigen Zähler ablesen. Energiesparmassnahmen sind deshalb nicht direkt in der Erfolgsrechnung sichtbar und scheinen auf den ersten Blick kaum interessant zu sein.

Diese Argumentation ist nicht korrekt. Die Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie kostet auch bei den Bahnen Geld. Die Kosten für die Energie, die eine Lokomotive während ihrer gesamten Lebensdauer verbraucht, liegen in der gleichen Grössenordnung wie ihr Anschaffungspreis, wie im Verlauf des folgenden Beitrags gezeigt wird. Man erkennt daraus sofort die Bedeutung von Energiesparmassnahmen auf einem Triebfahrzeug. Bei der Entwicklung wirtschaftlicher Lokomotiven und Triebwagen nimmt deshalb der Energieverbrauch bereits heute eine wichtige Stellung ein, auch wenn die meisten Bahnen und Hersteller noch von stark vereinfachten Voraussetzungen ausgehen. So wurde bei der Baureihe 101 der Deutschen Bahn AG vor allem der Wirkungsgrad bei halber Maximalleistung vorgeschrieben [2].

Der folgende Beitrag vermittelt einen Überblick über die physikalischen, technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge beim Energieverbrauch elektrischer Bahnen. Der Verbrauch einiger Hochleistungslokomotiven wird für typische Einsätze miteinander verglichen. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Baureihen zwar nicht quantitativ, aber qualitativ übertragen. So entsprechen die Stufenschalter-Lokomotiven mit Widerstandsbremse der DB AG in energetischer Hinsicht weitgehend der Re 4/4 der BLS, die Umrichterlokomotiven 1012 der ÖBB und 101 der DB AG der hier behandelten Re 465

der BLS. Darüber hinaus sind die grundlegenden Erkenntnisse für beinahe alle Arten der elektrischen Traktion gültig, also beispielsweise auch für den Nah- oder Regionalverkehr mit Triebzügen.

## Zugkraft und Energie zur Fortbewegung eines Zuges

Die physikalischen Grundlagen [3] des Energieverbrauchs eines Zuges werden im folgenden anhand einer Graphik erklärt. Sie zeigt die Verläufe der Geschwindigkeit, der Zug- und Bremskräfte sowie der Energie für die Fahrt eines Intercityzuges von Bellinzona nach Arth-Goldau über die Gotthardstrecke der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB).

## Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Soll ein Zug mit konstanter Geschwindigkeit fahren, so muss ein Kräftegleichgewicht herr-

schen, das heisst die in Fahrtrichtung zeigende Zugkraft muss gleich gross sein wie die Summe der entgegengesetzt wirkenden Laufwiderstandskräfte. Laufwiderstandskräfte entstehen durch den Luftwiderstand sowie durch Reibung in den Lagern und in der Rad-Schiene-Kontaktzone.

Der Laufwiderstand und seine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit können im allgemeinen nur experimentell bestimmt werden. Aus den Verläufen der Geschwindigkeit sowie der Zug- und Bremskräfte lässt sich die Summe der am Zug wirkenden Widerstandskräfte bestimmen. Der spezifische, auf das Zuggewicht bezogene Laufwiderstand besteht im wesentlichen aus einem geschwindigkeitsunabhängigen Anteil und einem solchen, der mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Im Tunnel wird der quadratische, vom Luftwiderstand verursachte Anteil wesentlich grösser als auf offener Strecke.

Die Grössenordnung und die Abhängigkeiten der Fahrwiderstände sind in einem Diagramm zusammengefasst. Für die Fahrt des Intercityzuges durch den Gotthardtunnel sind die zeitlichen Verläufe in einer weiteren Figur dargestellt.

Reibungsarbeit führt zur Erwärmung von Bauteilen und der Umgebungsluft. Deshalb ist es nicht möglich, die zur Überwindung des Laufwiderstands aufgewendete Energie zurückzugewinnen. Beim Energieverlauf der Gotthardfahrt zeigt sich dies daran, dass die Höhe der hellblauen Fläche kontinuierlich zunimmt.

Die mechanische Bremse des Zuges wirkt wie eine Vergrösserung des Laufwiderstands während der Bremsvorgänge. Auch hier wird mechanische Energie in Wärmeenergie umgesetzt. Deshalb kann auch die Höhe der roten Fläche nur zunehmen.

## Beschleunigen und Bremsen

Wenn die Geschwindigkeit des Zuges geändert werden soll, ist zusätzlich eine Beschleunigungs- oder Bremskraft aufzubringen. Diese kann ebenfalls als Fahrwiderstand aufgefasst werden. Zusätzlich zur Masse des Zuges müssen auch alle rotierenden Massen der Räder, Achsen, Getriebe und Motoren beschleunigt oder verzögert werden. Die Masse des Zuges wird dadurch scheinbar vergrössert, in der Regel um etwa 3 bis 15 %, je nach Art der Fahrzeuge. Bei Zahnradlokomotiven kann die Vergrösserung 100 % und mehr betragen.

### Energieverbrauch verschiedener Verkehrsträger

(in Wh/Personenkilometer)

|                     | Infrastruktur | Betrieb |
|---------------------|---------------|---------|
| <b>Nahverkehr:</b>  |               |         |
| Moped               | 30            | 135     |
| Auto                | 80            | 500     |
| Bus                 | 10            | 155     |
| Tram                | 30            | 85      |
| Regionalzug         | 35            | 35      |
| Metro               | 2             | 35      |
| <b>Fernverkehr:</b> |               |         |
| Auto                | 80            | 230     |
| Bus                 | 10            | 135     |
| Intercityzug        | 30            | 85      |
| Kurzstreckenflug    | 25            | 525     |
| Langstreckenflug    | 30            | 650     |
| Fährschiffe         | 420           | 450     |

Alle Werte sind gültig bei typischer Auslastung. In der Infrastruktur (Anlagen, Fahrzeuge) ist viel „graue“ Energie investiert, die beim Vergleich verschiedener Verkehrsträger berücksichtigt werden muss. Beim Betrieb sind die Anteile für Produktion und Verteilung der Energie inbegriffen (alle Werte aus [1]).

Die am Zug während des Beschleunigungsvorgangs verrichtete Arbeit bleibt in Form von kinetischer Energie (im Bild grün dargestellt) im Zug gespeichert. Sie ist proportional zum Quadrat der Fahrgeschwindigkeit. Falls das Triebfahrzeug mit einer Rekuperationsbremse ausgerüstet ist, kann die Energie beim Bremsen teilweise in elektrische Energie umgewandelt und ins Netz zurückgespeist werden.

### Berg- und Talfahrt

Wenn der Zug eine Höhendifferenz überwindet, ist Arbeit entgegen der Gravitationskraft zu verrichten. Bei diesem Vorgang wird potentielle Energie in der Masse des Zuges gespeichert (im Bild grau dargestellt). Durch eine Rekuperationsbremse kann diese Energie ebenfalls teilweise ans Netz zurückgegeben werden. Man sieht sehr gut, wie die potentielle Energie nach Bellinzona kontinuierlich zunimmt, im Gotthardtunnel nahezu konstant bleibt, um dann auf der Nordrampe wieder abzunehmen. Da die potentielle Energie proportional zur überwindenen Höhe ist, entspricht der graue Verlauf exakt dem Höhenprofil der Strecke.

### Verluste auf dem Triebfahrzeug

Die bei der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie entstehenden Verluste sind im Bild gelb dargestellt. Alle Verluste fallen letztendlich in Form von Wärme an und können deshalb nicht zurückgewonnen werden. Es ist besonders zu beachten, dass auch bei der Rekuperationsbremse, also bei der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie, Verluste entstehen. Die Höhe der gelben Fläche nimmt deshalb auch bei der Talfahrt zu. Die Verluste in der Fahrleitung verhalten sich gleich wie die Verluste auf dem Triebfahrzeug.

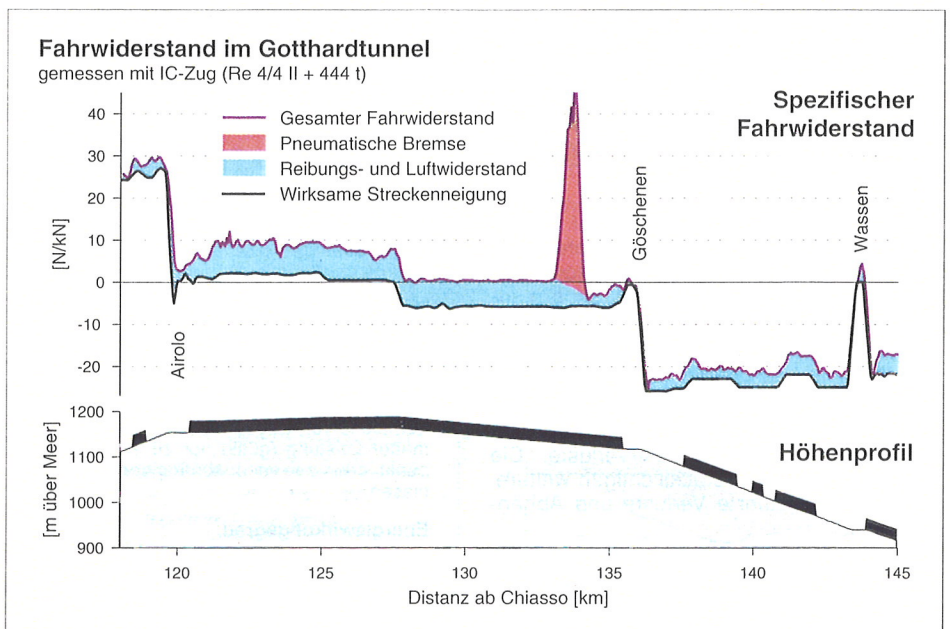
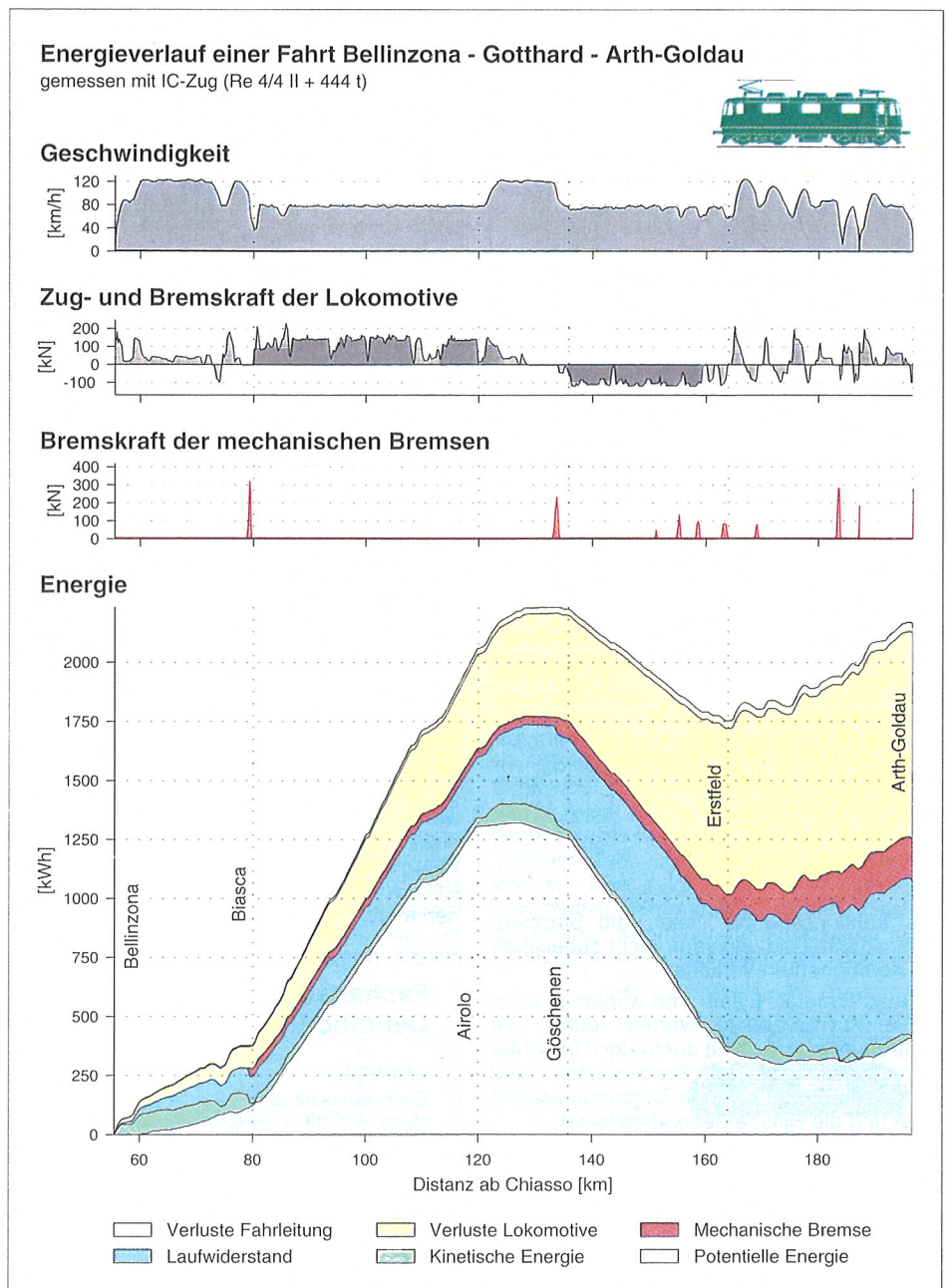
### Leistungswirkungsgrad und Energieverbrauch

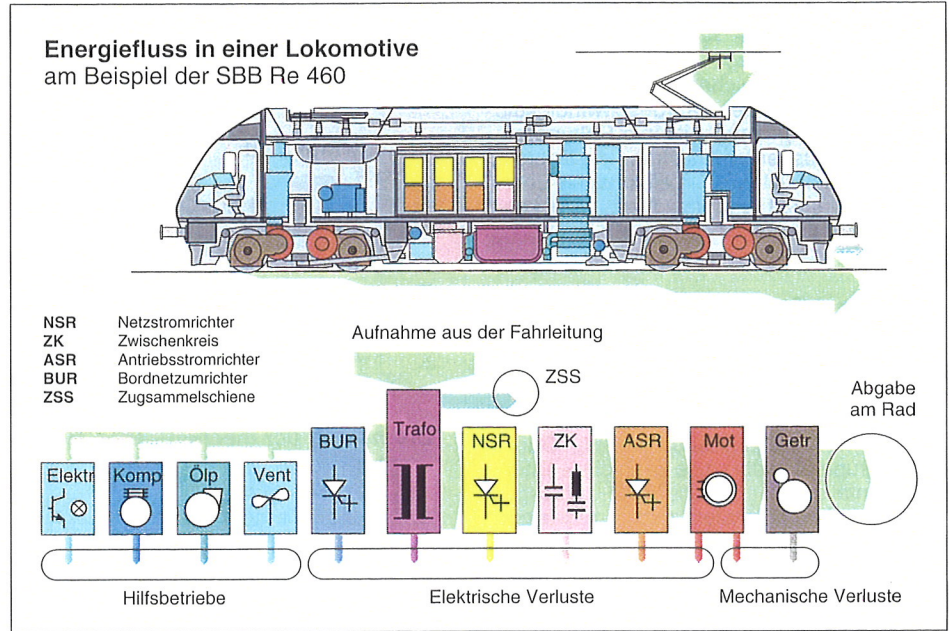
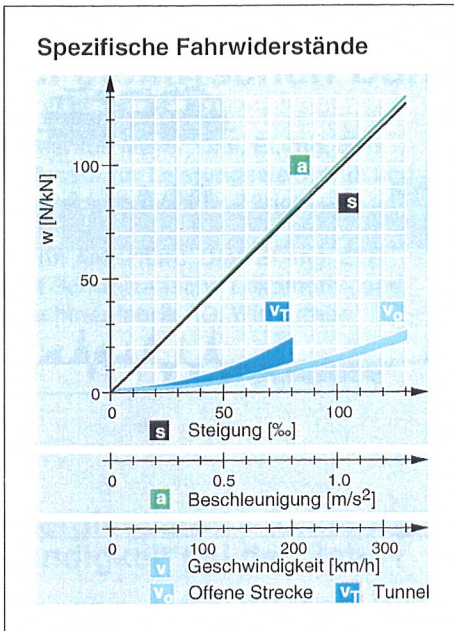
#### Energiefluss in einer Lokomotive

Zur Erklärung des Energieflusses in einer Lokomotive betrachten wir die Schnittzeichnung und das Blockschaltbild einer Umrichterlokomotive.

Oben: Energieverlauf bei der Fahrt eines Intercityzuges über die Gotthardstrecke. Die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt verbrauchten Energieanteile können aus der Figur als Differenz zwischen der oberen und der unteren Begrenzungslinie jeder Fläche herausgelesen werden. Die graue Fläche für die potentielle Energie hat die gleiche Form wie das Höhenprofil der Strecke (Zeichnung M. Meyer).

Unten: Spezifischer Fahrwiderstand (bezogen auf das Zuggewicht) bei der Fahrt des Intercityzuges durch den Gotthardtunnel. Die violette Kurve für den Gesamtwiderstand kann aus den Messdaten (Fahrmotorstrom, Geschwindigkeit, Zugmasse) bestimmt werden. Die schwarze Kurve für die Neigung ist der Streckendatenbank entnommen und über die Zuglänge gemittelt (Zeichnung M. Meyer).





Grösse und Abhängigkeiten der verschiedenen Fahrwiderstände. Üblich ist die Angabe von spezifischen, also auf das Zuggewicht bezogenen Werten. Der Beschleunigungsanteil des Fahrwiderstands muss noch mit dem Zuschlagsfaktor für die rotierenden Massen multipliziert werden (Zeichnung M. Aeberhard).

durch den Reibungsvorgang zwischen Rad und Schiene einem weiteren verlustbehafteten Prozess unterworfen ist. Bei sehr schlechten Adhäsionsverhältnissen kann kurzzeitig bis zu 10 % der mechanisch abgegebenen Leistung hier in Wärme verwandelt werden. Bei guten Schienenzuständen sind diese Verluste aber vernachlässigbar. Der Kontakt zwischen Stahlrad und Stahlschiene ist auf jeden Fall wesentlich günstiger als derjenige zwischen einem Pneurad und

Energiefluss in einer Lokomotive vom Typ Re 460. Die Flussrichtung ist gültig bei der Ausübung von Zugkraft (Zeichnung M. Meyer).

Die Traktionsenergie fliesst vom Stromabnehmer zum Rad und verursacht dabei in allen Komponenten Verluste:

- Transformator: Eisen- und Kupferverluste. Die Kupferverluste werden durch die Stromform und damit durch den Umrücker mit beeinflusst. Im Transformator wird auch die Energie für die Zugsammelschiene und die Hilfsbetriebe abgezweigt.
- Netzstromrichter: Bei der Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom entstehen Leit- und Schaltverluste in den Halbleiterbauelementen und in deren Beschaltungnetzwerken.
- Zwischenkreis: Hier dominieren die Kupferverluste in der Saugkreisdröselspule.
- Antriebsstromrichter: Umwandlung von Gleich- in Drehstrom, gewöhnlich aufgebaut aus gleichen Modulen wie der Netzstromrichter. Gleichartige Verluste wie dort, je nach Arbeitspunkt aber wegen der anderen Steuerung (frequenzvariabler statt netzfrequenter Wechselstrom) in völlig anderer Menge.
- Fahrmotor: Es entstehen sowohl elektrische Verluste (im Eisen und Kupfer, wiederum auch abhängig von der Stromform) als auch mechanische (in den Lagern sowie durch Luftreibung).
- Getriebe: Mechanische Verluste durch Reibung in Lagern und beim Zahneingriff sowie Strömungsverluste im Schmierstoff.

Zusätzlich entstehen in der Verkabelung der Lokomotive ebenfalls Kupferverluste. Die Rechenprogramme berücksichtigen weitere, hier nicht aufgeführte Verluste und Abhängigkeiten.

Am Radsatz endet die hier betrachtete Energieumwandlungskette. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die mechanische Energie, bevor sie Arbeit am Zug verrichten kann,

Asphalt oder Beton. Dies ist einer der wichtigsten Gründe für den massiv kleineren Energieverbrauch des Schienen- im Vergleich zum Strassenverkehr.

Die im Transformator abgezweigte Energie für die Hilfsbetriebe (Stromversorgung, Druckluftzerzeugung sowie Kühlmittelpumpen und Ventilatoren) muss in der Leistungsbilanz der Lokomotive ebenfalls als Verlust berücksichtigt werden, da sie nicht direkt der Traktion dient.

Bei Triebfahrzeugen, die mit einer Rekuperationsbremse ausgerüstet sind, fliesst die Energie beim elektrischen Bremsen in umgekehrter Richtung über dieselben Komponenten vom Rad zum Stromabnehmer. Da die Umwandlungsprozesse verlustbehaftet sind, ändert sich die Richtung der Verlustpfeile und des Hilfsbetriebeanteils nicht. Beim Befahren einer Strecke zunächst berg- und anschliessend wieder talwärts mit demselben Zug kann deshalb nie die gesamte Energie zurückgespeist werden.

Bei anderen als Umrückerlokomotiven sieht der Energiefluss grundsätzlich gleich aus, auch wenn jeweils je nach Bauart andere Komponenten daran beteiligt sind.

### Fachausdrücke und Definitionen

#### Leistung

Energieumsatz pro Zeiteinheit. Es gilt: Leistung = Kraft x Geschwindigkeit = Spannung x Strom

#### Energie

Es gilt: Energie = Leistung x Zeit = Kraft x Weg = Spannung x Strom x Zeit

#### Potentielle Energie

Lageenergie durch Anhebung einer Masse gegenüber dem Ausgangszustand

#### Kinetische Energie

Bewegungsenergie bei bewegten oder rotierenden Massen

#### Arbeit

Anderer Ausdruck für mechanische Energie

#### Verluste

Bei der Umwandlung zwischen verschiedenen Leistungs- oder Energieformen als Wärme anfallender, nicht nutzbarer Anteil

#### Nettoenergieverbrauch

Aufgenommene abzüglich zurückgespeiste Energie

#### Leistungswirkungsgrad

Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Leistung (gültig nur zu einem Zeitpunkt oder bei zeitunabhängigen Verhältnissen)

#### Energiewirkungsgrad

Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Energie (gültig über eine Zeitperiode auch bei variablen Verhältnissen)

### Leistungswirkungsgrad

Als Leistungswirkungsgrad wird bei der Ausübung von Zugkraft das Verhältnis der am Rad abgegebenen Leistung zu der am Stromabnehmer aufgenommenen Leistung bezeichnet, beim Bremsen das Verhältnis der am Stromabnehmer abgegebenen zu der am Rad aufgenommenen Leistung. Weil Energieumwandlungsprozesse immer verlustbehaftet sind, sind Wirkungsgrade immer kleiner als 1.

Üblicherweise wird der Leistungswirkungsgrad als Zahl für den Nennarbeitspunkt der Lokomotive angegeben. Er ist jedoch sehr stark vom Arbeitspunkt abhängig. In einer Graphik sind die Wirkungsgraddiagramme von fünf verschiedenen Lokomotiven zusammengestellt. Aus den „Höhenkurven“ ist für jeden Arbeitspunkt (Geschwindigkeit und Zug- oder Bremskraft) der dort gültige Wirkungsgrad ablesbar. Lokomotiven mit Widerstandsbremsen (wie die BLS Re 4/4) geben beim Bremsen keine Leistung ins Netz zurück; ihr Bremswirkungsgrad ist deshalb überall kleiner als Null. Die E 656 der Italienischen Staatsbahnen (FS) hat gar keine elektrische Bremse.

### Betrachtung eines Lastspiels

Aus den Wirkungsgraddiagrammen wird deutlich, dass sich der Leistungswirkungsgrad verkleinert, je schlechter die Lokomotive ausgenutzt ist. Dies ist plausibel, wenn man sich bewusst ist, dass verschiedene Verluste, wie die Leistungsaufnahme der Kühllölpumpe, gar nicht oder nur wenig von der momentanen Leistung abhängig sind.

Welchen Einfluss hat dies nun auf den Energieverbrauch? Wir betrachten dazu das Diagramm, in dem mit einem Farbcode dargestellt ist, in welchen Arbeitspunkten eine Lo-

komotive am häufigsten fährt. Der Darstellung liegt ein für schweizerische Verhältnisse typischer Mix verschiedener Zugförderungsarbeiten zugrunde. Er besteht aus insgesamt 2555 Kilometern verschiedener Berg- und Mittellandstrecken, die mit den unterschiedlichsten Zügen befahren werden. Das Diagramm ist auf eine Maximalleistung von 7 MW begrenzt. Es ist ersichtlich, dass der grösste Teil der Messfahrten mit einer Re 4/4

### 2555-Kilometer-Lastspiel für den Vergleich des Energieverbrauchs

| Zug <sup>1)</sup> | Last t             | Strecke                  | Distanz km | Leistung MW <sup>2)</sup> | Messfahrt mit      |
|-------------------|--------------------|--------------------------|------------|---------------------------|--------------------|
| IC                | 660                | Zürich – Genève-Aéroport | 285        | 2,08                      | Re 4/4 II          |
| IC                | 660                | Genève-Aéroport – Zürich | 285        | 1,97                      | Re 4/4 II          |
| IC                | 444                | Chiasso – Luzern         | 225        | 1,57                      | Re 4/4 II          |
| S                 | 290                | Zürich – Biel – Brig     | 365        | 1,40                      | Re 4/4 II          |
| S                 | 346                | Brig – Biel – Zürich     | 365        | 1,36                      | Re 4/4 II          |
| S                 | 350                | Zürich – Chur            | 116        | 1,41                      | Re 460             |
| S                 | 330                | Chur – Zürich            | 116        | 1,01                      | Re 460             |
| S                 | 615                | Bern – Interlaken Ost    | 61         | 1,60                      | Re 465             |
| S                 | 558                | Interlaken Ost – Bern    | 61         | 1,41                      | Re 465             |
| G                 | 1571 <sup>3)</sup> | Basel RB – Chiasso       | 310        | 1,50                      | Re 6/6 + Re 4/4 II |
| G                 | 870 <sup>3)</sup>  | Chiasso – Basel RB       | 310        | 1,01                      | Re 6/6 + Re 4/4 II |
| L                 | 0                  | Olten – Luzern           | 56         | 0,51                      | Re 6/6             |

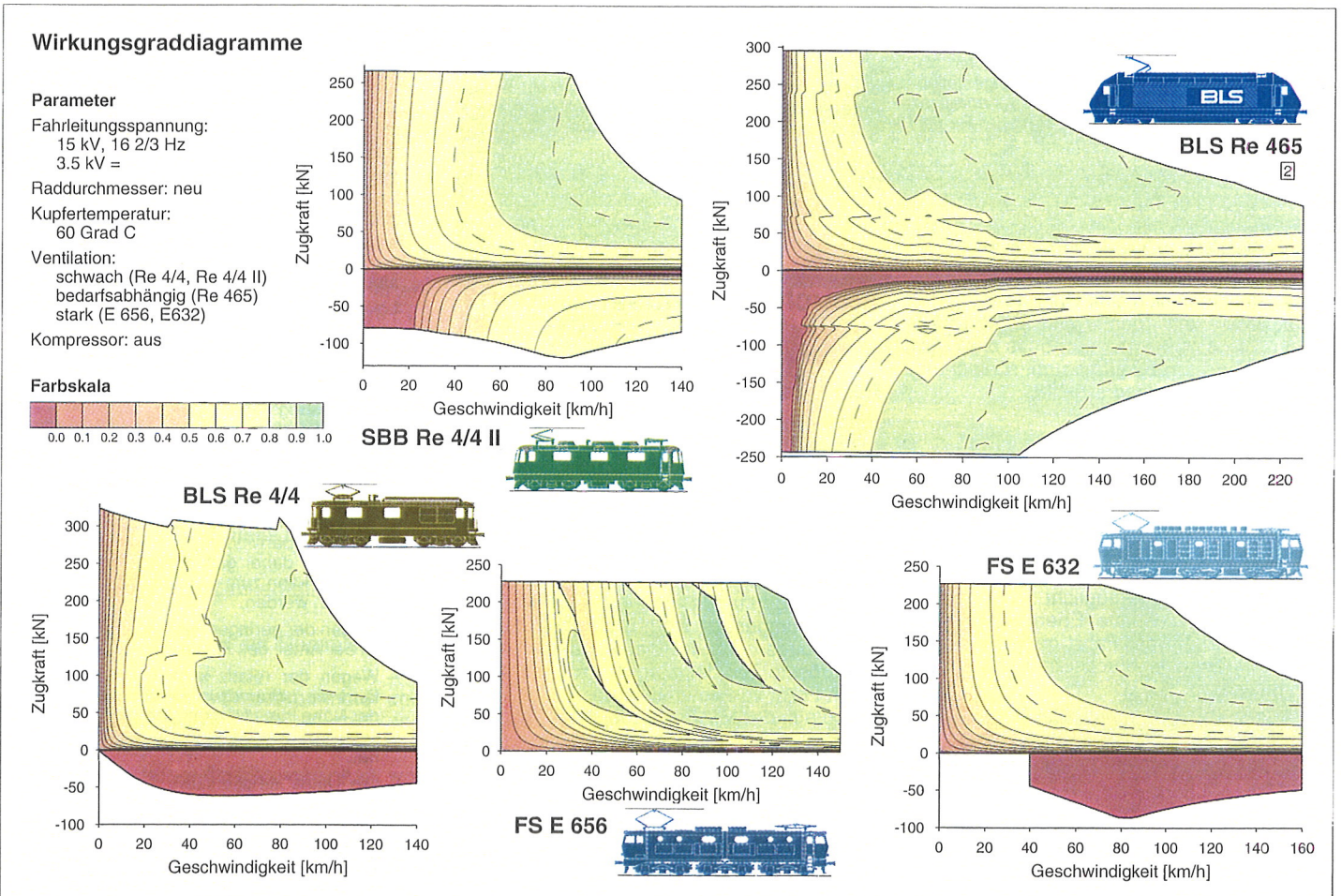
<sup>1)</sup> IC = Intercityzug, S = Schnellzug, G = Güterzug, L = Lokomotivzug

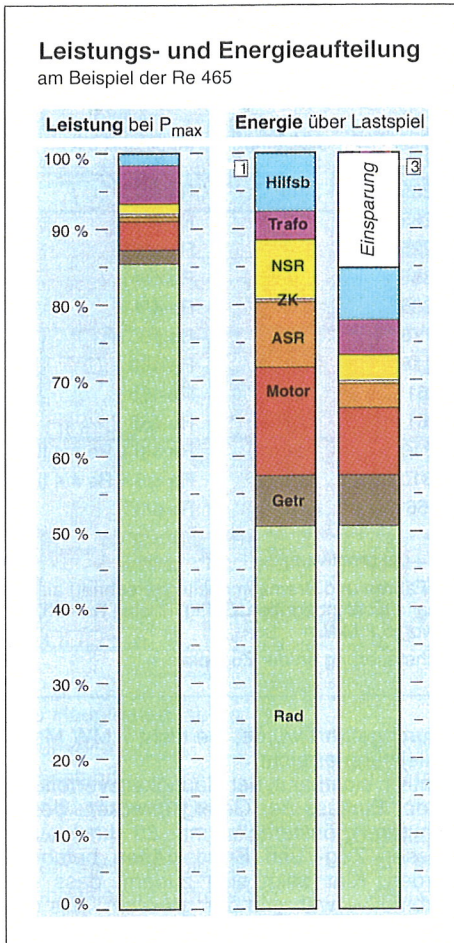
<sup>2)</sup> Mittelwert des Absolutwerts der Leistung am Rad (Fahren und Bremsen positiv gerechnet) als Mass für die Ausnützung der Lokomotive. Stationshalte nicht inbegriffen. Gültig für eine Re 460. Zum Vergleich: die Re 460 hat eine Dauerleistung von 5,2 MW.

<sup>3)</sup> Rechnung für eine von zwei Lokomotiven in Vielfachsteuerung an der Zugspitze.

komotive am häufigsten fährt. Der Darstellung liegt ein für schweizerische Verhältnisse typischer Mix verschiedener Zugförderungsarbeiten zugrunde. Er besteht aus insgesamt 2555 Kilometern verschiedener Berg- und Mittellandstrecken, die mit den unterschiedlichsten Zügen befahren werden. Das Diagramm ist auf eine Maximalleistung von 7 MW begrenzt. Es ist ersichtlich, dass der grösste Teil der Messfahrten mit einer Re 4/4

II durchgeführt wurde, die nicht 7 MW Maximalleistung erreicht. Deutlich sichtbar in der Häufigkeitsverteilung ist der Einfluss der Gebirgsstrecken, deren Rampen grösstenteils mit 80 km/h und grossen Zug- und Bremskräften befahren werden. Klar zeigt sich zudem, dass die Lokomotive während des grössten Teils der gefahrenen Kilometer wenig oder gar keine Leistung erbringt, da sie in der Ebene bei





Leistungsaufteilung der Re 465 im Punkt maximaler Leistung (links) und Energieaufteilung über das 2555-km-Lastspiel (Mitte und rechts). Gleicher Farbcode wie in der Zeichnung „Energiefluss“. Variante 1 ist die Ausgangslage (ohne Drehgestellabschaltung bei Teillast), Variante 3 das theoretisch mögliche Optimum durch Optimierung der Reglersollwerte (Zeichnung M. Meyer).

konstanter Geschwindigkeit nur den kleinen Laufwiderstand des Zuges überwinden muss. Stellt man sich eine Überlagerung des Häufigkeits- mit dem Wirkungsraddiagramm vor, so erkennt man, dass die Lokomotive sehr oft in Bereichen mit schlechtem Leistungswirkungsgrad arbeitet.

## Energiewirkungsgrad

Aus der Betrachtung der Häufigkeitsverteilung wird deutlich, dass der Leistungswirkungsgrad keine Rückschlüsse auf den Energieverbrauch für eine bestimmte Zugförderungsleistung ermöglicht. Aussagekräftig ist nur der gesamte Energieverbrauch, der entweder auf der Fahrt gemessen oder auf dem Computer durch Simulationen berechnet wird.

In Analogie zum Leistungswirkungsgrad kann man einen Energiewirkungsgrad definieren als das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Energie. Im Unterschied zum Leistungswirkungsgrad kann dieser nicht mehr als Kennwert oder Kennfeld für einen bestimmten Lokomotivtyp angegeben werden. Vielmehr ist der Energiewirkungsgrad eine Zahl, die nur für eine Kombination

von Lokomotivtyp und Zugförderungsleistung Gültigkeit hat. Die Unterschiede werden aus dem Säulendiagramm mit der Leistungs- und Energieaufteilung der Re 465 deutlich: Die linke Säule stellt die Leistungsaufteilung im Punkt maximaler Leistung dar. Die mittlere und die rechte Säule zeigen dagegen die Energieaufteilung über das 2555-km-Lastspiel. Wie erwartet liegt das Verhältnis zwischen abgegebener und aufgenommener Energie wesentlich ungünstiger. Im Gegensatz zur Leistungsaufteilung machen diese Säulen Aussagen zum Energieverbrauch, gelten aber nur für das untersuchte Lastspiel. Die rechte Säule zeigt gegenüber der mittleren die Energieeinsparung, die durch eine Optimierung der Reglersoftware, wie sie später vorgestellt wird, möglich ist. Die Re 465 wird dabei als Beispiel verwendet, da ihre Bauweise mit GTO-Umrichtern in Zweipunktschaltung [4] heute europaweit als Standardlösung gilt.

Nicht enthalten in diesem Diagramm ist die Energie, die bei schlechten Schienenzuständen durch den Schlupf zwischen Rad und Schiene in Wärme umgewandelt wird. Bisher gibt es keine zuverlässigen Betriebsmessdaten dazu. Untersuchungen in dieser Richtung sind jedoch zur Zeit im Gang.

## Was kostet nun die Energie?

Der hohe Anteil der Verluste am Energieverbrauch lässt sofort die Frage nach den Kosten dafür aufkommen. In einem Kasten sind für eine Umrichterlokomotive, die mit der Re 465 baugleich ist, die aus dem 2555-km-Lastspiel abgeleiteten Energieverbrauchskosten zusammengefasst. Müsste der Betreiber gleichzeitig mit der Inbetriebnahme der Lokomotive alle Energie bezahlen, die sie während ihrer Lebensdauer verbraucht, so würde der Preis dafür annähernd gleich viel wie der Anschaffungspreis betragen! Es ist deshalb angebracht, nach Möglichkeiten zur Senkung des Energieverbrauchs zu suchen, nicht nur auf dem Triebfahrzeug, sondern am ganzen Zug.

## Wie kann der Energieverbrauch beeinflusst werden?

### Massnahmen am Zug

#### Reduktion der Masse

Eine Reduktion der Masse wirkt sich in jedem Fall positiv aus, führt aber in den meisten Fällen auch zu höheren Kosten (leichtere Materialien mit denselben Festigkeitseigenschaften sind in der Regel teurer). Für den Energieverbrauch ist eine Massenreduktion vor allem bei solchen Anwendungen von Bedeutung, bei denen viel Energie mit einer Widerstands- oder Rekuperationsbremse umgesetzt wird. Dies gilt vor allem für Gebirgs- und Nahverkehrsbahnen, wo der grösste Teil der aufgenommenen Energie in Form von potentieller oder kinetischer Energie in der Masse gespeichert wird. Weil nie alle Energie zurückgespeist werden kann, leistet jede Massenreduktion einen wertvollen Beitrag zur Senkung des Verbrauchs. Dagegen haben die intensiven Bemühungen um Massenreduktion bei den Hochgeschwindigkeitszügen wenig mit dem Energieverbrauch zu tun. Eine geringe Masse dient hier der Verbesserung des Be-

## Kosten für Energieverbrauch

### Lokomotive

Re 465 in Variante 1 (Variante 3)

### Annahmen

- 2555 Kilometer gemäss definiertem Lastspiel
- 26 800 (22 800) kWh für dieses Lastspiel
- Energiepreis 0,15 SFr./kWh
- Zinssatz 5 %
- Laufleistung 200 000 km/Jahr
- Lebensdauer 30 Jahre Vollbetrieb

### Resultierende Energiekosten

- 315 000 (267 000) SFr./Jahr und Lokomotive
- 5,0 (4,25) Millionen SFr./Lebenszyklus (kapitalisiert)

schleunigungsverhaltens und vor allem der Schonung des Oberbaus.

Zahlen zur Senkung des Energieverbrauchs durch die Reduktion der Masse werden anhand von konkreten Beispielen später genannt.

### Reduktion des Luftwiderstandes

Wegen des quadratischen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Luftwiderstand bringt diese Massnahme umso mehr, je schneller gefahren wird. Der Luftwiderstand kann durch die folgenden Massnahmen reduziert werden:

- kleiner Fahrzeugquerschnitt,
- günstige Kopfform (die Gestaltung der Kopfform wird heute allerdings stärker durch die Reduktion der seitlichen Druckwelle bestimmt),

## Rekuperationsbremsung bei Bergbahnen

Die höchste relative Energierückspeisung ergibt sich bei Bergbahnen, wie die Daten der folgenden Messfahrt auf der Wengernalpbahn (WAB) zeigen:

|  |               |
|--|---------------|
| Lokomotive   | He 2/2 Nr. 31 |
| Vorstellast  | 20 t          |
| Verbrauch Lauterbrunnen                              |               |
| – Kleine Scheidegg                                   | 152 kWh       |
| Rückspeisung Kleine Scheidegg – Lauterbrunnen        | 97 kWh (64 %) |
| Folgende Faktoren ermöglichen das günstige Resultat: |               |

- Bei der Zahnradbahn dient die am Zug verrichtete Leistung zu einem grossen Teil der Überwindung der Hangabtriebskraft; die dabei gespeicherte potentielle Energie kann zum grossen Teil zurückgewonnen werden.
- Wegen der geringen Fahrgeschwindigkeit ist der Anteil des Fahrwiderstands klein.
- Wegen der relativ konstanten Steigung fährt die Lokomotive praktisch immer in der Nähe ihres Nennpunkts, also dort, wo sie einen besonders guten Wirkungsgrad hat.
- Die Umrichterlokomotive hat auch beim Bremsen einen sehr guten Wirkungsgrad.
- Bei der WAB gestattet es das rückspeisefähige Unterwerk Wengen, stets die volle Bremsleistung zu rekuperieren.

- Reduktion der Anzahl Drehgestelle pro Zug,
- möglichst glatte Aussenkontur, die die Entstehung von wirbelförmigen Luftbewegungen reduziert oder verhindert.

### Reduktion des Rollwiderstandes

Die Reibung in den vielen Lagern eines Zuges beeinflusst seinen Laufwiderstand. Bei geringen Geschwindigkeiten ist der Anteil des Rollwiderstandes die dominierende Komponente des Laufwiderstandes, mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nimmt dieser Anteil im Vergleich zum Luftwiderstand ab. Die bedeutendste Reduktion des Rollwiderstandes ist bei den europäischen Bahnen dank der Umstellung von Gleit- auf Wälzlager seit Jahren realisiert. Ein gewisses Potential besteht nach wie vor bei Triebzügen: Durch intelligente Fahrzeugkonzepte und angepasste Fahrwerke lässt sich die Anzahl der benötigten Lagerstellen minimieren.

### Massnahmen zur maximalen Ausnutzung der Rekuperationsbremse

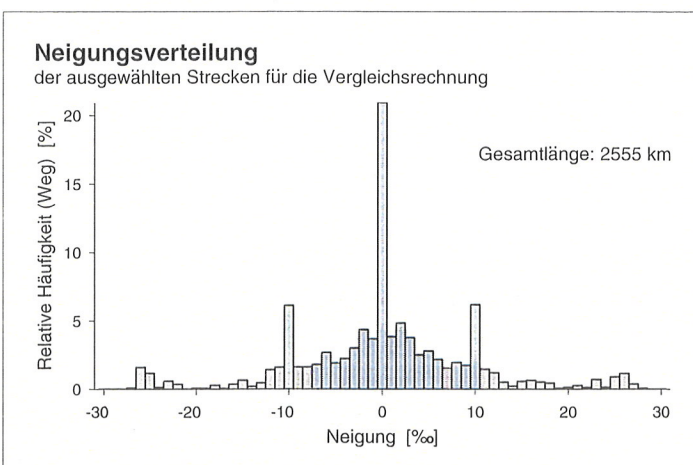
In vielen Fällen ist heute die in den Triebfahrzeugen installierte Rekuperationsbremsleistung nicht voll ausnutzbar, weil die maximalen Pufferkräfte aus Sicherheitsgründen begrenzt sind [5]. Bei Fahrzeugen mit konventionellen Zug- und Stossvorrichtungen kann dieses Problem konstruktiv nur in engen Grenzen beeinflusst werden. Hier können also nur betriebliche Massnahmen wie Einreichungsvorschriften zu einer Erhöhung der zulässigen Grenzwerte führen. Bei geschlossenen Triebzügen ist aber bereits durch die Konstruktion eine uneingeschränkte Rekuperationsbremsung anzustreben, durch eine zweckmässige Gestaltung der Kraftübertragungselemente zwischen den Fahrzeugen und durch eine geeignete Anordnung der Triebbradsätze im Zug.

### Massnahmen am Triebfahrzeug

In der Leistungsübertragungskette des Triebfahrzeugs gibt es eine grosse Anzahl von

Unten: Neigungsverteilung der im 2555-km-Lastspiel enthaltenen Strecken (Zeichnung M. Meyer).

Rechts: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Arbeitspunkte über das 2555-km-Lastspiel. Je heller eine Facette dargestellt ist, desto häufiger fährt die Lokomotive mit Geschwindigkeits- und Zugkraftwerten in diesem Bereich (Zeichnung M. Meyer).



Möglichkeiten, das Energieverhalten zu beeinflussen. Die folgenden Punkte sind wiederum speziell für eine Umrichterlokomotive formuliert, gelten grundsätzlich aber auch für andere Bauarten.

### Reduktion der Kupferverluste

Im Transformator und in den Fahrmotoren entsteht ein namhafter Anteil ohmscher Verluste in den Kupferwicklungen. Durch eine Vergrösserung des Kupferquerschnitts können diese Verluste stark verkleinert werden, wobei natürlich gleichzeitig die Masse und das Volumen steigen. Es gilt also, einen Kompromiss zu finden zwischen Verlustreduktion, Gewicht und Kosten.

Wie später anhand eines Beispiels gezeigt wird, wäre unter rein energetischen Gesichtspunkten in den meisten Fällen eine schwere Lokomotive mit geringen Kupferverlusten zu bevorzugen. Ein Apparat mit hohen Kupferverlusten verbraucht zudem nicht nur selbst viel Energie, sondern benötigt zum Abführen der Verluste zusätzliche Hilfsenergie. Da die zulässigen Achslasten und auch der Einbauraum begrenzt sind, ist hier der konstruktive Spielraum stark eingeschränkt.

Zu beachten ist auch, dass der Widerstand und somit die Verluste des Kupfers mit zunehmender Temperatur grösser werden. Eine verbesserte Kühlung bringt also eine Reduktion der Verluste in den zu kühlenden Komponenten, muss aber mit mehr Verlusten für die Kühlung selbst erkaufte werden. Grenzen sind durch den Lärm, die Verschmutzung und die Unmöglichkeit eines Kühlsystems, vorausschauend zu kühlen, gesetzt. Alle Komponenten müssen zu jedem Zeitpunkt so stark gekühlt werden, dass eine anschliessende längere Vollastfahrt zu keiner Überhitzung führt.

### Reduktion der Leitverluste im Stromrichter

Die Leitverluste im Stromrichter können grundsätzlich auf zwei Arten beeinflusst werden:

- Durch die physikalischen Eigenschaften der Leistungshalbleiter. Der Fahrzeugbauer hat darauf in der Regel keinen Einfluss.

– Durch den Aufbau der Hauptstromschaltung. Dies definiert die Anzahl gleichzeitig stromdurchflossener Ventile. Hier sind jedoch meistens andere Kriterien wie die Netzspannung, die maximale Leistung, das Volumen, das Gewicht und der Preis ausschlaggebend. Zudem können die Leit- und die Schaltverluste im Stromrichter nicht unabhängig voneinander beeinflusst werden.

### Reduktion der Schaltverluste im Stromrichter

Die Schaltverluste im Stromrichter sind hauptsächlich abhängig von vier Parametern:

- dem Verlustverhalten des Leistungshalbleiters,
- der Art des Beschaltungsnetzwerks,
- der Spannung am Halbleiter (und somit der Zwischenkreisspannung) sowie
- der Schaltfrequenz.

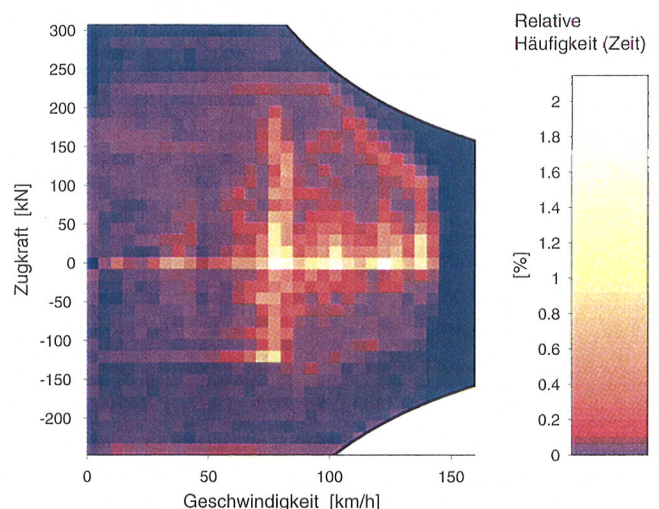
Nur die Spannung und die Schaltfrequenz sind dem Fahrzeugbauer zugänglich, können aber in weiten Bereichen variiert werden. Allerdings kann auch hier der Aspekt des Energieverbrauchs zunächst nicht im Vordergrund stehen. Die maximal auftretende Spannung wird durch die Leistungsanforderung der Lokomotive bestimmt und muss auf die Auslegung der Hauptstromschaltung abgestimmt sein. Je tiefer die Schaltfrequenz ist, desto kleiner werden die Verluste, desto grösser sind aber auch die Stromberschwingungen. Auf der Netzseite ist der zulässige Oberschwingungsgehalt vor allem wegen der Rückwirkungen auf Signal- und Telekommunikationsanlagen begrenzt [6]. Ausserdem führen die Oberschwingungsströme, die selber nichts zur Übertragung von Wirkleistung beitragen, zu zusätzlichen Kupferverlusten im Transformator und in den Fahrmotoren.

### Art der Hauptstromschaltung

Die Auslegung und Optimierung eines neuen Fahrzeugs ist wegen dieser vielen Abhängigkeiten sehr anspruchsvoll. Im Hinblick auf den Energieverbrauch besteht ein ausge-

### Häufigkeitsverteilung der Arbeitspunkte

über das für die Vergleichsrechnung verwendete 2555 km-Lastspiel



prägender Zusammenhang zwischen der Auslegung der Hauptstromschaltung einerseits und der Zwischenkreisspannung und Taktfrequenz andererseits. Mit zunehmender Anzahl Stromrichterzweige steigen die Verluste nicht zwangsläufig an. Eine Re 465 mit vier statt drei Netzstromrichterkreisen pro Drehgestell würde bei geeigneter Strom- und Spannungsauslegung einen geringeren Energieverbrauch erzielen. Wegen der höheren Baukosten dürfte dieses Vorgehen allerdings nur in Spezialfällen zu rechtfertigen sein, beispielsweise wenn gleichzeitig erhöhte Anforderungen bei den Netzstörströmen gelten.

Besonders vorteilhaft in energetischer Hinsicht sind Stromrichter in Dreipunktschaltung. Sie ermöglichen bei der Re 460 gegenüber der Zweipunktschaltung der Re 465 kleinere Spannungen an den Halbleitern, und dank besserer Annäherung der Spannung an die Sinusform der Netzspannung kommen sie mit einer tieferen Taktfrequenz aus [7]. Dank dieser Umstände erreicht die Re 460 auch ohne Optimierungsmassnahmen auf der Softwareseite beim Energieverbrauch im Vergleich mit anderen Umrichterfahrzeugen Bestwerte.

#### Drehgestellabschaltung bei Teillast

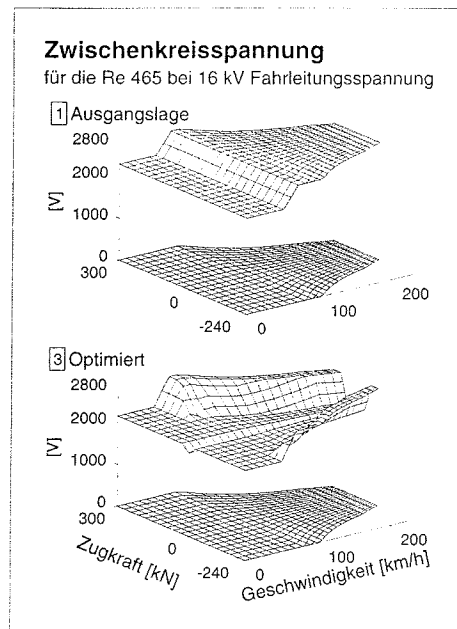
Wie oben gezeigt, liegt die Problematik des Energieverbrauchs vor allem im Bereich der Teillast. Dieser Sachverhalt wurde bereits vor längerer Zeit von der BLS Lötschbergbahn vermutet und durch Messungen bestätigt [8]. Eine naheliegende Verbesserungsmöglichkeit liegt in der Ausnützung der Tatsache, dass die Leistungsübertragung bei modernen Lokomotiven fast immer auf nahezu unabhängige Antriebsketten für jedes Drehgestell aufgeteilt ist. Wird bei geringer Zugkraftanforderung die Zugkraft von einem einzigen Drehgestell aufgebracht, während das andere – elektrisch gesehen – leer mitläuft, lässt sich der Teillastwirkungsgrad verbessern. Die Abschaltung eines Drehgestells bei Teillast ist auf der Re 465 der BLS realisiert [4].

#### Optimierte Reglersollwerte

Ist eine Lokomotive im Nennpunkt definiert, so kann ihr Energieverbrauch durch Massnahmen auf der Softwareseite weiter beeinflusst werden. Insbesondere die sinnvolle Vorgabe aller Sollwerte in der Stromrichterregelung ist dabei von Interesse. Die folgenden Grössen kommen dafür in Betracht:

- die Zwischenkreisspannung,
- der magnetische Fluss im Motor,
- die Taktfrequenzen im Netz- und Antriebsstromrichter und
- die Pulsmusterform im Antriebsstromrichter.

Alle Werte müssen gleichzeitig und für jeden Arbeitspunkt der Lokomotive optimiert werden. Als Beispiel für die entstehenden Resultate ist in einer Graphik die Vorgabe der Zwischenkreisspannung der Re 465 in zwei Varianten dargestellt. Die Reduktion der Zwischenkreisspannung im Bereich kleinerer Leistungen führt zu einem markanten Rückgang des Energieverbrauchs, da praktisch alle vom Umrichter verursachten konstanten Verluste (Verluste in der Beschaltung, Verzerrungsstromverluste im Transformator und den Motoren) quadratisch von ihr abhängig sind.



Zwei Varianten der Sollwertvorgabe für die Zwischenkreisspannung auf der Re 465. Oben (Variante 1): Ausgangslage, unten (Variante 3): theoretisch mögliches Optimum. Der heutige Zustand der Re 465 liegt zwischen beiden Varianten (Zeichnung M. Meyer).

Durch Softwaremassnahmen lassen sich beachtliche Energieeinsparungen erzielen, wie die Graphiken „Leistungs- und Energieaufteilung“ und „Energieverbrauch im Vergleich“ zeigen. Softwaremassnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs sind besonders at-

#### Energiererechnungsprogramme

Vergleichende Untersuchungen zum Energieverbrauch von Lokomotiven können mit vertretbarem Aufwand nur mit Rechenprogrammen durchgeführt werden. Messfahrten sind dann nur nötig zum Abgleich der Programme und zur abschliessenden Überprüfung getroffener Sparmassnahmen.

Alle in diesem Beitrag vorgestellten Resultate sind durch Rechnung mit gleich aufgebauten Programmen entstanden. Als Eingabedaten dienen gemessene Geschwindigkeits- und Zugkraftverläufe. Bei der Neuprojektierung von Triebfahrzeugen können diese Daten aus einer Zuglaufrechnung übernommen werden. Dadurch wird die Vorhersage des Verbrauchs und der Auswirkung von verschiedenen Dimensionierungs- und Regelungsarten möglich.

Die Programme arbeiten wie folgt: Ausgehend von der Zugkraft am Rad können bis hinauf zum Stromabnehmer alle Verluste für jeden momentanen Arbeitspunkt berechnet und aufsummiert werden. Aussagekräftige Resultate ergeben sich nur, wenn die Verluste detailliert aufgeschlüsselt werden. In einem Asynchronmotor müssen zum Beispiel die Verzerrungsstromverluste von den übrigen Verlusten getrennt betrachtet werden, da sie nicht von der Zugkraft, dafür aber von der Zwischenkreisspannung, Taktfrequenz und Taktungsart des Umrichters abhängen. Damit die Rechenzeit klein bleibt, wird die Energierrechnung für eine Fahrt im Sekundenabstand durchgeführt. Schnellere Vorgänge, wie die Schaltvorgänge im Umrichter, müssen zuerst für alle Arbeitspunkte der Lokomotive separat gerechnet und dann durch entsprechende Abhängigkeiten im Hauptprogramm berücksichtigt werden.

traktiv, weil sie für eine Baureihe nur einmal durchgeführt werden müssen und auch nach der Fertigstellung des Fahrzeugs noch vervollständigt werden können.

#### Rekuperationsbremse

Eine der wirksamsten Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs ist die Anwendung einer Rekuperationsbremse, die beim Bremsen Energie ins Netz zurückspeist. Solche Bremsenschaltungen werden schon seit Jahrzehnten eingesetzt und wurden im Laufe der Zeit immer weiter perfektioniert. Den letzten Entwicklungsschub hat hier die Umrichtertechnik gebracht. Erst diese Technik ermöglicht es, Fahrzeuge zu bauen, deren Rekuperationsbremsvermögen gleich gross ist wie das Traktionsvermögen, und dies bei einem sehr hohen Leistungsfaktor und Wirkungsgrad [5].

Die Wirkungsweise der Rekuperationsbremse wird aus dem Energieverlauf des Intercityzuges am Gotthard ersichtlich. Dank der Rückgabe von Bremsenergie an das Netz nimmt der Nettoenergiebezug während der ganzen Talfahrt über die Gotthard-Nordrampe kontinuierlich ab. Ohne Rekuperationsbremse würde die Abnahme der potentiellen Energie zu einer Zunahme der in den mechanischen Bremsen (oder in eventuell vorhandenen Bremswiderständen) in Wärme umgesetzten Energiemenge führen.

Bei der Bewertung des Energieverbrauchs einer Lokomotive ist einem Punkt besondere Beachtung zu schenken: Eine Rekuperationsbremse senkt den Nettoenergieverbrauch deutlich und ist deshalb energiewirtschaftlich von grosser Bedeutung. Betrachtet man aber den Energieverlauf des Intercityzuges am Gotthard, und hier insbesondere den Abschnitt von Göschenen nach Erstfeld, so wird deutlich, dass während der Talfahrt die Lokomotivverluste (die Höhe der gelben Fläche) im Verhältnis zum Gesamtverbrauch stark ansteigen. Der Energiewirkungsgrad sinkt also durch die Anwendung der Rekuperationsbremse, auf diesem Abschnitt von 80 auf etwa 58 %. Dies zeigt auf, wie vorsichtig bei der Interpretation von Wirkungsgradzahlen vorgegangen werden muss!

#### Weitere Verluste im System

##### Fahrleitung und Unterwerke

Die bisher durchgeführten Betrachtungen waren auf das Triebfahrzeug und den Zug beschränkt. Die elektrische Energie, die den Fahrzeugen über die Fahrleitung zugeführt wird, verursacht auch dort Verluste. Eine Energieverbrauchsanalyse darf deshalb nicht erst am Stromabnehmer des Zuges beginnen. So wie der Energieverbrauch für eine Zugfahrt nur für eine genau bestimmte Lokomotive berechnet werden kann, müssen für eine genaue Ermittlung der Fahrleitungs- und Unterwerksverluste die Fahrleitungs- und Unterwerksstandorte und der momentane Ort des Zuges bekannt sein. Dies ist für einen einzigen Zug leicht machbar, doch ergibt sich im Hinblick auf vergleichende Untersuchungen ein Problem: Bei Vollbahnen verkehren in der Regel mehrere Züge im gleichen Speiseabschnitt. Da die Verluste in der Fahrleitung proportional zum Quadrat des darin fliessenden Stroms sind (vierfache Verluste bei doppelter Anzahl Zü-

ge), hängen die Gesamtverluste von der gleichzeitig verkehrenden Anzahl Züge ab. Eine Aufteilung der Fahrleitungsverluste auf jeden einzelnen Verursacher kann deshalb nicht eindeutig definiert werden. Bei der Berechnung der in den Graphiken dargestellten Resultate wurde ein einfacher Modellansatz verwendet, bei dem Strommittelwerte für eine vorgegebene Anzahl fremder Züge berücksichtigt werden.

Die dargestellte Problematik erschwert nicht nur die Berechnung der Fahrleitungsverluste, sie zeigt auch auf, nach welchen Kriterien das Fahrleitungsnetz einer Bahn dimensioniert werden muss. Wie in jeder elektrischen Anlage sind auch hier die maximalen Verluste durch die zulässigen Kupfertemperaturen begrenzt. Auf Bahnlinien mit starkem Verkehr dürfen die Verluste deshalb nicht einfach entsprechend ansteigen, sondern die Stromversorgung muss bei wachsendem Verkehr ausgebaut werden. Dies geschieht zunächst bei einem Doppelspurausbau auf natürliche Art durch den Fahrdrakt des zweiten Gleises, sodann durch das Spannen von parallelen Verstärkungsleitungen. Sind diese Massnahmen ausgeschöpft, muss der Unterwerksabstand verkleinert werden.

Wie die Graphik mit den Vergleichsresultaten für verschiedene Lokomotivtypen zeigt, sind die Fahrleitungsverluste im Verhältnis zu den Verlusten auf der Lokomotive klein. Unterschiede bestehen jedoch zwischen verschiedenen Lokomotivbauarten. Werden die von einem Zug verursachten Fahrleitungsverluste reduziert (beispielsweise bei Umrichterlokomotiven durch den Wegfall des Blindleistungsbezugs), so dient dies nicht in erster Linie dem Energiesparen. Der Hauptvorteil liegt bei den geringeren Investitionen, die bei den Fahrleitungen und Unterwerken vorgenommen werden müssen [6].

Es ist denkbar, dass erweiterte Betriebssysteme in Zukunft die Züge auch unter dem Gesichtspunkt der Belastung des Versorgungsnetzes führen werden. Dies ermöglicht dann die Vermeidung kurzfristiger Spitzenbelastungen und damit auch Einsparungen beim notwendigen Ausbaustandard von Kraftwerken, Unterwerken und Fahrleitungsanlagen.

## Zugheizung und -klimatisierung

Bei Reisezügen wird ein Teil der aus der Fahrleitung aufgenommenen Energie über die Zugsammelschiene an die Wagen abgegeben. Sie wird dort vor allem zur Raumheizung und -klimatisierung verwendet. Durch eine gute Isolation der Wagen und eine geeignete Temperaturregelung kann hier der Energieverbrauch reduziert werden.

Auf Wechselstromtriebfahrzeugen verursacht die Energieabgabe an die Zugsammel-

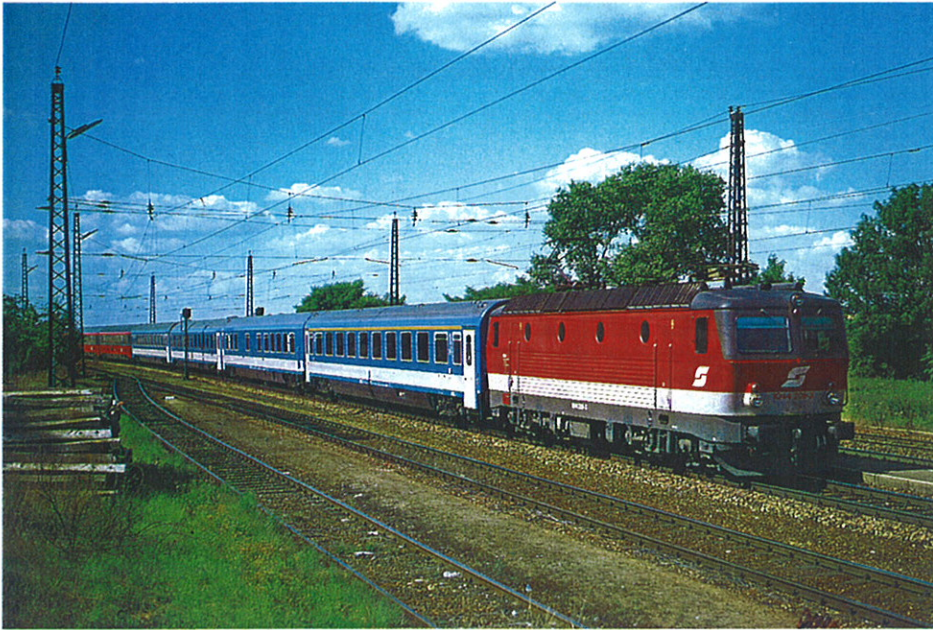
### Vergleichslokomotiven:

Oben: Re 4/4 II der SBB mit Stufenschalter und Rekuperationsbremse bei Rohr-Buchs (Foto E. Suter, 20.7.1990).

Mitte: Re 6/6 der SBB, ebenfalls mit Stufenschalter und Rekuperationsbremse (Foto M. Senn).

Unten: Re 4/4 der BLS mit Stufenschalter, Diodengleichrichter und Wellenstrommotoren sowie Widerstandsbremse bei Frutigen (Foto F. Suter, 15.7.1989).





schiene Verluste im Transformator. Diese Verluste sind gesamthaft gesehen klein und kaum von der Bauart der Lokomotive abhängig. Für die in diesem Beitrag vorgestellten Resultate wurde die Zugsammelschiene deshalb als ausgeschaltet angenommen.

## Technische und betriebliche Entwicklung

### Von der Stufenschalter- zur Umrichterlokomotive

Durch die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) in Zürich wurde, gemeinsam mit den Bahnverwaltungen, der Industrie und teilweise unter Einbezug von Semesterarbeiten [9, 10], eine detaillierte Energieverbrauchsanalyse für diverse Hochleistungslokomotiven erstellt. Die untersuchten Lokomotiven und ihre wichtigsten Kenndaten sind in einem Kasten dargestellt. Die Re 462 ist eine Zweisystemlokomotive, die rein rechnerisch aus der Re 460 der SBB abgeleitet ist. Ihr Zwischenkreis wird über eine Eingangsfilters-Drosselspule direkt aus der Fahrleitung gespeist. In der Energievergleichsrechnung wird sie nur im Gleichstrombetrieb untersucht. Bei Wechselstrombetrieb entspricht sie der Re 460.

Alle Ergebnisse wurden mit Energierochprogrammen erzeugt und basieren auf dem gleichen, bereits erwähnten 2555-km-Lastspiel. Für alle Lokomotiven wurde der Geschwindigkeits- und Zugkraftverlauf am Rad identisch vorgegeben. Damit die maximal zulässigen Fahrmotorströme der E 632 und E 656 nicht nennenswert überschritten werden, ist dort der Raddurchmesser entsprechend dem zulässigen Minimum angenommen.

Die Resultate der Vergleichsrechnung können einer Graphik entnommen werden.

### Einfluss der Lokomotivtechnologie

Zunächst unerwartet ist die Tatsache, dass die meisten Wechselstromlokomotiven ohne Verwendung der elektrischen Bremse (Variante 0) nahezu gleich viel Energie benötigen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass beim verfügbaren Einbauvolumen und -gewicht für die elektrische Ausrüstung ein Mindestmass an Verlusten nicht unterschritten werden kann. Bei den beiden Lokomotiven mit höherem Energieverbrauch (Re 6/6, Re 465) ist dies nicht auf die verwendete Technologie, sondern auf andere Faktoren zurückzuführen, wie später gezeigt wird.

Auch die Gleichstromlokomotiven weisen sehr ähnliche Werte auf, sowohl untereinander als auch im Vergleich mit den Wechselstromlokomotiven. Selbst die E 656 mit An-

Oben: Gleichrichter-Lokomotive 1044.209 der ÖBB mit Anchnitt-Steuerung und Widerstandsbremse in Böhheimkirchen (Foto K. Feuerfeil, 22.7.1996).

Mitte: Die Re 460 der SBB, eine der energiespar-samsten Lokomotiven überhaupt. Re 460 107 mit Intercityzug Genève – St. Gallen bei Winterthur Grütze am 7.5.1996 (Foto H. Sommer).

Unten: Umrichter-Lokomotive Re 465 der BLS vor einer Re 460 der SBB in Kandersteg (Foto U. Jossi, 28.6.1995).

fahrwiderständen verbraucht nur etwa 5 % mehr als die E 632 mit einem Gleichstromsteller. Dies ist der vierstufig umgruppierbaren Motorschaltung der E 656 und ihrem Maximalwirkungsgrad, dem höchsten aller hier untersuchten Lokomotiven, zu verdanken.

### **Einfluss der elektrischen Bremse**

Den grössten Einfluss auf den Energieverbrauch hat die Art der elektrischen Bremse. Durch eine Rekuperationsbremse kann der Nettoenergieverbrauch deutlich gesenkt werden. Zwischen verschiedenen Bauarten der Rekuperationsbremse bestehen jedoch Unterschiede: Einerseits steigt die Einsparung mit zunehmender maximaler Bremskraft (240 kN bei der Re 460 gegenüber 140 kN bei der Re 4/4 II). Dies zeigt sich in der Figur durch die Verkürzung des dunkelroten Balkens, der die mechanische Bremsarbeit darstellt. Andererseits weist die Re 4/4 II mit den Zusatzapparaten der Bremsschaltung (Bremsdrosselspule, Dämpfungswiderstände) gegenüber der Re 460 beim Bremsen einen tieferen Wirkungsgrad auf (etwa 0,7 statt 0,85). Deshalb sind auch die gelben Balken für die Lokomotivverluste bei der Re 4/4 II grösser als bei der Re 460 (beide in Variante 1).

Bei der Re 4/4 der BLS, der Reihe 1044 der ÖBB und der E 632 der FS wird die mechanische Bremsarbeit dank der elektrischen Widerstandsbremse ebenfalls deutlich reduziert. Die Energieaufnahme am Stromabnehmer steigt aber sogar leicht an, da die Erregerleistung bei diesen fremderregten Bremsen aus dem Netz bezogen wird.

Bei Gleichstrombahnen ist eine Energierückspeisung nur dann möglich, wenn im gleichen Speiseabschnitt wie das bremsende Fahrzeug andere Triebfahrzeuge gleichzeitig Energie aufnehmen, oder wenn die Gleichrichterstationen ebenfalls rückspeisefähig sind. Beides ist heute nicht bei allen Bahnen erfüllt. In diesem Sinne sind auch die dargestellten Werte für die Re 462 als das erreichbare Optimum zu betrachten. Massnahmen am Fahrleitungsnetz, wie grössere Fahrleitungsquerschnitte oder eine Vermaschung der Speiseabschnitte, führen häufig zu deutlichen Energieeinsparungen [11].

### **Einfluss der konstanten Verluste**

Die grundsätzlichen Betrachtungen zu Leistungs- und Energiewirkungsgrad zeigen, dass die konstanten, von der momentanen Zugkraft oder Leistung unabhängigen Verluste den Energieverbrauch einer Lokomotive sehr stark beeinflussen. Dazu gehören, wie oben beschrieben, die Verzerrungsstromverluste und die Schaltverluste im Umrichter. Dies führt zum Unterschied zwischen der Re 460 (mit Dreipunktschaltung) und der Re 465 (mit Zweipunktschaltung). Beide Lokomotiven weisen annähernd den gleichen Leistungswirkungsgrad im Nennpunkt auf, doch teilen sich die Verluste anders in konstante und variable Anteile auf.

Durch eine geeignete Vorgabe der Reglersollwerte lässt sich der Verbrauch der Umrichterlokomotiven sowohl in der Zwei- als auch in der Dreipunktschaltung senken. Die grossen Unterschiede verschwinden dabei. Die optimierten Varianten (Nummer 2 der Re 460 und 3 der Re 465) entsprechen dabei dem theoretisch möglichen Optimum. Ein nennenswerter Teil der Sparmassnahmen ist

auf der Re 465 heute bereits realisiert, ihr Verbrauch liegt zwischen den angegebenen Werten für die Varianten 2 und 3.

Wie sich der Energieverbrauch einer Lokomotive durch die Reduktion der konstanten Verluste wirkungsvoll senken lässt, zeigt auch das Beispiel der optimierten Ventilationssteuerung bei den Re 6/6 und Re 4/4 II der SBB sowie der Re 4/4 der BLS. Durch die Anwendung der Ventilationsstufe „schwach“ statt „stark“ bei kleiner Erwärmung der Fahrmotoren vermindert sich der Nettoenergieverbrauch der Lokomotive um rund 3 % [12].

### **Einfluss der Achszahl sowie der Lokomotiv- und Zugmasse**

Sechssachsige Lokomotiven haben den Ruf, wegen ihrer grösseren Masse mehr Energie als vierachsige zu verbrauchen. Dies ist grundsätzlich richtig, doch lohnt sich eine genauere Betrachtung und Quantifizierung der verschiedenen Effekte, die dazu beitragen.

Betrachtet man den Gesamtverbrauch der Re 6/6 gegenüber der Re 4/4 II (beide in Variante 1), so ergibt sich tatsächlich ein Unterschied von etwa 15 % zugunsten der vierachsigen Lokomotive. Beim Laufwiderstand, der durch den Luftwiderstand dominiert wird, besteht kein namhafter Unterschied. Die höhere Masse äussert sich jedoch in der Energie, die bei Verzögerungen und Talfahrten in den mechanischen Bremsen in Wärme umgesetzt wird. Dieser Unterschied beträgt nur etwa 2 Prozentpunkte, kann den grossen Unterschied also nicht erklären. Massgebend sind auch hier die Verluste auf der Lokomotive: die Re 6/6 weist beispielsweise sechs statt vier Achsgetriebe mit entsprechenden Leerlaufverlusten auf, oder drei statt zwei Ventilatormotoren. Beides führt zu je 50 % grösseren, von der Zugkraft unabhängigen Verlusten und damit zu einem höheren Energieverbrauch.

Das Beispiel Re 6/6 gegen Re 4/4 II ist zwar anschaulich, aber insofern problematisch, als hier zwei Lokomotiven unterschiedlicher Leistungsklassen und Einsatzgebiete miteinander verglichen werden. Aufschlussreicher ist der Vergleich zweier Lokomotiven mit gleicher Leistung. Denkt man sich dazu eine sechssachsige Umrichterlokomotive mit identischen Leistungs- und Verlustdaten wie jene der Re 465, aber einer Masse von 108 statt 82 t, so liegt ihr Energieverbrauch wegen der höheren Masse nur um 2 % über der Re 465. Dieser Mehrverbrauch dürfte sich leicht kompensieren lassen durch die Reduktion der Kupferverluste im Transformator und in den Fahrmotoren, wie sie bei schwereren Apparaten möglich ist.

Die Masse einer Lokomotive hat somit wohl einen Einfluss auf den Energieverbrauch. Wenn aber eine Massenreduktion durch höhere Verluste im Traktionsteil erkauft werden muss, kann sich der erhoffte Effekt schnell in sein Gegenteil verwandeln.

Eine Reduktion der Masse der Anhängelast führt in jedem Fall zu einem reduzierten Energieverbrauch. Die Reduktion geschieht aber nicht proportional zur Zugmasse. Beim betrachteten Lastspiel mit Geschwindigkeiten bis 140 km/h dominiert bereits der Einfluss des Luftwiderstands. Zur Senkung des Energieverbrauchs um 1 % ist hier eine Reduktion der Zugmasse um rund 2,5 % nötig.

### **Was bringt die zukünftige Entwicklung?**

Elektrische Triebfahrzeuge werden auch heute noch weiterentwickelt. Verschiedene Effekte werden einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Bei den Stromrichtern ist in den nächsten Jahren mit einem Übergang vom GTO-Thyristor auf den IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) zu rechnen. Bei diesen Stromrichtern entfallen die Beschaltungsnetzwerke zum Schutz der Halbleiter-Bauelemente weitgehend. Vor allem im Teillastbetrieb können dadurch die Verluste gesenkt werden. Dieser willkommene Effekt führt zu einem nochmals gesenkten Energieverbrauch. Abschätzungen zeigen, dass der Verbrauch um etwa 2 % unter dem bereits sehr günstigen Wert der Re 460 (Variante 3) liegen dürfte, wenn ausser den Stromrichtern alle Komponenten unverändert von dieser Lokomotive übernommen würden.

Für den Verbrauch massgebend ist jedoch ebenso sehr die Bauart des ganzen Zuges. Doppelstockzüge beispielsweise führen pro Sitzplatz sowohl zu einem kleineren relativen Anteil des Luftwiderstands als auch, wegen der kleineren Masse, zu weniger Beschleunigungs- und Bremsarbeit. Beides wirkt verbrauchssenkend. Neue Materialien im Wagenkastenbau (Leichtmetalllegierungen oder sogar Kunststoff) führen ebenfalls zu einer kleineren Masse des Zuges und damit zu weniger Energieverbrauch.

Der bei verschiedenen Bahnen zu beobachtende Trend zum Triebzug im Personenverkehr ermöglicht zwar einen Wegfall der schweren Lokomotive. Für den Energieverbrauch massgebend ist hier aber letztendlich, wie es der Bahn gelingt, das Platzangebot der tatsächlichen Nachfrage anzupassen. Es besteht die Gefahr, dass die eingesparte Masse der Lokomotive im Durchschnitt einfach in Form von zwei nicht benötigten Wagen mitgeführt wird. Andererseits ermöglicht eine grössere Zahl angetriebener Achsen einen weitgehenden Verzicht auf den regelmässigen Einsatz der mechanischen Bremsen. Ohne umfassende, alle betrieblichen Aspekte berücksichtigende Studien kann über den Energieverbrauch keine Aussage mehr gemacht werden.

### **Fahrweise**

Der Energieverbrauch für eine Zugfahrt wird sehr stark durch die Fahrweise des Lokomotivführers beeinflusst. Verbrauchserhöhend wirken beispielsweise:

- Hohe Beschleunigung des Zuges.
- Exaktes Einhalten der Geschwindigkeit. Bei Geländeunebenheiten kann abwechselungsweise Zug- und Bremskraft benötigt werden, was beides zu Verlusten führt. Geschwindigkeitsregler wirken also verbrauchserhöhend, ihr Einfluss ist aber schwer exakt zu quantifizieren.
- Hohe Verzögerung in der Bremsphase. Bei Zügen ohne Allachsantrieb muss dabei die mechanische Bremse mitverwendet werden.

Verbrauchssenkend sind dagegen:

- Vorausschauende Fahrweise. Der Lokomotivführer berücksichtigt das Geländeprofil und erwartete Signalstellungen in seiner Fahrweise und verhindert dadurch unnötige Phasen mit Zug- oder Brems-

kraft. Geeignete Betriebsleitsysteme (Zugfunk, Signalvormeldung auf dem Führerstand) können den Lokomotivführer bei dieser Aufgabe unterstützen.

- Auslauffahrt nach Erreichen der Streckengeschwindigkeit. Vor allem im Nahverkehr kann so Energie gespart werden, praktisch ohne Fahrzeitverlust.
- Einhalten einer optimalen Bremskurve. Bei Einleitung einer Bremsung mit der elektrischen Bremse noch vor dem Vorsignal muss die mechanische Bremse erst bei tieferen Geschwindigkeiten oder nur zum Anhalten verwendet werden. Damit geht weniger Energie in den mechanischen Bremsen verloren.

Bei Fahrzeugen mit Rekuperationsbremsen ergeben sich durch unterschiedliche Fahrweise Energieverbrauchsunterschieden bis zu 30 %.

Eine sparsame Fahrweise gehört nach wie vor zum Berufsstolz sehr vieler Lokomotivführer. Natürlich ist der Lokomotivführer in seiner Fahrweise nicht frei. In erster Linie

muss er den Fahrplan einhalten. Besonders zu den Hauptverkehrszeiten lassen die heutigen Taktfahrpläne des Personenverkehrs eine energiesparende Fahrweise kaum noch zu. Zu den übrigen Zeiten ist es jedoch sinnvoll, die Fahrzeitreserven für energiesparendes Fahren zu nützen statt für lange Aufenthaltszeiten in den Stationen.

Die Fahrweise kann den Energieverbrauch ebenso stark beeinflussen wie technische Massnahmen auf dem Fahrzeug. Beides wirkt aber weitgehend unabhängig voneinander. Eine technische Massnahme darf deshalb nie mit dem Argument abgelehnt werden, ihr Einfluss sei kleiner als die Unterschiede, die sich durch die Fahrweise ergeben können.

### Hochgeschwindigkeitsverkehr

In verschiedenen Ländern Europas nimmt der Hochgeschwindigkeitsverkehr eine immer wichtigere Stellung im Personenfernverkehr ein. Beim Energieverbrauch unterscheiden sich dort die Akzente gegenüber den

bisher dargestellten Fällen. Interessant ist der Vergleich mit einer Gebirgsbahn:

- Die Beschleunigung der Masse eines Zuges auf 300 km/h benötigt die gleiche Energie wie die Überwindung einer Höhendifferenz von 354 m (zum Vergleich: der Höhenunterschied von Frutigen nach Kandersteg an der Lötschbergbahn beträgt 394 m). Bei der Bremsung des Zuges mit einer Rekuperationsbremse kann diese Energie teilweise zurückgewonnen werden.
- Der Luftwiderstand des Zuges wächst quadratisch mit der Geschwindigkeit. Er beträgt bei 300 km/h rund 22 N/kN. Zur Überwindung dieses Widerstands ist die gleiche Zugkraft nötig wie für den Hangabtrieb auf 22 % Steigung. Der Zug fährt dabei gewöhnlich mit nahezu maximaler Antriebsleistung. Nach einer Stunde Fahrt in der Ebene mit 300 km/h hat der Zug energiemässig gesehen eine Höhendifferenz von 6600 m überwunden! Diese Energie wird in Umgebungswärme umgewandelt und kann nicht zurückgewonnen werden.

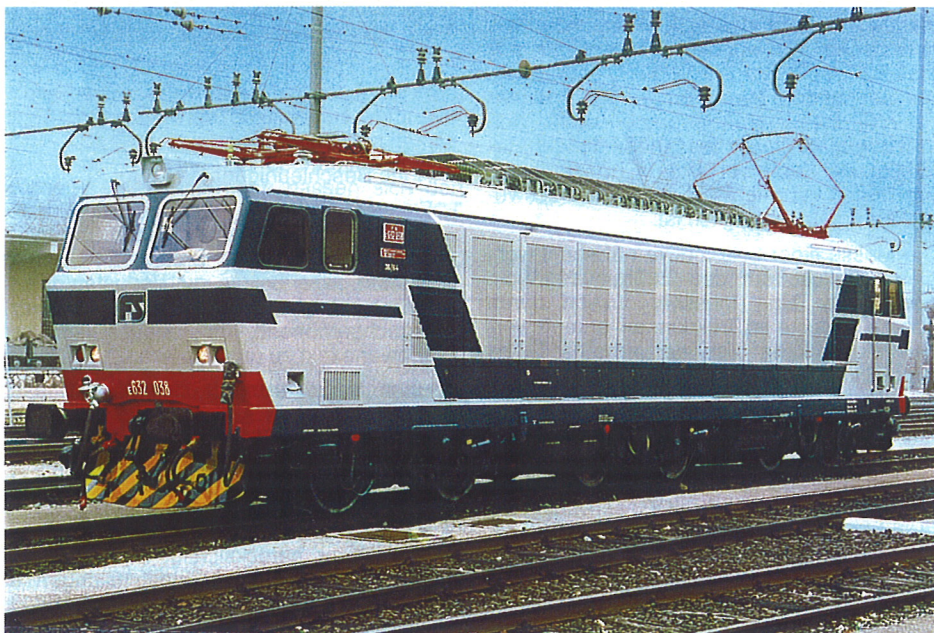
Im arbeitsreichen Hochgeschwindigkeitsverkehr ist deshalb fast nur der Leistungswirkungsgrad im Nennpunkt des Triebfahrzeugs von Bedeutung. Die Verluste bei Teillast und die Art der Bremsung spielen nur noch eine untergeordnete Rolle. Die wirksamste Sparmassnahme besteht in der Reduktion des Luftwiderstands der Zugskomposition. Erst bei Hochgeschwindigkeitszügen stellen sich somit jene Verhältnisse ein, die häufig für alle Arten der elektrischen Traktion vermutet werden.

### Energiesparen – auch bei der Bahn eine Notwendigkeit!

In den letzten zwei bis drei Jahren ist vielen Bahnen und Rollmaterialherstellern bewusst geworden, dass der Energieverbrauch eine nicht zu vernachlässigende Grösse ist. Der Energieverbrauch ist heute ein Schlagwort, das in keiner Studie und in keiner Fahrzeugauschreibung fehlt. Wie die Ausführungen in diesem Artikel zeigen, genügt die Forderung eines minimalen Wirkungsgrades in einem einzigen Arbeitspunkt nicht, auch wenn dies heute noch in vielen Fällen üblich ist. Nur eine genaue Betrachtung des Einsatzspektrums und eine darauf abgestimmte sorgfältige Auslegung des gesamten Triebfahrzeugs führen schliesslich zu einem optimalen Resultat. Die Bahnen und die Fahrzeughersteller sind dadurch gleichermaßen gefordert, durch die Formulierung

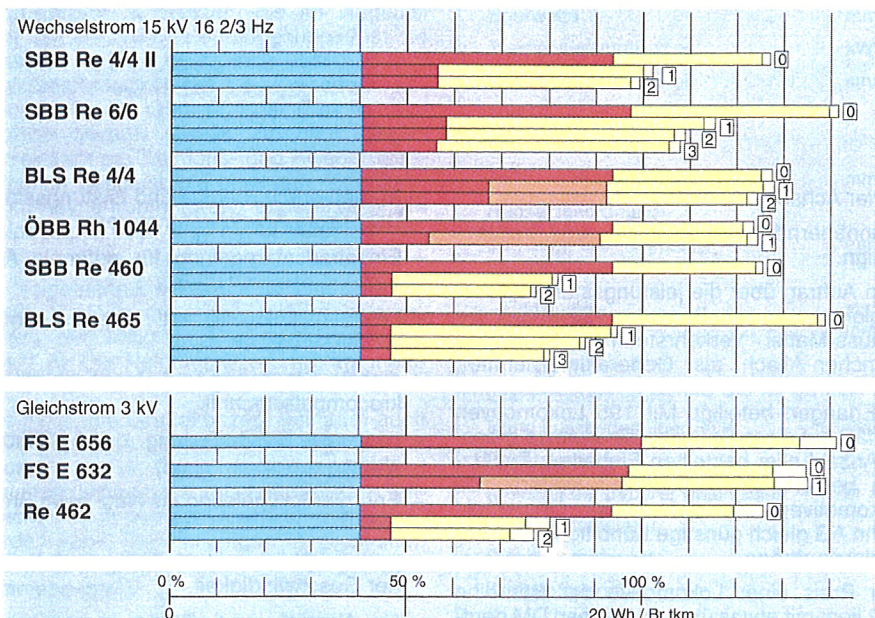
Oben: Messfahrten zum Abgleich der Rechenprogramme helfen, die Genauigkeit der Resultate zu erhöhen. Hier steht die E 656 417 der FS nach einer Revision in Verona Porta Vescovo bereit zu einer Kontrollfahrt, die gleichzeitig als Energiemessfahrt genutzt werden konnte (Foto M. Meyer, 30.1.1996).

Unten: Bei Gleichstrombahnen sind zur Kleinhaltung der Verluste in der Fahrleitung mehr parallele Drähte mit grösseren Querschnitten als bei Wechselstrombahnen nötig. E 632 036 der FS im Bahnhof von Vicenza (Foto M. Meyer, 22.12.1995).



### Energieverbrauch im Vergleich

Vergleichsrechnung über ein Lastspiel von 2555 km



**Energie:** Laufwiderstand (blau), Verluste Lokomotive (gelb), Pneumatische Bremse (rot), Verluste Fahrleitung (weiß), Bremswiderstand (orange)

**Lokomotiven:** 0 Ohne elektrische Bremse, 1 Ausgangszustand, 2, 3 Mit Energiesparmassnahmen (gemäss Figur "Untersuchte Lokomotiven")

**Normierung:** 100 % entspricht der Aufnahme am Stromabnehmer der Re 4/4 II 1

Oben: Ergebnisse der Energieverbrauchsrechnung für die verschiedenen Lokomotivtypen. Das Lastspiel ist für die Re 6/6 nicht typisch, deshalb stimmen die Einsparungen der Varianten 2 und 3 nicht mit den Werten aus [12] und [13] überein (Zeichnung M. Meyer).

Rechts: Übersicht über die untersuchten Lokomotivtypen. Variante 1 entspricht jeweils dem Zustand zur Zeit der Ablieferung, nur die Re 465 wurde bereits im Zustand 2 geliefert. Die Re 462 ist eine denkbare Zweisystemvariante der Re 460 (Zeichnung M. Meyer).

des Pflichtenhefts, durch die Konstruktion des Fahrzeugs und schliesslich durch die Überprüfung der vereinbarten Merkmale.

Die Antwort auf die Erkenntnis, dass die Energie nicht gratis ist, dass sich ihr Verbrauch aber durch geeignete Massnahmen beeinflussen lässt, kann deshalb nur die Energiesparlokomotive, oder umfassender, der Energiesparzug sein!

### Literatur

[1] Kalenoja H.: Energy consumption in the transport sector – a life cycle issue. Studie der Technischen Universität Tampere, Finnland. Zusammenfassung publiziert in: CADDET Energy Efficiency Newsletter 4/1995.

[2] Middendorf E.: Die neue Generation elektrischer Lokomotiven für die Deutsche Bahn AG – Ziele, Konzepte, Komponentenerprobungen, Lösungen. ZEV+DET Glasers Annalen 7/1996.

[3] Filipovic Z.: Elektrische Bahnen. Springer-Verlag, 3. Auflage, 1995.

[4] Gerber P.: Die Lokomotiven Re 465 der BLS Lötschbergbahn. Schweizer Eisenbahn-Revue 12/1994.

[5] Sommer H., Senn M.: Entwicklung und Nutzen der elektrischen Rekuperationsbremse bei den SBB. Schweizer Eisenbahn-Revue 6/1996.

[6] Meyer M.: Über das Netzverhalten von Umrichterlokomotiven. Schweizer Eisenbahn-Revue 8-9/1990 und 10/1990.

[7] Gerber M., Drabek E., Müller R.: Die Lokomotiven 2000 – Serie 460 – der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweizer Eisenbahn-Revue 10/1991.

[8] Faust H.: Wirkungsgradmessungen an verschiedenen Lokomotivtypen auf der Lötschberg-Nordrampe. Elektrische Bahnen 2/1990.

[9] Lüthi M., Schmid R.: Energieverbrauchsvergleich für Umrichterlokomotiven. Semesterarbeit LEM 9508 an der ETH Zürich, Sommersemester 1995.

[10] Croce T., Aschwanden St.: Energieverbrauchsvergleich für Bahnen verschiedener Stromsysteme. Semesterarbeit LEM 9525 an der ETH Zürich, Wintersemester 1995/96.

[11] Klinge R., Röhligh S.: Bewertungskriterien zur Rückspeisefähigkeit von Triebfahrzeugen. Elektrische Bahnen 7/1996.

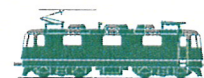
[12] Meyer M., Sommer H.: Optimierte Ventilationssteuerung für Stufenschalter-Lokomotiven. Eisenbahn-Revue International 6/1995.

[13] Meyer M., Schwab B., Bänziger R.: Energiesparen dank verstärkter Ausnutzung der Rekuperationsbremse der Re 6/6 und Re 4/4 II der SBB. Schweizer Eisenbahn-Revue 6/1996.

[14] Meyer M., Aeberhard M.: Über den Energieverbrauch von elektrischen Lokomotiven. Erscheint in ZEV+DET Glasers Annalen 2-3/1997.

### Untersuchte Lokomotiven

Wechselstrom 15 kV 16 2/3 Hz



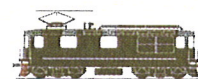
SBB Re 4/4 II

- T Stufenschalter, Einphasen-Motoren
- E Rekuperationsbremse
- P 4.7 MW (1h), 140 km/h, 82 t
- 2 Optimierte Ventilationssteuerung



SBB Re 6/6

- T Stufenschalter, Einphasen-Motoren
- E Rekuperationsbremse
- P 7.9 MW (1h), 140 km/h, 120 t
- 2 Optimierte Ventilationssteuerung
- 3 2 + Zusatzbremssteuerung, Lastausgleich



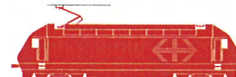
BLS Re 4/4

- T Stufenschalter, Gleichrichter
- E Widerstandsbremse
- P 4.8 MW (1h), 140 km/h, 82 t
- 2 Optimierte Ventilationssteuerung



ÖBB Rh 1044

- T Thyristor-Anschnittsteuerung
- E Widerstandsbremse
- P 5.3 MW (1h), 160 km/h, 84 t



SBB Re 460

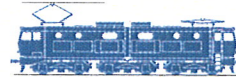
- T GTO-Umrichter in 3-Punkt-Schaltung
- E Rekuperationsbremse
- P 5.2 MW (dd) / 6.1 MW (max), 230 km/h, 85 t
- 2 DG-Abschaltung, optimierte Reglersollwerte



BLS Re 465

- T GTO-Umrichter in 2-Punkt-Schaltung
- E Rekuperationsbremse
- P 4.0 MW (dd) / 7.0 MW (max), 230 km/h, 82 t
- 2 Drehgestellabschaltung bei Teillast
- 3 2 + optimierte Reglersollwerte

Gleichstrom 3 kV



FS E 656

- T Anfahrwiderstände, Motorumgruppierung
- E Keine elektrische Bremse
- P 4.8 MW (1h), 150 km/h, 120 t



FS E 632

- T Thyristor-Gleichstromsteller
- E Widerstandsbremse
- P 4.8 MW (1h), 160 km/h, 104 t



Re 462

- T GTO-Umrichter in 3-Punkt-Schaltung
- E Rekuperationsbremse
- P 5.2 MW (dd) / 6.1 MW (max), 230 km/h, 86 t
- 2 DG-Abschaltung, optimierte Reglersollwerte

- T Technologie
- E Elektrische Bremse
- P Wichtigste Leistungsdaten
- 2, 3 Untersuchte Energiesparmassnahmen
- K Rechnung mit genauen Komponentendaten
- M Modellabgleich durch Messfahrten
- R Reines Rechenmodell