Frage an Radio Eriwan: »Ist die Eisenbahn wirklich sparsam mit Energie?« – Antwort: »Im Prinzip ja.« Dennoch titelte das Bulletin Electrosuisse:[1] »Deutsche Bahn will weiter Strom sparen.« Also wie viel Energie spart die Bahn denn im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern jetzt schon, und wie viel Potenzial ist noch drin? Wo liegen diese Potenziale, die noch erschlossen werden sollen?

Inhalt

1 Bahn-Energie 4
1.1 Energie-Erzeugung bei der Bahn 4
1.1.1 Gemeinsamkeit macht stark 6
1.1.2 Merkwürdigkeiten 7
1.1.3 Bahnnetze der Zukunft 8
1.2 Energie-Übertragung bei der Bahn 8
1.3 Energie-Einsatz bei der Bahn 9
1.3.1 Bahn-Physik – Teil 1 11
1.3.2 Folgerungen für die Kosten 14
2 Gut, aber bei weitem nicht optimal: Dieselmotoren 16
2.1 Zwischenbemerkung zu den Baureihen-Bezeichnungen 17
2.2 Zwei grundverschiedene Wandlerkonzepte 17
2.3 Was tut die Lok noch außer ziehen? 18
2.4 Rückblick: Diesel als Altlast – oder als Lastesel? 19
2.5 Dabei hätte auch auf der Schiene der Diesel die Nase vorn, aber… 20
2.6 Bahn-Physik – Teil 2 20
2.7 Bahn-Physik – Teil 3 21
2.8 Sparsam oder nicht sparsam, das ist hier die Frage 22
3 Überlegen: Elektrische Zugförderung 25
3.1 Theorie und Praxis 26
3.2 Plant die Bahnen mit Verstand: Neue Züge braucht das Land! 28
3.3 Zwischenbemerkung zu den Fachausdrücken 28
3.4 ICE – der ultimative Zug? 29
3.5 Plant die Strecken mit Verstand: Neue Gleise braucht das Land! 31
3.5.1 Fernverkehr 31
3.5.2 Vor allem neue Bahnhöfe bräuchte das Land 32
3.5.3 Regionalverkehr 33

3.5.4 Rekordhalter: Straßenbahnen 34
3.5.5 Ausland 35
3.6 Hochgeschwindigkeitszug oder schnelles Reisen? 35
4 Zur Ökobilanz gehört noch mehr 38
4.1 Der Antrieb 38
4.2 Sonstiger Energie-Verbrauch 39
4.3 Leichtmetall statt Schwermetall? 40
4.4 Entsorgung 42
5 Konzepte für die Zukunft 44
5.1 Diesellok bleibt Diesellok 44
5.2 Die eingebaute Rangierlok 45
5.3 Optimal: Akkumulator getriebene Nahverkehrs-Triebwagen 45
5.3.1 Akku-Strom 2,5 Mal so teuer – und doch billiger als Diesel! 47
5.3.2 Sorgenkind Heizung 48
5.4 Hy-time? Oder »Der Stoff, aus dem das Wasser ist« 48
5.5 Optimal: Akkumulator getriebene Rangierloks 48
5.6 Auch kombinierbar mit Stromabnehmer 49
5.7 Das Nicht-Hybrid-Fahrzeug auf Schienen 51
5.7.1 Vom dieselelektrischen Antrieb zum Hybrid-Antrieb 51
5.7.2 Hybrid-Antrieb auch im Fernverkehr? 52
5.7.3 Hybrid-Antrieb im Nahverkehr – Versuche machen allmählich Mut 54
5.7.4 Aus Angst vor Akku-Kosten: Das »Zweikraft-Fahrzeug« 55
5.7.5 Love me Tender! 55
5.7.6 Hybrid-Antrieb im Rangierdienst 56
6 Bilanz 57
6.1 Ist die Bahn denn nun ein Energie sparendes Verkehrsmittel? 57
6.2 Könnte denn die Bahn noch mehr Energie sparen? 58
6.2.1 Beispiel 1: Fernverkehr 58
6.2.2 Beispiel 2: Nahverkehr 61
6.3 Ausblick 62

Wie »grün« ist der Schienenverkehr?

Zum Fahrplanwechsel am 11.12.2011 hob die Deutsche Bahn AG ihre Fahrpreise um 4% an. Wie es im Rundfunk hieß, werde dies mit gestiegenen Energiekosten begründet – ungeachtet des Umstands, dass Hartmut Mehdorn, der damalige Chef der DB AG, erst einige Wochen zuvor bekannt gegeben hatte, Energiekosten machten im Haushalt der Bahn nur 3% der gesamten Kosten aus. Demnach müssen die Energiekosten seit der letzten Fahrpreis-Erhöhung um 133% gestiegen sein. Tatsächlich führte ein Sprecher 10% Kostensteigerung bei Strom und 20% bei Kraftstoffen ins Feld. Sollten dann die europäischen Bahnen weiterhin Energie einsparen, um ihr Wirtschaftsergebnis zu verbessern, oder hat dies keinen Sinn?

Bild 1: Was hier als Touristenattraktion »sinnlos verpulvert« wird…

Bild 2: …könnte 10 ICE3-Triebzüge treiben – im Sommer sogar als Doppelzüge

1 Bahn-Energie

Um diesen Fragen nachzugehen, sind zunächst einmal einige physikalische Betrachtungen erforderlich, wo und wann ein Schienenfahrzeug wofür wie viel und welche Energie verbraucht und woher diese stammt. Die DB AG durfte sich über Jahrzehnte schon deshalb gegenüber der öffentlichen Versorgung in Deutschland als ein Stück weit umweltfreundlicher bezeichnen, als der Anteil regenerativer Energie am Bahnstrom deutlich höher lag als in der öffentlichen Versorgung. In Österreich und in der Schweiz werden ohnehin 60% allen Stroms in Wasserkraftwerken erzeugt; die Kraftwerke der SBB und der ÖBB nutzen zu 90% Wasserkraft.[2; 3] Allerdings ist bis 2018 der Anteil erneuerbarer Energie im öffentlichen Netz Deutschlands rapide auf fast 40% angewachsen. Die Bahn aber hält nach einem zwischenzeitlichen Einbruch ihren Vorsprung (Bild 3) und konnte nach eigenen Angaben[4] ihren Ökostrom-Anteil zwischen 2017 und 2018 von 44% auf 57% steigern – ein Fortschritt, der seinesgleichen sucht! Der Fernverkehr nimmt für sich in Anspruch, mit 100% Ökostrom zu fahren – wie auch immer sich das errechnet. Erstaunlicher Weise bleiben die Züge nachts auch bei Flaute nicht stehen – und wenn, dann aus anderen Gründen. Diese ergründen wir vielleicht noch (Abschnitt 1.3).

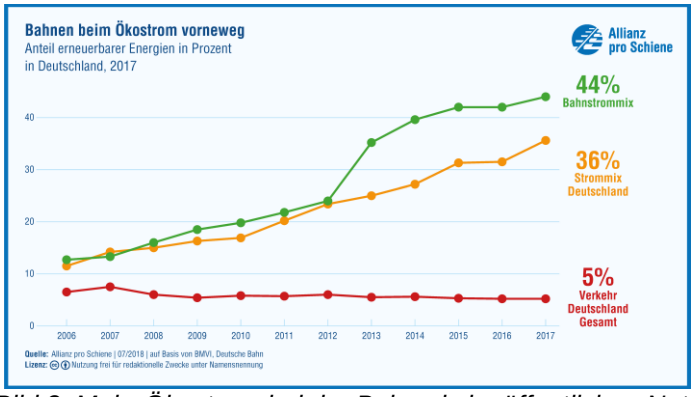


Bild 3: Mehr Ökostrom bei der Bahn als im öffentlichen Netz

Im Nah- und Regionalverkehr sind weiterhin auch Dieselfahrzeuge unterwegs – aber warum eigentlich? Muss das so sein? Dies soll eine der wichtigsten der nachfolgenden Betrachtungen sein (ab Abschnitt 5.3).

1.1 Energie-Erzeugung bei der Bahn

Die DB AG verfügt über ein eigenes Bahnstromnetz. Im Westen Deutschlands wurde es vorwiegend aus eigenen Kraftwerken oder aus separaten Generatoren an Kraftwerks-Standorten der öffentlichen Versorgung gespeist,[5] die den ungewöhnlichen Einphasen-Wechselstrom mit der niedrigen Frequenz von 16,7 Hz erzeugten (Tabelle 1). Im Osten kamen größtenteils mechanische Umformersätze zum Einsatz. Beides wird zur Zeit massiv durch leistungselektronische Umrichter ersetzt, die den 50-Hz-Drehstrom aus dem öffentlichen Drehstromnetz in Bahnstrom umrichten. An insgesamt 51 Stellen wird Strom in das Netz der DB eingespeist. Davon handelt es sich in 36 Fällen um Umrichter oder Umformer; nur die restlichen 15 Punkte sind Kraftwerksgeneratoren.[4]

Dazu gehört ein eigenes 110-kV-Hochspannungsnetz, das den Fahrstrom auf die einzelnen Unterwerke verteilt (so nennen sich die Umspannwerke für Bahnstrom). Man kann die Hochspannungs-Freileitungen – eigentlich ein Zweiphasen-Wechselstromnetz mit geerdeter Mittelanzapfung – gut vom öffentlichen 110-kV-Drehstromnetz unterscheiden, da die Leiterseile im Gegensatz zu den Dreiergruppen des Drehstroms stets als Zweiergruppen auftreten (Bild 4). Man unterscheidet zwischen zentraler Einspeisung, d. h. in das 110-kV-Hoch-

spannungsnetz der Bahn, und dezentraler Einspeisung, d. h. direkt in die Oberleitung mit 15 kV.

Bild 4: Links 2 Stromkreise Wechselstrom 110 kV der Bahn, rechts 4 Stromkreise Drehstrom 110 kV der öffentlichen Versorgung

Strom für stationäre Anwendungen wie etwa die Beleuchtung von Bahnhöfen wird aus dem öffentlichen 50-Hz-Drehstromnetz bezogen. Wo Bahnstrom fehlt, gehört auch die Zugvorheizung hierzu. Auch die Weichenheizung, die bei Frost und Schneefall die Weichen gängig halten soll, was leider nicht immer der Fall ist, wird auf elektrifizierten Strecken mit Bahnstrom, auf nicht elektrifizierten Strecken mit Netzstrom betrieben – was auch wiederum seinen Anteil Energie kostet: 10 kW bis 15 kW sind hier erforderlich – und das für etwa 400 Stunden jährlich.[6] Mithin verbraucht eine Weiche ungefähr so viel Strom wie ein Haushalt.

Aufteilung der installierten Leistung 2016	
Wasserkraftwerke:	11%
Wärmekraftwerke:	17%
Umrichterwerke bei Wärmekraftwerken (dem jeweiligen Kraftwerk zugeordnet):	28%
Kraftwerksferne Umwandlerwerke (dem jeweiligen Strommix zuzuordnen):	44%

Tabelle 1: Stromnetz der DB AG im Überblick

In den Unterwerken wird der Bahnstrom dann auf die Fahrdrahtspannung von 15 kV herunter gespannt. Die Toleranz ist größer als im öffentlichen Netz, Abweichungen von 12 kV bis 17,25 kV, kurzfristig sogar von 11 kV bis 18 kV, sind erlaubt. Damit müssen die Triebfahrzeuge fertig werden, denn es handelt sich hier um ein Netz, an dem ausschließlich sehr große und noch dazu sehr unstete Lasten betrieben werden. Etwa 6 MW Traktionsleistung darf man für eine Elektrolokomotive rechnen, dazu Hilfsbetriebe und Blindleistung. Ein ICE-Triebzug nimmt ungefähr 8 MW auf. Da diese modernen Fahrzeuge beim Bremsen auch in das Netz zurück speisen können und häufig in »Doppeltraktion«, also zu zweit verkuppelt, verkehren, kann die Leistungs-»Aufnahme« einer einzigen solchen Last innerhalb weniger Sekunden von -16 MW bis 16 MW, also um 32 MW, schwanken – sofern die Belastbarkeit des Fahrdrahts dies überhaupt zulässt. In jedem Fall stellt dies eine echte Herausforderung für den Netzbetrieb dar.

Indes hat die Effizienz der Nutzung von Energie bei der Bahn seit 1994 stetig zugenommen. Offenbar wird es bei der DB AG als äquivalent angesehen, ob sie eine Person oder eine Tonne Fracht jeweils einen Kilometer weit befördert. Jedenfalls werden die Beförderungsleistungen des Personenverkehrs in Personenkilometern [Pkm] und des Güterverkehrs in Tonnenkilometern [tkm] angegeben und dann die beiden Größen einfach addiert, um zur gesamten Beförderungsleistung zu gelangen – und trotz einer Steigerung unter dem Strich nimmt der Energieverbrauch kontinuierlich ab (Bild 5). Die Beförderungsleistung nimmt im Güterverkehr leider wieder ab. Dies mag aber auch daran liegen, dass diese heute besser in »Kubikmeterkilometern pro Jahr« gemessen würde, wenn weniger Kohle, Stahl und Erz, aber immer mehr Amazon-Pakete befördert werden. Eine Ausweitung des Lichtraumprofils ist deswegen im Gespräch.[7]

Eckdaten der 16,7-Hz-Bahnen in D-A-CH 2017				
		DB AG	ÖBB	SBB
Beschäftigte		310935	40327	28767
Fahrgäste (Millionen)		4652	246	460
		95854 Pkm		18975 Pkm
Gleisnetz	gesamt	33488 km	5647 km	3232 km
	elektrifiziert	20232 km	3623 km	3232 km
	Anteil an Strecke	60%	64%	100%
	Anteil am Verkehr	> 90%		100%

Tabelle 2: Die Bahnen im deutschen Sprachraum im Vergleich

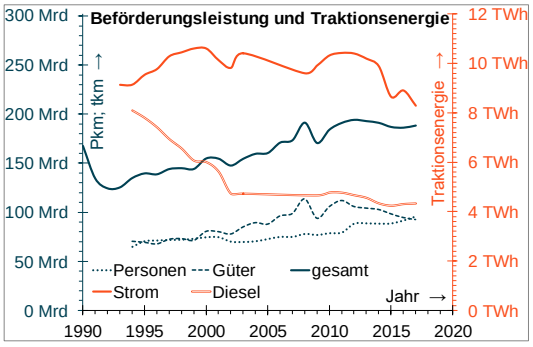


Bild 5: Die Beförderungsleistung der DB AG nimmt zu, der Energieverbrauch nimmt ab

Die Zusammensetzung der Traktionsstrom-Erzeugung ändert sich analog zur deutschen Energiewende – oder eilt ihr sogar voraus (Bild 6).

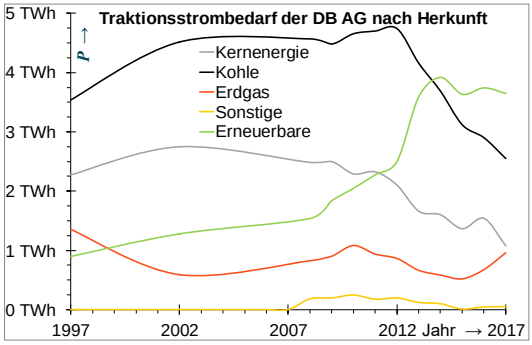


Bild 6: Auch die Zusammensetzung des Traktionsstroms ändert sich im Zuge der Energiewende

Bild 7: Lenkrad in einer Lok? Nein, das Schaltstufenrad im Führerstand der altehrwürdigen Baureihe 110, gebaut von 1957 bis 1969, aber die Kilometer-Millionärin lief und lief – 2011 noch in 64 Exemplaren. 2015 war das letzte Exemplar ausgemustert[8]

1.1.1 Gemeinsamkeit macht stark

Erleichtert wird die Lösung dieser Aufgabe – ähnlich wie beim europäischen Verbundnetz[9] – durch die internationale Kooperation, denn wenn Deutschland, Österreich und die Schweiz schon, wie Zyniker behaupten, durch die gemeinsame Sprache getrennt werden, so eint sie doch das Bahnstromsystem, das auch bei den Österreichischen und Schweizerischen Bundesbahnen mit einer Spannung von 15 kV und einer Frequenz von 16,7 Hz läuft (Tabelle 2).

Deshalb bieten Kuppelstellen an den Grenzen die Möglichkeit, die Netze parallel zu betreiben. Das österreichische Bahnstrom-Übertragungsnetz ist direkt mit dem deutschen verbunden, das schweizerische über Transformatoren, da die Betriebsspannung dort 132 kV beträgt.

Offen bleibt die Frage, warum eine solch niedrige Frequenz gewählt wurde. Hierüber herrschen teils etwas wilde Theorien, etwa um die »rechtswidrige Entnahme« aus dem Netz zu erschweren und somit die »nicht technischen Verluste« zu reduzieren. Wesentlich

plausibler klingt dagegen die Begründung, dass die Reihenschlussmotoren der alten Schaltwerks-Lokomotiven, bei denen die Einstellung der Leistung über einen Stufentransformator mit 28 bis 37 Anzapfungen erfolgte (Bild 7), im Prinzip Gleichstrommotoren sind, die aber auch an Wechselspannung funktionieren. Allerdings laufen sie umso besser, je näher der Wechselstrom dem Gleichstrom kommt, denn der Erregerstrom in der mit dem Anker in Reihe liegenden Erregerwicklung induziert im Anker eine Wechselspannung, die zu Bürstenfeuer führen kann. Je niedriger die Frequenz, desto niedriger ist diese induzierte Spannung und desto geringer die Neigung zu Bürstenfeuer. Tatsächlich wurden anfangs der Elektrifizierung Gleichstrommotoren eingesetzt, die sich mit 16,7 Hz, in den USA zum Teil auch 25 Hz, gerade noch betreiben lassen.

1.1.2 Merkwürdigkeiten

Multipliziert man diese »krumme« Frequenz von (ursprünglich) $16^2/_3$ Hz mit 3, so kommt man auf »glatte« 50 Hz. Auch das hat seinen Sinn und Grund, denn historisch bedingt wurde das DB-Netz in Ostdeutschland schon immer überwiegend aus dem öffentlichen Netz gespeist. Ein Transformator spannte die Hochspannung von 220 kV oder 110 kV auf 6 kV herunter, womit in einem Umformerwerk 6-polige Drehstrom-Synchronmotoren betrieben wurden, die jeweils einen zweipoligen Wechselstrom-Synchrongenerator antrieben, dessen Ausgangsspannung von 6 kV dann wiederum über einen Transformator auf 15 kV hochgespannt und in die Fahrleitung eingespeist wurde. Nun haben zwar große Motoren und Generatoren recht hohe Wirkungsgrade im Bereich um 98%, und Transformatoren kommen noch höher. Die mechanische Umformung mit doppelter Umspannung brachte aber doch einen entsprechenden Anteil Energie-Verluste mit sich. Insbesondere stand bei schwacher Last die Leerlauf-Verlustleistung weiterhin in ungeminderter Höhe an und zog in diesem Betriebszustand den Wirkungsgrad »in den Keller«. Durch Aufteilung der Umformerleistung auf mehrere Maschinensätze (z. B. Bild 8), von denen einer oder zwei bei Schwachlast abgeschaltet wurden, konnte dieser Effekt gemindert werden; der Aufwand aber vergrößerte sich nochmals. Heutzutage setzt man statt dessen leistungselektronische Umrichter ein, die einen Energie-Austausch des Bahnnetzes mit dem öffentlichen Netz zur gegenseitigen Stabilisierung ermöglichen. Allein in Österreich gibt es 10 Stück davon sowie in 2018 noch 5 Umformerwerke. In der Schweiz sind es 8 Stück mit einer Leistung von insgesamt 350 MW – wobei unklar bleibt, wie viele davon moderne Umrichterwerke und wie viele altertümliche Umformerwerke sind – sowie 2 Kuppelstellen zum Netz der DB Energie. Bei dieser gestaltet es sich ähnlich schwierig festzustellen, wie viele der alten mechanischen Umformersätze (Bild 8) zur Zeit noch in Betrieb sind. Diejenigen in Ostdeutschland, die auf einzelne Inselnetze speisen, laufen weiterhin synchron zum öffentlichen Netz. Als Synchron-Synchron-Umformer können sie nicht anders. Diejenigen westlicher Prägung jedoch verfügen über die Möglichkeit, auch das Erregerfeld umlaufen zu lassen. Streng genommen werden sie mit Drehstrom sehr niedriger Frequenz erregt – eine Technik, wie sie auch von Windkraftanlagen her bekannt ist. Betreibt man jedoch solche Umrichter, die hier für die Bereitstellung des Erregerstroms eingesetzt werden, praktisch als Gleichrichter, so unterliegen sie einer einseitigen Belastung und somit vermehrtem Verschleiß. Daher hat man die Frequenz im westdeutschen Verbundnetz auf 16,7 Hz angehoben und nennt sie der Einfachheit halber auch so, selbst wenn die einzelnen Inselnetze im Osten weiterhin mit genau $16^2/_3$ Hz laufen und der Nennwert in der Norm nach wie vor auf $16^2/_3$ Hz lautet. Im Osten speist jedes Umformerwerk weiterhin ein bestimmtes Teilnetz, das vielleicht synchron, aber kaum jemals in Phase zum benachbarten Teilnetz läuft.

Bei der Durchfahrt von einem Teilnetz in ein anderes muss der Lokführer die Lok komplett abschalten und mit Schwung durch die Übergangsstelle rollen, in der sich ein kurzes Stück

isolierten, spannungslosen Drahtes als Trennstelle befindet. Zur Zeit jedoch wird diese Technik durch das fortschrittlichere Verbundnetz auch auf der 15-kV-Ebene ersetzt. Damit wird man hier die Trennstellen endlich los, die in vielen anderen Ländern, wo eine Speisung mit 25 kV und 50 Hz aus dem öffentlichen Netz weit verbreitet ist, noch zum Alltag gehören. Wenn man eine einphasige Versorgung aus dem dreiphasigen Netz auskoppeln will, muss man zur Symmetrierung der Last alle paar Kilometer die Phasen tauschen.

Bild 8: Umformerwerk mit 4 Umformersätzen in Berlin-Rummelsburg aus der DDR-Zeit – seit 2017 nicht mehr in Betrieb

1.1.3 Bahnnetze der Zukunft

In China, wo das Bahnnetz gerade erst neu aufgebaut wird, verfolgt man zur Zeit einen zukunftsgemäßen Ansatz mit Speisung aus Umrichtern. Ein Umrichter von 50 Hz auf 50 Hz erscheint auf den ersten Blick unsinnig – aber nur auf den ersten Blick, denn es geht um die Speisung eines 50-Hz-Einphasennetzes aus einem 50-Hz-Drehstromnetz. Erstmalig umgesetzt dagegen wurde diese Technik 2015 in Australien.[10]

Eine offene Frage ist es, wie lange man den Transformator in der Lok überhaupt noch braucht und wann man schlichtweg die Zwischenkreisspannung im Umrichter so hoch setzen kann, dass der Gleichrichterteil entfallen kann und die Oberleitung 10 kV, 15 kV oder 25 kV Gleichspannung direkt an den Wechselrichter des Triebfahrzeugs liefert.

1.2 Energie-Übertragung bei der Bahn

Sicherheit geht vor. Eine Vorschrift sagt deshalb, dass eine Elektrolokomotive komplett abgeschaltet, also auch der Stromabnehmer abgezogen werden muss, wenn ein Zug an- oder abgekuppelt wird, denn hierbei muss auch die Stromversorgung aus der Lok für den Zug hergestellt bzw. unterbrochen werden – und die hierfür zuständige, so genannte »Zugsammelschiene«, die bei Reisezügen durch den ganzen Zug läuft, führt immerhin eine Spannung von 1000 V. Deswegen wird die Lok für diesen Moment komplett ausgeschaltet, und da man den Knall zwar deutlich hört, den Hauptschalter aber nicht sieht und die aktuelle Stellung also von außen nicht erkenntlich ist, wird darüber hinaus deutlich sichtbar der Bügel abgezogen. Den ganzen historisch bedingten Aufwand kann man sich bei modernen Triebwagenzügen sparen, die mit dem ausgestattet sind, was sich Scharfenberg-Kupplung nennt und eine (automatische) Kupplung mit Mittelpuffer in einem Bauteil vereint. Diese sind jedoch mit den herkömmlichen Hakenkupplungen nicht kompatibel (nur für Rangierlokomotiven gibt es Adapter), und bis zu »Scharfenberg im Güterverkehr« ist es noch ein langer Weg.

Damit den Passanten auf dem Bahnsteig selbst dann nicht Übles widerfährt, wenn einmal ein Fahrdraht reißen und im Spannung führenden Zustand herunter fallen sollte, wollen es die Vorschriften, dass alle Metallteile in der Nähe elektrifizierter Bahn-Anlagen geerdet werden (Bild 9). Dies bedeutet, dass diese Teile letztlich an die Schienen und somit an die Rückleitung des Stroms angeschlossen werden (Bild 10). Sollten sie nun mit der Fahrleitung in Berührung kommen, so würde dies einen Kurzschluss darstellen. Dies bedeutet, dass der Strom einen wesentlich kürzeren Weg zurück zur Quelle findet als den halbwegs mühsamen durch die Drahtwindungen der Lok. Der Strom wäre dadurch deutlich größer als der Nennstrom der betroffenen Anlage und würde die Sicherung »schmeißen«. Damit wäre die Fehlerstelle innerhalb von Millisekunden frei von der gefährlichen Spannung.

Doch auch im regulären Betrieb könnten sich isolierte Metallteile durch induktive und kapazitive Einflüsse durch die Fahrleitungsspannung aufladen. Erdung und Potenzialausgleich gewährleisten, dass berührbare Metallteile stets nahezu gleiches elektrisches Potenzial aufweisen und so unter keinen Umständen gefährliche Spannungen führen können.

← Bild 9: Alle Metallteile im Bereich von Fahrleitungen der Bahn werden geerdet, was hier bedeutet:

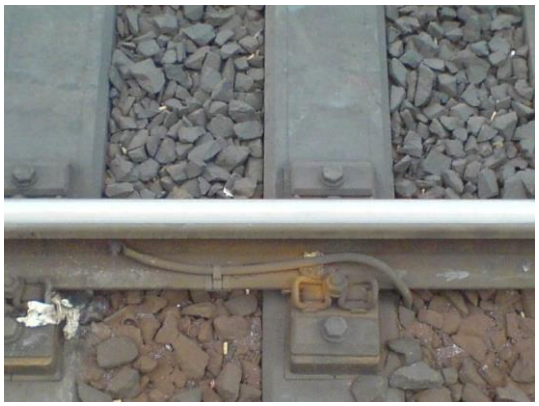


Bild 10: Sie werden mit dem Stromrückleiter, der nächstgelegenen Schiene, verbunden

Etwas risikofreudiger ist man gegenüber Tieren. So erfährt der Begriff »Taubenschlag« bei der Bahn eine ganz neue Dimension (vgl. auch Abschnitt 0): Gern spazieren die ahnungslosen Tiere auch auf den Dächern der metallenen Wagenkästen von Elektroloks umher und wollen die obigen Ausführungen zu elektrischen Potenzialen und Potenzial-Differenzen einfach nicht wahr haben. Zu ihrem Unglück entspricht ihre Körperhöhe auch noch ungefähr der Länge der Isolatoren, auf denen die beiden Stromabnehmer und die Verbindungsleitung zwischen ihnen aufgeständert sind. Beim Unterqueren der Leitung kommt es dann zum »Taubenschlag« mit einem kräftigen Knall, einer Rauchwolke und ein paar stiebenden Federn. Bei allen Parallelen, aber wie Schlaraffenland wirkt das nicht gerade. Vielleicht opfert man diese von den Reisenden mehrheitlich doch eher als lästige Plagegeister empfunden Kulturfolger auch ganz bewusst als abschreckende Beispiele für waghalsige Jugendliche gegen vermeintliche Mutprobe-Manöver auf S-Bahn-Dächern. Es bildet sich ein so genannter Störlichtbogen, ein Beinahe-Kurzschluss, der also zum Auslösen des Überstromschutzes führt. Anschließend wird eine Prüfspannung aufgeschaltet um zu sehen, ob die Störung noch besteht. Ist sie, wie in den meisten Fällen, durch den Stromfluss verschwunden (»freigebrannt«), wird nach 5 s die Betriebsspannung teils manuell, teils automatisch wieder zugeschaltet. Danach ist wieder alles wie vorher – außer für die Taube. Auf freier Strecke verursachen gelegentlich größere Vögel entsprechende Störungen, mit denen dann ebenso verfahren wird.

1.3 Energie-Einsatz bei der Bahn

Im Vergleich zum Automobil sind beim Bahnfahrzeug folgende Unterschiede zu beachten:

- Die Fahrzeuge sind sehr schwer. Für einen Regionalzugwagen sind etwa 35 t anzusetzen, im Fernverkehr etwa 42 t, und ein Doppelstockwagen bringt es auf 45 t Leer-ge-

wicht, voll besetzt etwa 54 t. Eine passende Elektrolokomotive schlägt mit etwa 84 t zu Buche, eine kleinere Diesellok wiegt ungefähr 60 t. Muss beim Reisen im PKW zusätzlich zu den Reisenden eine Masse von etwa 250 kg je Sitzplatz bewegt werden, sind es bei der Bahn gut 1000 kg. Auch der Begriff »Massenverkehrsmittel« erhält somit bei der Bahn eine ganz neue Dimension.

+ Die Rollreibung auf Schienen ist sehr gering. Etwa 2‰ werden in der Literatur angegeben gegenüber 2% beim Gummireifen auf Asphalt. Die Bahn rechnet mit 1,5‰ Rollreibung Rad - Schiene plus 0,2‰ Lagerreibung – macht zusammen nur 1,7‰. Aus gutem Grund werden die Werte bei der Bahn in Promille statt in Prozent angegeben.

- Ähnliches gilt leider für die Haftgrenze bei der Gleitreibung von Stahlrädern auf Stahlschienen. Ein Koeffizient von höchstens 0,35 im Stillstand bei trockener Witterung findet sich in der Literatur, während man für Gummi auf Asphalt mit Werten von 0,9 bis 1 rechnen darf. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt der Wert beim Stahlrad weiter ab. Die Möglichkeiten zur Kraftübertragung beim Bremsen und Beschleunigen sind entsprechend begrenzt. Für einen »Kavalierstart« wäre die Leistung bei niedriger Geschwindigkeit zwar vorhanden, doch lässt sich die entsprechend große Kraft nicht auf die Schiene übertragen. Immerhin aber soll in einem ad-hoc-Versuch mit der Armbanduhr am Rande eines anderen Versuchs eine alte DR-Lokomotive der BR 155 ohne Zuglast eine Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in etwa 6 s vorgelegt haben – unter Einsatz von sehr viel Sand, versteht sich.

+ Dafür ist aber auch der Luftwiderstand im Verhältnis zur Größe, Masse und Transportkapazität beim Schienenfahrzeug sehr gering. Schließlich fährt der ganze Zug im Windschatten der Lok bzw. des Steuerwagens.

Die Fahrwiderstände Luft- und Rollreibung sind also erfreulich niedrig:

- Man spürt es, wenn der Zug einmal unversehens (in die falsche Richtung) anrollt – ohne dass man mit bloßem Auge das geringste Bisschen Gefälle erkannt hätte – wenn die Bremse vielleicht einen Moment vor dem eigentlichen Anfahren gelöst wurde. Ein unsichtbar winziges Bisschen Gefälle war eben doch vorhanden.
- Man sieht es auch auf dem Rangierbahnhof, wo einmal abgestoßene Güterwagen rollen und rollen und immer weiter rollen wie von Geisterhand gezogen, ohne sichtbar an Geschwindigkeit zu verlieren. Die große Masse trägt das Ihre dazu bei, denn diese stellt einen entsprechend großen Energiespeicher dar. Im Prinzip reichen zwei starke Männer, um einen solchen Wagen – vom Gewicht eines Lastwagens – zu schieben. Praktisch ist es harte Arbeit, bis der Wagen endlich ein klein wenig an Geschwindigkeit erreicht hat. Danach läuft alles »wie von selbst« – und geschmiert ohnehin.
- Wenn ein ICE2-Zug **bei 230 km/h** auf ebener Strecke von einem Strom-Ausfall ereilt wird, **rollt** der Zug noch **32 km** weiter, ehe die Geschwindigkeit **auf 120 km/h** abgefallen ist! Danach wurde dieser Versuch abgebrochen, da es sich um eine normale Zugfahrt handelte, deren Fahrgäste auch irgendwann noch ankommen wollten. Nichtsdestoweniger »wird dieses planmäßige Ausrollen lassen … auch tatsächlich sehr häufig praktiziert, um Energie zu sparen. Die auf diese Weise antriebslos zurückgelegte Strecke kann vor Haltebahnhöfen durchaus in der Größenordnung von 50 km liegen, wenn günstige Verhältnisse vorliegen.«[11]
- Oder, anders herum betrachtet: Nach Berechnungs-Unterlagen der DB erreicht ein Eisenbahnwagen, den man über ein Gefälle von **5‰** abrollen lässt, **nach einer Stunde** (endlich) eine Geschwindigkeit von **44 m/s ≈ 160 km/h!** Wohlgemerkt: 5‰, das sind 0,5% – ein Gefälle, auf dem ein PKW noch nicht einmal anrollen würde, sondern vielmehr, schöbe man ihn an, alsbald wieder stehen bliebe!

- Als pikante, vielleicht abermals unerwartete Nebensache lässt sich hierüber hinaus noch erwähnen, dass ein Auto **nicht** durchgehend eine kräftigere Beschleunigung vorzuweisen hat als ein Zug! Anfangs ist dies selbstverständlich so, doch da die Höchstgeschwindigkeit des Autos in aller Regel die höchstmögliche und nicht notwendiger Weise die höchstzulässige darstellt, nähert sich das Auto diesem Wert asymptotisch. Der Zug hat dagegen noch »dicke Reserven«, steuert diesen Wert so zu sagen direkt an und holt das Auto irgendwann wieder ein (**Bild 11**)! Im Alleingang ließe eine Lokomotive ein Auto gleich von Anfang an hinter sich, wie oben gezeigt.

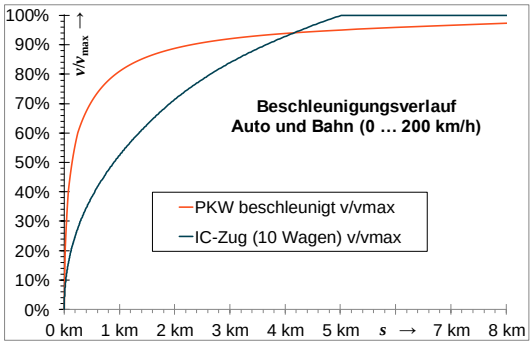


Bild 11: Das Auto beschleunigt anfangs natürlich schneller, wird aber vom Zug irgendwann eingeholt

Hier könnte auch die Antwort auf die Frage verortet sein, wie die DB denn ihren Anspruch begründet, ihren Fernverkehr zu 100% mit Ökostrom zu betreiben: Die Züge rollen einfach durch eine 10 oder 14 Tage dauernde »kalte Dunkelflaute«![12]

1.3.1 Bahn-Physik – Teil 1

Wie viel Energie ist also aufzuwenden, um einen Zug zu bewegen? Die Berechnung wird ganz einfach, wenn alle Größen in physikalischen Grundeinheiten (SI-Einheiten nach dem MKS-System) eingesetzt werden. Dies sind der Meter für Länge, das Kilogramm für die Masse und die Sekunde für Zeit. Alle anderen Einheiten, so auch das Newton für die Kraft, lassen sich hieraus ableiten. Wenn ein ICE3-Triebzug eine Masse von 410 t hat, dann entspricht dies einem Gewicht von ≈ 4 MN. Wenn davon 2‰ zur Überwindung der Rollreibung aufgewendet werden müssen, macht das 8 kN aus. Gleit- bzw. Rollreibungskräfte sind prinzipiell – in der Praxis mit kleinen Abweichungen – unabhängig von der Geschwindigkeit. Multipliziert man also diese – konstante – Kraft mit der gefahrenen Geschwindigkeit, eingesetzt in Metern pro Sekunde, ergibt sich direkt ohne Notwendigkeit eines Umrechnungsfaktors die aufzuwendende Leistung P_{Roll}. Bei v = 108 km/h = 30 m/s kommt man so z. B. auf

$$P_{\mathrm{Roll}} = F_{\mathrm{Roll}} * v = 8\mathrm{kN} * 30\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 240\frac{\mathrm{kNm}}{\mathrm{s}} = 240\mathrm{kW}\,.$$

Das ist sehr bescheiden; macht es doch weniger als ein Zehntel der Leistung einer alten Leichtlok aus! Bei 216 km/h wären es immer noch nur 480 kW und damit immer noch weit unter einem Zehntel der Leistung einer modernen Schnellzuglok, wobei 410 t immerhin einer solchen Lok mit 8 bis 9 IC-Reisezugwagen entsprechen. Die zur Überwindung der Rollreibung aufzuwendende Energie ist von der Geschwindigkeit unabhängig, denn bei der doppelten Geschwindigkeit ist zwar die doppelte Leistung aufzubringen, dies jedoch nur für die halbe Zeit, und Energie ist Leistung mal Zeit.

Bei der Luftreibung wird es schwieriger, denn diese hat nichts mit der Masse des Zuges, sondern vielmehr mit dessen äußerer Gestalt zu tun und steigt zudem mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Für eine Verdopplung der Geschwindigkeit ist also die vierfache Kraft, die vierfache Energie und sogar die achtfache Leistung aufzubieten. Doch auch hier liegt –

außer beim Hochgeschwindigkeitsverkehr im Bereich von 300 km/h (Bild 29, Bild 30) – wegen des »Fahrens im eigenen Windschatten« nicht der größte Brocken des Energie-Bedarfs eines Zuges. Eine der beiden entscheidenden Fragen ist vielmehr, wie viel Energie aufgewendet werden muss, bis der Zug seine Geschwindigkeit erst einmal erreicht hat. Die kinetische Energie errechnet sich aus:

$$W_{\text{kin}} = \frac{m}{2} v^2 .$$

Setzt man die Masse m und die Geschwindigkeit v des Zuges in physikalischen Grundeinheiten ein, erhält man direkt die Energie in Newtonmetern, Wattsekunden oder Joule, was praktisch »Synonyme« sind. Fährt also ein ICE3-Triebzug, der ziemlich genau 410 t (= 410 000 kg) wiegt, mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h (≈ 83 m/s), so beträgt seine kinetische Energie:

$$W_{\text{kin}} = \frac{4{,}1*10^5\,\text{kg}}{2} * (83\frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 1425\text{MJ} \approx 400\text{kWh} .$$ [13]

Oha! Dazu kommt noch ein Aufschlag von 5% bis 15%, den man bei Schienenfahrzeugen für rotierende Massen hinzu rechnen muss. Beim ICE3 ist es eher wenig, weil das Getriebe wegen der hohen Geschwindigkeit ziemlich »lang« übersetzt ist und die Motoren wegen der Aufteilung auf viele Achsen kleiner sind. Da das Trägheitsmoment mit der dritten Potenz zum Durchmesser wächst, wird dies durch die größere Anzahl der Motoren nicht vollständig aufgewogen.

Auch sollte der Zug tunlichst nicht leer fahren, sonst hat das ganze Unternehmen keinen Sinn. Voll besetzt mit 429 Fahrgästen zuzüglich Gepäck wiegt er annähernd 450 t. Wenn man nun noch bedenkt, dass diese Züge meist in »Doppeltraktion«, also zu zweit verkuppelt, verkehren, muss der Zug mit einer kinetischen Energie von 1000 kWh – 1 MWh – aufgeladen werden. Geschwindigkeit ist also keine Hexerei; Beschleunigung vielleicht schon.

Die zweite entscheidende Frage ist, wie viel potenzielle Energie aufgewendet werden muss, um z. B. einen Güterzug von 1200 t Gesamtmasse an einen um 300 m höher gelegenen Ort zu fahren. Auch diese Rechnung ist einfach:

$$W_{\text{pot}} = m * g * h = 1{,}2*10^6\,\text{kg} * 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 300\text{m} = 3{,}5316*10^9\,\text{Nm} = 3531{,}6\text{MJ} \approx 1\text{MWh} ,$$

also so viel wie die Beschleunigung des doppelten Hochgeschwindigkeitszuges, nämlich viel, während für die Reibung im Vergleich zum Straßenverkehr nur sehr wenig aufzuwenden ist.

Damit lässt sich der Vergleich auch so darstellen:

- Unser oben betrachteter PKW hat bei einer Geschwindigkeit von **200 km/h** so viel kinetische Energie gespeichert (gut eine halbe Kilowattstunde), wie er bei der gleichen Geschwindigkeit auf **1,5 km** Fahrstrecke verbraucht.
- Unser oben betrachteter ICE2-Zug hat bei einer Geschwindigkeit von **200 km/h** so viel kinetische Energie gespeichert (gut 220 kWh), wie er bei der gleichen Geschwindigkeit auf **22 km** Fahrstrecke verbraucht. Nebenbei bemerkt verdoppelt sich die kinetische Energie bereits bei 280 km/h, was der Höchstgeschwindigkeit des Zuges entspricht.

Oder so:

- Der PKW benötigt zum Fahren einer konstanten Geschwindigkeit von **200 km/h** eine Leistung von etwa **17 kW je Sitzplatz**. Bei einem Auto, das es mit 66 kW schon auf 200 km/h bringt (wie in Abschnitt 1.3.1 zu Gunsten »runder« Vergleichszahlen angenommen), muss es sich um einen sportlichen Kleinwagen handeln, der höchstens 4 Personen (sehr wenig) Platz bietet. Eigentlich müsste sich dieser selbst damit noch an einem hoffnungslos überfüllten Zug messen lassen, um zu einem realistischen Vergleich mit ähnlichen Platzverhältnissen zu gelangen.
- Bei einem IC-Zug sind es nur etwa **3 kW je Sitzplatz** – oder was heißt schon »Sitzplatz«? Beinhaltet dieser doch bei der Bahn Platz zum Umhergehen, einen Speisewagen, Toiletten, Steckdosen (selbst die daraus bezogene Energie ist in der Bilanz enthalten) und Anderes, was ein Zug so mit sich herum schleppt und worauf Reisende im Auto verzichten müssen.

Oder auch so:

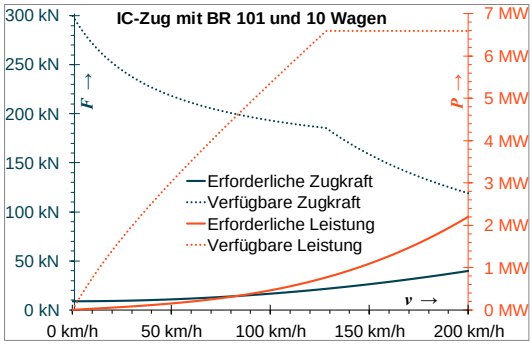


Bild 12: Zur Beförderung eines IC-Zuges aus 9 Wagen auf ebener Strecke und bei konstanter Geschwindigkeit erforderliche Zugkraft und Antriebsleistung: Die Lok ist bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (der Wagen) von 200 km/h nur zu 1/3 ausgelastet!

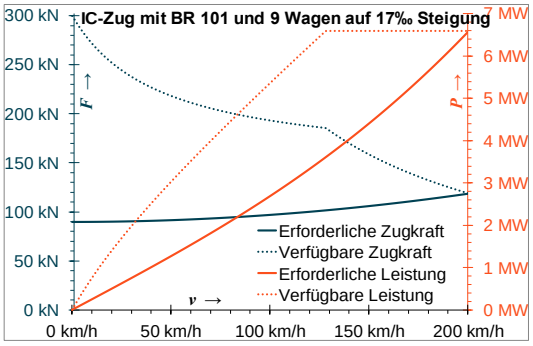
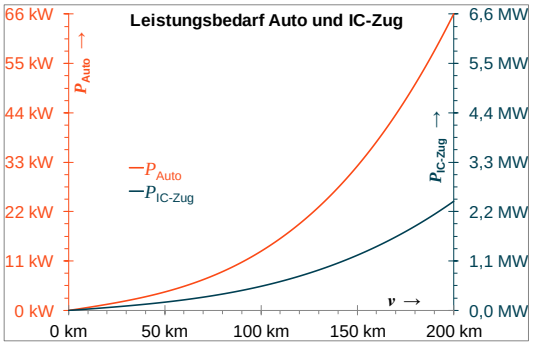


Bild 13: Derselbe Zug (Bild 12) kann eine Steigung von 17‰ noch mit Höchstgeschwindigkeit hinauf fahren – erst wenn die Steigung noch steiler wird, nimmt die Geschwindigkeit ab

Rechnet man einen etwas größeren PKW, der auch 5 Personen fasst, voll besetzt mit 2 t Gesamtmasse, 2 m² Stirnfläche, einem c_w-Wert von 0,37 und einem Rollreibungs-Koeffizienten, wie gehabt, von 2%, so errechnet sich hieraus ein Leistungsbedarf von 105 kW, um konstant 200 km/h schnell zu fahren. Bei dieser Geschwindigkeit auszukuppeln und das Fahrzeug ungebremst ausrollen zu lassen brächte es nach 3 km (Bild 15) bzw. nach knapp 10 min (Bild 16) zum Stillstand. Der Zug dagegen rollt und rollt und rollt. Bemerkenswert ist dabei, dass das Auto zunächst, oberhalb von etwa 125 km/h, beim **Rollen** sogar schneller an Schwung verliert als der Zug zu **bremsen** in der Lage wäre! Darunter lässt der Luftwiderstand nach, während die Bahn an Bodenhaftung gewinnt.

Wie viel des Energie-Vorteils des Zuges durch die Beschleunigung der größeren spezifischen Masse je Sitzplatz wieder verloren geht oder inwieweit sich der Vorsprung sogar noch weiter ausbauen lässt, hängt davon ab, wie viel kinetische Energie beim Bremsen wieder zurück gewonnen werden kann. Beim Dieselzug ist es naturgemäß gar nichts. Beim Elektrozug liegt das Potenzial prinzipiell bei 75%, wie im Folgenden zu zeigen sein wird. Nun kommt es darauf an, was die Bahn daraus macht.

Bild 14: Ein kleiner PKW (P_{Nenn} = 66 kW, 4 Sitze) benötigt 100% seiner Motorleistung, um eine Geschwindigkeit von konstant 200 km/h zu fahren; bei einem IC-Zug mit 10 Wagen (P_{Nenn} = 6,6 MW, 800 Sitzplätze) sind es nur 33% →



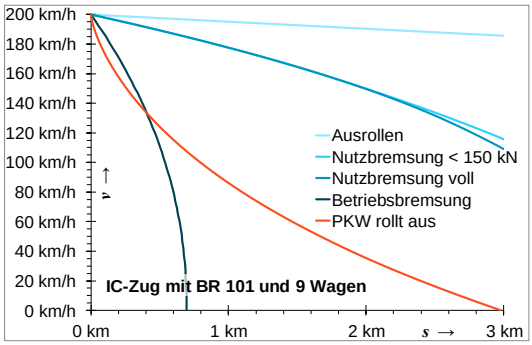


Bild 15: Ausrollen eines IC-Zuges und eines PKW sowie Nutzbremsung und Betriebsbremsung des Zuges über dem Weg

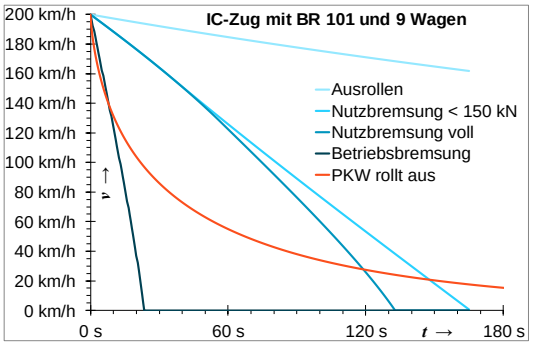


Bild 16: Ausrollen eines IC-Zuges und eines PKW sowie Nutzbremsung und Betriebsbremsung des Zuges (ohne Magnetschienenbremse) über der Zeit

1.3.2 Folgerungen für die Kosten

Alle drei Energiebedarfs-Rechnungen – Rollreibung, Luftwiderstand und Beschleunigung – enthalten noch keine Berücksichtigung der im Antriebsstrang auftretenden Verluste. Bei einem Wirkungsgrad von 95% für den Fahrzeugtransformator, 95% für die Fahrmotoren, 98% für die Umrichter und 98% für die Zahnradgetriebe ergibt sich ein Gesamt-Wirkungsgrad von knapp 87% ab Stromabnehmer für den Antriebsstrang innerhalb des Fahrzeugs. Der sonstige Energie-Verbrauch des Zuges – auch insofern, als er zum Betrieb erforderlich ist, etwa für Druckluft – ist hierin nicht berücksichtigt. So gerechnet sind dem Triebfahrzeug in beiden Fällen, also zur Beschleunigung des Personenfahrzeugs auf 300 km/h oder für 300 m Anstieg beim Güterzug, etwa 1150 kWh an elektrischer Energie zuzuführen. Bei der DB rechnet man hierfür mit Kosten in Höhe von etwa 144 € zur Hochtarif- oder 122 € zur Niedertarifzeit (Bild 17). Weitere Kosten kommen noch hinzu. So geht z. B. das Gerücht, die alten transalpinen Reisezüge hätten auf je 3 Alpen-Überquerungen je einen Satz Bremsklötze – fachsprachlich Bremssohlen – »verbremst«. Um ein Gerücht handelt es sich indes wahrscheinlich eher nicht, sondern um bittere Wahrheit.

Und was heißt schon »alt«? Es muss wohl um das Jahr 1972 gewesen sein, als heiß diskutiert wurde, ob Scheibenbremsen für PKW angebrachter wären als Trommelbremsen. Damals bildete die Zeitschrift »Motorwelt« des ADAC einen Radsatz eines Reisezugwagens ab, also eine Achse mit zwei Rädern – und eben mit einer oder zwei Bremsscheiben (Bilder finden sich reichlich im Internet, indem man »Radsatz« als Suchbegriff in eine Suchmaschine eingibt – vgl. auch Bild 27). Bild-Unterschrift: »Scheibenbremsen? Bei der Bahn ein alter Hut!«

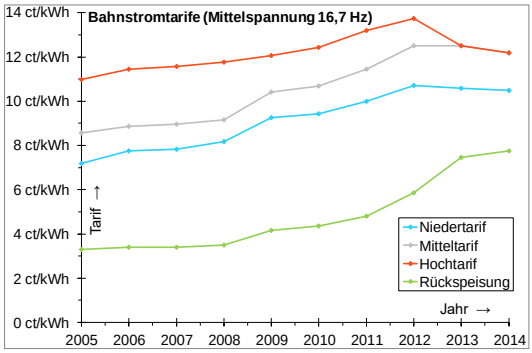


Bild 17: Verlauf der Tarife der DB Energie[14]

Doch noch bis etwa 2012 verkehrten im Regionalverkehr einige Wagen mit außer sich selbst auch noch die Räder verschleißenden Klotzbremsen (»Bremssohlen«). Diese Wagen mussten also deutlich vor 1972 gebaut worden sein. Bahnfahrzeuge sind eben extrem langlebig.

Dabei muss man sagen, dass die Scheibenbremsen auch wieder nicht der Weisheit letzten Schluss darstellen, da die zwangsläufig ständige Innenbelüftung an einem einzigen Reisezugwagen bei 200 km/h nicht weniger als 19 kW schluckt! Eine Magnet-Schienenbremse, deren Magnete sich zum Bremsen an die Schienen drücken, ist mit 2 kW pro Drehgestell zufrieden. Eine verschleißfreie Wirbelstrombremse, die nur knapp über der Schiene schwebt, aber berührungslos arbeitet, schluckt gar 86 kW pro Drehgestell, also 172 kW je Reisezugwagen (bei jeder Geschwindigkeit) – allerdings nur beim Bremsen. Ihr Gebrauch ist aber nur eingeschränkt möglich und zulässig, denn bei niedriger Geschwindigkeit werden keine hinreichenden Wirbelströme mehr in der Schiene induziert, und da typischer Weise alle Züge an derselben Stelle bremsen, können die Schienen auch zu heiß werden. Insgesamt aber hat man im Fernverkehr den Bremsen-Verschleiß durch solche elektrodynamischen sowie durch hydraulische Bremssysteme stark vermindern können. Die Erfahrung lehrt bei den ICE2-Zügen einen Tauschzyklus der Bremsbeläge von immerhin 200 000 km – doch auch das entspricht nur 6 Monaten Betrieb! Die Bremsscheiben überdauern theoretisch die Lebensdauer des ganzen Radsatzes – praktisch mit etwa 20% Frühausfällen. Ohne Nutzbremsung, schätzt ein DB-Techniker, läge die Quote bei 50%. Die durchschnittliche Lebensdauer der Radsätze wird mit 1,2 Mio. km angegeben. Für eine moderne Güterzuglok wird vom Hersteller eine Lebensdauer der Bremsbeläge von 750 000 km genannt.

2 Gut, aber bei weitem nicht optimal: Dieselmotoren

Leider jedoch ist es trotz allen technischen Fortschritts noch nicht gelungen, einen Verbrennungsmotor zu entwickeln, der beim Bremsen Abgas ansaugt und daraus Frischluft und Kraftstoff erzeugt. Wohl sind die immensen Fortschritte offensichtlich, die bei den Dieselmotoren in den letzten 20 bis 30 Jahren gemacht wurden. Nicht nur die Wirkungsgrade, die schon immer denen der Ottomotoren überlegen waren, konnten verbessert werden, sondern bei der Leistungsdichte (»Literleistung«), dem nutzbaren Drehzahlband (»Elastizität«) und bei den Abgaswerten wurden noch erheblich weiter reichende Verbesserungen erzielt, wie von der PKW-Technologie her bekannt. Die schwarzen Qualmwolken, die angeblich manchmal zu Verwechslungen von Dieselloks mit Dampfloks geführt haben sollen (»…fährt wohl mit ranziger Butter?«), gehören der Vergangenheit an – jedenfalls bei modernen Fahrzeugen.

Bei der SBB wird ausschließlich elektrisch gefahren – eine weise Entscheidung und angesichts der landschaftlichen Gegebenheiten nahe liegend, wo doch deutlich über die Hälfte des Stroms dort aus Wasserkraft gewonnen wird. Die Rückspeise-Fähigkeit kommt heute als weiterer Vorteil insbesondere im Gebirge hinzu.

Der Fortschritt bei der Dieseltraktion hält sich in Deutschland allein schon wegen der zunehmenden Elektrifizierung in Grenzen. Bei neueren Dieseltriebwagen wurden die hydraulischen Getriebe durch eine Kombination eines automatischen Schaltgetriebes mit einem hydraulischen Drehmomentwandler abgelöst. Der Wandler muss dann nur noch einen kleinen Drehzahlbereich (Schlupf) abdecken und verursacht entsprechend geringere Verluste. Auch wird der Schiebebetrieb ermöglicht, so dass wenigstens beim Ausrollen, Bremsen und bei Talfahrt der Leerlaufverbrauch vermieden wird – statt ihn gar zu erhöhen wie unten zur BR 612 beschrieben.

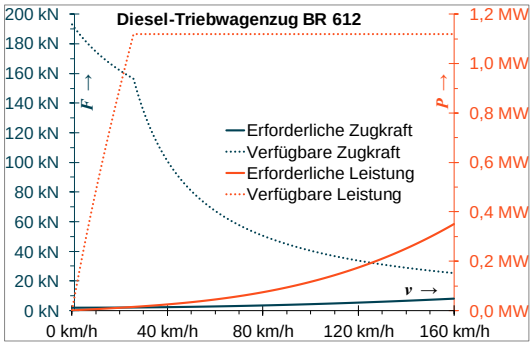


Bild 18: Der Dieseltriebzug der BR 612 kann prinzipiell ab etwa 30 km/h seine volle Motorleistung auf die Schienen bringen, da etwa 50% des Gesamtgewichts auf Antriebsachsen liegen, und benötigt zum konstanten Fahren der höchstzulässigen Geschwindigkeit nur etwa 30% der Nennleistung

Bild 19: »Bogenschnelles« Fahren dank Neigetechnik z. B. mit 160 km/h in einer Kurve, die normaler Weise mit höchstens 120 km/h befahren werden darf

Neue Diesellokomotiven werden heute mit elektrischer Kraftübertragung ausgeführt (Abschnitt 2.2). Diese Technik erleichtert die Einführung der aufkommenden Zweikraft-Fahrzeuge: Da die Lok ohnehin mit elektrischen Fahrmotoren ausgestattet ist, bekommt sie auch noch einen Stromabnehmer aufgesetzt, der auffährt, sobald eine Oberleitung vorhanden ist. Nur wo dies nicht gegeben ist, springt der Dieselmotor an.

Zur Verbesserung der Effizienz durch bessere Anpassung an die fluktuierende Belastung wurde auch eine viermotorige Diesellokomotive auf den Markt gebracht, deren Motoren nach Bedarf zu- und abgeschaltet werden, doch der Effekt kann auch angezweifelt werden. Allerdings lässt sie sich durch Beistellen eines »Stromversorgungswagens«, der mit Stromabnehmer und Transformator ausgestattet ist, zu einer Zweikraftlok erweitern. Letztendlich wirkt das Ganze aber immer ein wenig nach Stückwerk. Besser ist allemal die Elektrifizierung der Strecke.

Bei der DB gilt dies ab einem Transportvolumen von 1350 t pro Stunde als rentabel und wird folglich durchgeführt, denn die Dieselloks beanspruchen zu allem Ungemach auch noch mindestens die 3-fache Instandhaltungskapazität gegenüber E-Loks. Schließlich erwarten die Fahrgäste heute flotte Bedienung zusammen mit allerhand Komfort. Um kurvige Altbaustrecken sowohl »bogenschnell«, als auch komfortabler befahren zu können, wurde die Neigetechnik (Bild 19) entwickelt, die z. B. bei den Regionaltriebzügen der Baureihen 611 und 612, in den ICE-T mit Neigetechnik der BR 411 und 415 sowie beim Diesel-ICE der BR 605 (siehe jedoch Abschnitt 6.2.1) zum Einsatz kommt.

2.1 Zwischenbemerkung zu den Baureihen-Bezeichnungen

Bei der DB werden die Triebfahrzeuge anhand dreistelliger Nummern unterschieden. Dabei bedeutet die erste Ziffer grob gesagt:

0: Dampflokomotive (ausgestorben),

1: Elektrolokomotive,

2: Diesellokomotive,

3: Mehrsystem-Elektrolokomotive,

4: Elektro-Triebwagen,

5: Elektro-Triebwagen mit Akkumulator-Betrieb (ausgestorben, zur Zeit neu entstehend),

6: Diesel-Triebwagen,

7: Schienenbus (ausgestorben),

8: Beiwagen ohne Antrieb zum Elektro-Triebwagen,

9: Beiwagen ohne Antrieb zum Diesel-Triebwagen.

Danach folgen zwei mehr oder weniger willkürliche Ziffern, die das Fahrzeug näher spezifizieren. Die darauf folgenden 3 Ziffern nummerieren die einzelnen Fahrzeuge dieser Baureihe. Jedenfalls auf den Stirnseiten ist das so. Seitlich wird seit einigen Jahren eine 12-stellige UIC[15]-Nummer angebracht, in der die DB-Baureihen-Bezeichnung enthalten ist (Bild 21). Bei der BR 612 handelt es sich um das technisch und optisch aufgepeppte Nachfolgemodell der Neigezüge (»Pendolino«) 610 und 611, die äußerlich gleich aussahen, doch verfügte die BR 610 über eine elektrisch und die BR 611 über eine hydraulisch angetriebene Neigetechnik. Daher durfte der Markenname »Pendolino« des italienischen Originals nicht mehr verwendet werden. Fotos der Fahrzeuge findet man jederzeit im Internet, indem man »BR« und die jeweilige Baureihennummer in eine Suchmaschine eingibt.

2.2 Zwei grundverschiedene Wandlerkonzepte

Der Haupt-Antrieb deutscher Dieselfahrzeuge westlicher Prägung erfolgte traditionsgemäß immer über hydraulische Kraft-Übertragung – ganz im Gegensatz zum Rest der Welt, wo sich der dieselelektrische Antrieb durchgesetzt hat. Hierbei treiben die Dieselmotoren Generatoren an, die dann die als Einzelachs-Antrieb angeordneten elektrischen Fahr-

motoren speisen. Die dieselelektrische Lokomotive ist im Prinzip eine Elektrolok, die ihr eigenes Kraftwerk mit sich herum schleppt. Der Wirkungsgrad dieser aufwändigen Kraft-Übertragung ist jedoch besser als der eines hydraulischen Drehmomentwandlers; das Gewicht aber ist beträchtlich, was bei Güterzuglokomotiven wegen der genannten Probleme mit der Haftreibungsgrenze sich auch als Vorteil auswirken kann. Es bedingt jedoch, dass solche Loks 6-achsig ausgeführt werden müssen, da die Achslast bei den europäischen Hauptbahnen in der Regel auf 21,5 t begrenzt ist, und selbst dann »fehlt es noch an der Leistung für die geforderte Fahrdynamik,« wie ein Fachmann der DB Fernverkehr bestätigt. »Diesellokomotiven würden schnell fahrende Züge aufhalten«, und eine Fachzeitschrift berichtet, die Elektrifizierung habe auf einer nur 22 km langen Strecke die Fahrzeit um 5 Minuten verkürzt![8] Der (rein) elektrische Zugbetrieb (mittels Fahrdraht) ist den Dieselloks also sowohl in Hinsicht auf die Effizienz als auch in der Leistungsfähigkeit deutlich überlegen. Ein Vergleich der Daten einer alten 6-achsigen E-Lok mit einer schweren dieselelektrischen Lok macht es deutlich. Nehmen wir die schwere Güterzug-Lokomotive der Baureihe 151 (letztes Baujahr 1975, jedoch 2016 noch 79 Stück im aktiven Bestand), oder die vermeintlich viel modernere, damals als Paradepferd zusammen mit dem IC-Verkehr auf den Weg gebrachte, aber schon praktisch ausgestorbene Baureihe 103 (2016 noch 2 Stück im Bestand auf Museumsbahnen unterwegs[8]): Die E-Lok, die nicht ihr eigenes »Kraftwerk« mit sich herum schleppen muss, bringt es natürlich auf gut und gern die doppelte Nennleistung. Selbstverständlich sind diese Nenndaten jedoch relativ zu sehen, denn Leistung ist Zugkraft mal gefahrene Geschwindigkeit, und bei niedriger Geschwindigkeit kann daher wegen der geringen Haftgrenze der Gleitreibung nicht die volle Leistung auf die Schiene gebracht werden. So können moderne E-Loks erst bei Geschwindigkeiten über 100 km/h ihre volle Leistung »ausfahren«. Die 6-achsige dieselelektrische BR 232 (»Ludmilla«) brachte es allerdings auch bei einer Messfahrt im »zweckentfremdenden« Personenverkehr bei konstanter Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit (120 km/h) schon auf einen Kraftstoff-Verbrauch von munteren 3 l/km. Von einer Privatbahn, die dieselhydraulische Lokomotiven – und zwar neue – einsetzt (1500 kW; 88 t – ohne »Kraftwerk«), wurde berichtet, dass ein Zug mit 18 vierachsigen Schüttgüterwagen für eine Strecke von 60 km zwischen 180 l und 260 l Kraftstoff verbraucht! Dabei ist die Geschwindigkeit auf dieser Strecke auf 50 km/h begrenzt. Erschwerend kommt jedoch hinzu, dass ein Höhen-Unterschied von rund 250 m zu überwinden ist. Dabei fährt der Zug stets voll bergab, also rund die halbe Strecke lang mit angezogener Bremse, und leer – aber nichtsdestoweniger mit »Vollgas« und teilweise noch unter Zuhilfenahme einer Schublok – bergauf. Daher ist der Kraftstoff-Verbrauch für Hin- und Rückfahrt etwa gleich. **Die Schlussfolgerung aus der Untersuchung[16] dürfte eigentlich nur eine sein: Elektrifizieren!**

2.3 Was tut die Lok noch außer ziehen?

Inwieweit eine dieselhydraulische Lokomotive, typischer Weise die BR 218 – die auch ihre ideellen Verehrer hat und der ein Privatmann sogar eine eigene Webseite gewidmet hat[17] – als reine dieselhydraulische Lokomotive anzusehen ist, bleibt zum Teil eine diskussionswürdige Frage: In seltenen Einzelfällen fällt dem technisch versierten Beobachter doch immer noch auf, dass eine solche Lok, im Bahnhof stehend, »aus vollen Rohren dröhnt«. Wie ein leer laufender Dieselmotor klingt das nicht. Nein, der Motor läuft ganz offensichtlich unter Last – doch was tut die Lok da? Ein Eisenbahner klärt auf: Die Lok heizt. Der 12-Zylinder-Fahrmotor mit 115 Litern Hubraum treibt einen Generator an, der den Strom für die elektrische Zugheizung erzeugt. Mit einem Wirkungsgrad von vielleicht 33% wird da aus Dieselkraftstoff hochwertiger Strom erzeugt, um diesen in minderwertige Heizwärme umzuwandeln, also wird bei der Erzeugung von Wärme zwei Drittel der Energie als Wärme weggeworfen. Wie ein zukunftsfähiges Konzept wirkt das nicht gerade – doch wie gesagt, dieses

Konzept ist Jahrzehnte alt und befindet sich zur Zeit im Auslauf. Es geschieht zum einen natürlich aus Gründen der Kompatibilität mit der vorwiegend elektrischen Zugförderung, bei der die Reisezugwagen über eine durchgehende Stromleitung, die so genannte Zugsammelschiene, mit Strom aus der Lok beheizt werden. Zum anderen fehlt eine »Wärmesammelschiene« zur Fortleitung der Abwärme des Motors durch den ganzen Zug hindurch – und wird wegen des beträchtlichen Aufwands an diesem »Auslaufmodell« auch nicht mehr nachgerüstet.

2.4 Rückblick: Diesel als Altlast – oder als Lastesel?

*Bild 20: DB 2001: »Im Güterverkehr rüsten wir die schweren dieselelektrischen Lokomotiven der Baureihe 232 [hier im Bild noch mit der DR-Bezeichnung 132 – https://www.youtube.com/watch?v=lYT-Pauwvz8] mit neuen, verbesserten Motoren aus: So lassen sich die **Emissions**- und Lärmwerte **noch einmal erheblich** einschränken.«*

Mit der Fusion der Deutschen Bundesbahn mit der Deutschen Reichsbahn der DDR gelangten auch die alten 6-achsigen dieselelektrischen Loks russischer Bauart der Baureihen 232 und 234 auf das gesamtdeutsche Schienennetz und darüber hinaus. Vor allem den grenzüberschreitenden Verkehr nach Osteuropa bedienten diese urtümlichen Lokomotiven – ob des markigen Motorengeräuschs auch als »Taigatrommel« bekannt, doch auch die Rauchzeichen ließen die Herkunft der Maschinen erahnen. Insofern hätte die alte Schreibweise von »Rußland« noch immer ihre Berechtigung. Gerade die schwere, 6-achsige Bauform hat ihre Vorteile im Güterverkehr, wo hohe Zugkraft gefordert wird, aber Leistung ist Kraft mal Geschwindigkeit, und Güterzüge fahren langsamer. Zum vorzeitigen Ausmustern waren die alten Lokomotiven aus Ost und West aber dennoch zu schade – obschon ihr Anblick heute selten geworden ist – denn sie wurden gleichermaßen sehr solide und langlebig gebaut, und die Abgaswerte muss man relativ zur Förderkapazität sehen. Zudem ließ die DB AG noch 2001 verlauten: »Im Güterverkehr rüsten wir sie schweren dieselelektrischen Lokomotiven der Baureihe 232 mit neuen, verbesserten Motoren aus: So lassen sich die Emissions- und Lärmwerte noch einmal erheblich einschränken. Bis Ende 2003 werden wir … insgesamt 140 Loks remotorisieren«.[18] Das scheint wohl auch nötig gewesen zu sein (Bild 20).

2.5 Dabei hätte auch auf der Schiene der Diesel die Nase vorn, aber…

Vor etlichen Jahren wurde versucht, dem Schienengüterverkehr durch eine gewisse Dezentralisierung wieder auf die Beine (bzw. auf die Radsätze?) zu helfen: Damit die Schiene mit der Straße halbwegs mithalten und auch kleinere Kunden mit nur zwei- bis dreistelligen Tonnagen bedienen können sollte, wurde ein »Gütertriebwagen« entwickelt. Allerdings wurden nur 7 Stück solcher »Cargo-Sprinter« jemals gebaut und waren auch nach 10 Jahren wieder verschwunden. Das Modul bestand aus 5 Güterzugwagen, entsprechend der Ladekapazität von 5 LKW, ausgestattet mit 2 Führerständen und angetrieben von 2 LKW-Motoren. Das reichte für eine Regelgeschwindigkeit von 120 km/h statt der auf der Autobahn oftmals als störend empfundenen nur 80 km/h. Regulär verbraucht die Bahn im Güterverkehr nur 0,10 kWh/tkm gegenüber 0,38 kWh/tkm beim Lastwagen (und 0,13 kWh/tkm beim Binnenschiff). Das allein zeigt, dass die Eisenbahn bei Verbrauch, Abgas und anderen Umwelt-Belastungen per se schon glänzend abschneidet.[19]

2.6 Bahn-Physik – Teil 2

Tut sie? Sehen wir uns hierzu das einstmals so moderne Fahrzeug BR 612 näher an (Bild 19, Bild 21). Es besteht aus zwei gleichen Wagen, jeder mit einem eigenen Motor von nicht weniger als 560 kW Leistung ausgestattet. Das liegt irgendwo im Bereich eines Formel-1-Rennwagens – aber dies ist zum Glück auch schon das jähe Ende aller Gemeinsamkeiten, angefangen mit dem großzügigen Raum-Angebot mit 71 bequemen Polstersitzen je Wagen, einer Toilette und z. B. Platz genug für einige Fahrräder, weit entfernt von jeder Einschränkung der persönlichen Freiheit wie Helm- oder Gurtpflicht. Klimaanlage, Turbolader und Ladeluftkühler – hier zum Glück unhörbar – bedürfen nicht der Erwähnung.

Das dumpf blubbernde Motorengeräusch verbreitet einen Eindruck äußerster Gelassenheit, mit der die für einen Zug von lediglich 2 Wagen üppige Gesamtleistung von 1120 kW, etwa 1500 PS, die beträchtliche Masse von 2*49 t beschleunigt. Das rein hydraulische Getriebe ermöglicht einen äußerst sanften Anlauf und eine über den gesamten Geschwindigkeits-Bereich hinweg völlig ruckfreie, aber kräftige Beschleunigung. Diese allerdings fällt zugegebenermaßen doch ein wenig hinter die des Rennwagens zurück.

Bild 21: Schon nicht mehr ganz moderner Dieseltriebwagen der BR 612 – Komfort, Neigetechnik, üppige Motorisierung. »Wie viel läuft er denn?« Auch das steht dort. »Wie viel säuft er denn?« Das steht dort allerdings nicht

Ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h erreicht, murmeln die Motoren nur noch sanft vor sich hin. Um das Tempo zu halten, sind nur etwa 30% der Nennleistung erforderlich. Die volle Leistung wird ausschließlich zum Beschleunigen und für Steigungsstrecken benötigt. Da darf auch schon mal ein Motor ausfallen – der Triebwagen schafft sein Pensum auch mit einem noch. Unter Umständen hält er sogar den Fahrplan noch ein. Fast das Schlimmste daran ist, dass in dem dann antriebslosen Wagen auch noch die Heizung ausfällt – aus heutiger Sicht schon ein konzeptioneller Mangel.

2.7 Bahn-Physik – Teil 3

Dies bietet die Gelegenheit zu einer weiteren Wiederholungs-Lektion in Physik: Wie schnell schafft es denn der Triebzug noch bergauf, jetzt einmal angenommen, dass er – also mit einer Masse von nunmehr 2*54 t = 108 t – voll besetzt ist?

Eine Masse von 108 t entspricht einem Gewicht von annähernd 1120 kN. Da dank Verwendung der SI-Einheiten eine Leistung von

1 W = 1 Nm/s

ist, reicht eine Leistung von 1120 kW logischer Weise gerade haargenau aus, um ein Gewicht von 1120 kN mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s hochzuheben. Da die Höchstgeschwindigkeit

160 km/h ≈ 44,4 m/s

beträgt, könnte die BR 612 mit »Vollgas« eine Steigung von

1/44,4 = 22,5‰

gerade noch mit Höchstgeschwindigkeit hinauf fahren. Erst bei steileren Strecken fiele die Geschwindigkeit ab. Das ist zwar Theorie, da sich die Nennleistung auf den Motor bezieht und hiervon die nicht gerade vernachlässigbaren Verluste des Hydraulik-Getriebes und der Bedarf der Hilfsbetriebe (Strom, Druckluft, Hydraulik, sprich Neigetechnik) noch abzuziehen sind. Außerdem haben wir nun auf einmal die ≈ 30% der Motorleistung doppelt eingesetzt, die zur Überwindung der Reibung, also zum Halten der Geschwindigkeit auf ebener Strecke, doch schon notwendig waren. Wenn der Zug aber in der Lage ist, mit den verbleibenden ≈ 70% der Motorleistung eine Steigung von ≈ 15‰ mit 160 km/h hinauf zu fahren, ist das immer noch üppig – und klingt von innen wie außen, wie gesagt, überhaupt nicht wie »Vollgas«, sondern eher so, als leisteten die Motoren dies eher nebenbei! Wenn sich das Fahrzeug dazu noch sacht in die Kurve legt, verleiht all dies einfach ein gutes Gefühl.

Doch muss solch ein souveränes Fahrgefühl heute noch so viel kosten? Durstig ist das Fahrzeug nämlich schon! Die Tanks fassen jeweils um die 1000 Liter Dieselkraftstoff, und am Ende eines Arbeitstages sind sie weit gehend leer. Etwa 1,3 l/km bis 2,0 l/km muss man rechnen. Wie die Steigungen bei der Bahn in Promille statt Prozent gemessen werden, so bezieht man auch Kraftstoff-Verbräuche aus gutem Grund auf einen statt auf 100 Kilometer, sonst erschrickt man zu sehr, wenn man die Zahlen hört. Rechnen wir also einmal mit 140 Sitzplätzen und bescheidenen 1,4 l/km, dann macht dies einen Liter je Sitzplatz auf 100 km aus. Das 3-Liter-Auto wird also nur knapp verfehlt, wenn man es mit 4 (statt mit 3) Sitzplätzen rechnet – allerdings bei Tempo 160 und mit Neigetechnik und allerhand weiterem Komfort. Somit erweist sich die Bahn hier als günstiger, jedoch nicht gerade als haushoch überlegen. Vor allem häufiges Beschleunigen auf hohe Geschwindigkeiten ist schlecht für die Bilanz. Die Gesetze der Bahn-Physik Teil 1 sind schuld: Die Berechnung der kinetischen Energie ergibt sich beim voll besetzten Doppeltriebwagen BR 612 mit 108 t und der Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h plus 15% Aufschlag für rotierende Massen zu nicht weniger als 34 kWh. Bei einem durchschnittlichen Wirkungsgrad des Motors mit Getriebe von 33% während des Beschleunigens bedeutet dies einen Energie-Verbrauch von ≈ 100 kWh für einen Beschleunigungs-Vorgang! Ein Liter Dieselkraftstoff erbringt knapp 10 kWh, also verbraucht das Fahrzeug für einen einzigen Beschleunigungs-Vorgang von 0 auf 160 km/h etwa 10 Liter Kraftstoff! Das hört sich nach Handlungs-Bedarf an. Lässt sich hier wohl noch etwas tun?

2.8 Sparsam oder nicht sparsam, das ist hier die Frage

Offenbar schon. Der gute Teillast-Wirkungsgrad des Dieselmotors kommt beim »Murmeln« bereits voll zum Tragen, aber was ist denn nun, wenn das Fahrzeug sich dem nächsten Bahnhof nähert? Im Prinzip kann der Lokführer den Fahrhebel (das »Gaspedal«, das hier von Hand betätigt wird und beim Dieselmotor auch mit Gas nichts zu tun hat) schon einige Kilometer zuvor wieder auf 0 stellen. Wie schon gesagt: Das Fahrzeug rollt und rollt und rollt. Oft wird so ver- bzw. gefahren, aber noch nicht oft genug. Auch kuppelt das Hydraulik-Getriebe bei dieser Betriebsart praktisch aus, so dass die Motoren leer laufen und der – wenn auch beim Dieselmotor wiederum geringe – Leerlauf-Verbrauch verbleibt.

Dann muss gebremst werden. Der Retarder, eine verschleißfreie Bremse, die auf der Verwirbelung einer Flüssigkeit beruht, setzt genau so samtweich und geräuschlos ein wie das Hydraulik-Getriebe beim Anfahren. Doch nun ertönt wieder das dumpfe Dröhnen der hochlaufenden Motoren! Was ist das? Macht das hydraulische Getriebe einen »Schiebebetrieb« vielleicht doch irgendwie möglich? Nein. Man hat sich vielmehr gedacht, die Kühlung der Retarder-Flüssigkeit könne am einfachsten über den bestehenden Kühlmittel-Kreislauf der Fahrmotoren erfolgen, doch dazu muss das Kühlmittel auch hinreichend schnell umgewälzt werden. Deswegen wird die Leerlauf-Drehzahl angehoben, also zusätzlich Energie eingesetzt, um Energie vernichten zu können, denn eine Erhöhung der Leerlauf-Drehzahl ist natürlich mit einer entsprechenden Erhöhung des Leerlauf-Verbrauchs verbunden! Das mag nicht viel ausmachen, wirkt aber schon widersinnig. Besser hätte man etwas mehr Elektrik in das Dieselfahrzeug eingebaut und eine elektrische Kühlmittelpumpe eingesetzt. Noch ein wenig mehr – noch nicht einmal sehr komplizierter – Elektronik hätte eine bedarfsgerechte Steuerung ermöglicht und den zusätzlichen Energie-Bedarf zur Entsorgung der nicht verwendbaren Energie auf einen Bruchteil gemindert, denn nicht jede Bremsung dürfte bei jedem Wetter die beschleunigte Umwälzung erfordern. Schließlich kann bei einem angenommenen Motor-Wirkungsgrad von 33% beim Bremsen nur halb so viel Wärme anfallen wie beim Beschleunigen, da während der Tätigkeit des Motors zusammen mit $^1/_3$ mechanischer Energie $^2/_3$ thermische Energie erzeugt werden, die entsorgt werden muss.

Dies bedeutet auch, dass während solcher Bergauf-Fahrt oder während des Beschleunigens über 2000 kW an Wärme erzeugt werden. Damit könnte man 100 bis 200 Eigenheime beheizen! Jedenfalls, wenn der Motor ständig mit voller Leistung betrieben würde, wäre dies so – aber die zum Vergleich herangezogenen Häuser waren auch nicht als im Permafrost-Gebiet stehend angenommen. Der Vergleich bleibt also ein gültiger. Natürlich reicht es allemal dafür aus, dass es auch im tiefsten Winter im Fahrzeug immer schön warm ist. Allerdings, wie gesagt, rollt das Fahrzeug über einen wesentlichen Teil seiner Betriebszeit nur vor sich hin, von außen durch eine Art »Dauer-Kyrill« gekühlt. Das stellt hohe Anforderungen an die Heizleistung. Oder der Zug steht im Bahnhof. Da der Leerlauf-Verbrauch der Dieselmotoren gering ist, gilt dies entsprechend für die entstehende Wärmeleistung. Nun wird es eng mit der Heizung. Ein Wärmespeicher wäre eine Lösung, doch der brächte wieder viel zusätzliches Gewicht mit ins Fahrzeug – mit den logischen Folgen für Fahrdynamik und Verbrauch, auch im Sommer, wenn diese Einrichtung nutzlos mit herum geschleppt würde. Statt dessen gibt es zusätzlich eine Ölheizung und einen Tank für Heizöl. Was man wo einfüllt, ist allerdings egal (Bild 22). Leider beschränkt sich der Gebrauch der Ölheizung nicht nur auf die wenigen Situationen, wo dies angebracht ist, etwa zum Vorheizen der Wagen – und auch der Motoren – vor der Fahrt. Die Nutzung von Abwärme ist bei der Diesellok nicht möglich, findet aber auch beim Dieseltriebwagen wegen technischer Probleme nicht immer statt. So wird mitunter während der Fahrt zusätzlich Heizöl verheizt, während der Kühler kühlt und zeitweise unter Einsatz zusätzlichen Kraftstoffs zusätzlich Bremsenergie entsorgt. Sicher ist auch dies rechnerisch immer noch annähernd 3 Mal besser als das Verheizen von Diesel-

strom in der Diesellok (Abschnitt 2.3). Das Konzept muss aber aus einer Zeit stammen, als Erdöl noch für ein Almosen verteilt wurde und das CO_2 als öffentlichkeitswirksames Thema noch nicht erfunden war.

Bild 22: Dieselkraftstoff und Heizöl sind chemisch identisch – fiskalisch nicht unbedingt, aber bei der Bahn wird Dieselkraftstoff alternativ…

Bild 23: …und seit 2012 obligatorisch auch verheizt

Derweil stellt das Konzept der elektrischen Heizung aber auch erhebliche Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Antriebs. Mehrfach schon wurde von Eisenbahnern – ob nun realistisch oder spöttisch übertrieben – die Doppeltraktion bei Diesel getriebenen Reisezügen kommentiert mit: »Eine Lok zum Ziehen und eine zum Heizen!« (s. a. die Anmerkung zur Nennleistung in Abschnitt 5.1).

Auch das Konzept der rein hydraulischen Kraft-Übertragung ist ein Tribut an den Luxus, denn während man beim PKW schon lange die Schubabschaltung nutzt, die im »Schiebebetrieb« – wenn das Fahrzeug den Motor und nicht der Motor das Fahrzeug antreibt – den Leerlauf-Verbrauch abschaltet, setzen bei der Bahn die Baureihen 611, 612, 640 – wie schon all ihre Vorgänger (BR 628) – ganz auf den durchgehend ruckfreien Betrieb mit voll hydraulischen Drehmomentwandlern, die beim Rollen und beim Bremsen die Motoren vollends auskuppeln. Schiebebetrieb tritt nicht auf. Die neueren Nahverkehrs-Triebwagen der Baureihen 630, 632, 633, 643 und 648 (Bild 22) gehen hier einen anderen Weg und nutzen eine Kombination aus einem »strafferen« hydraulischen Wandler mit geringem Wandelbereich und einem automatischen Schaltgetriebe, das sich in dieser Hinsicht fast genau so fährt wie das im PKW zuerst von Volkswagen angebotene »Direkt-Schaltgetriebe«. Dieses bleibt beim Rollen des Fahrzeugs ebenso wie während des Bremsens eingekuppelt, so dass

1. die Schubabschaltung wirksam wird,
2. sich das beschleunigte Umwälzen des Kühlmittels, sofern überhaupt noch erforderlich, ganz von selbst einstellt,
3. alle vom Motor erzeugte Hilfsenergie nun während des Rollens und des Bremsens aus der kinetischen Energie gedeckt wird, einschließlich des Stroms für eventuelle elektrische Kühlmittelpumpen, Hydraulik, Pneumatik, Klimaanlage und – wo vorhanden – Neigetechnik, Wirbelstrombremse und Magnetschienenbremse.

So wird die Bremsenergie zu einem kleinen Teil sogar noch genutzt statt zu deren Vernichtung noch einmal etwas Energie aufwenden zu müssen. Selbst in einigen PKW-Modellen wird diese Technik inzwischen schon angeboten, obwohl sie dort fast nichts nützt, aber viele Körnlein ergeben eben doch auch einen Haufen (vor allem aber darf sich diese Technik im PKW schon »Mikro-Hybrid« nennen und ist damit etwas Tolles). Da der Motor eines Dieseltriebwagens anderenfalls gut 70% seiner Betriebszeit im Leerlauf zubringt, ist das Prinzip der

vielen neueren Triebwagenzüge, z. B. der Baureihen 630, 632, 643 und 648, schon merklich sparsamer. Das Rucken der Gangschaltung hingegen hält sich sehr in Grenzen, da die Automatik sehr schnell schaltet und da auch diese Fahrzeuge über mindestens zwei (BR 630 drei) Motoren verfügen, die aber unabhängig voneinander über je ein Automatik-Getriebe je ein Drehgestell antreiben und zeitversetzt schalten.

3 Überlegen: Elektrische Zugförderung

Man kann sich also lange den Kopf darüber zerbrechen, ob man die Kraft besser mit höchstem Komfort hydraulisch überträgt, oder ob man besser ein reines Schaltgetriebe mit optimaler Energie-Effizienz wie beim guten alten Schienenbus der Baureihen 795 und 798 einsetzt und dafür »suboptimale« Fahreigenschaften in Kauf nimmt. Man kann sich auch jeden erdenklichen Kompromiss hieraus ausdenken, wie sie z. B. in den Baureihen 630, 632, 643 und 648 im Einsatz sind. Man kann auch das »Kupferbergwerk« einer dieselelektrischen Kraft-Übertragung mit sich herum schleppen.

Bild 24: Die Motoren haben sich gewandelt, das Konzept ist geblieben, ob beim alten Reihenschlussmotor z. B. der BR 110…

Bild 25: …oder mit modernen Drehstrommotoren, z. B. im ICE2: Ein Motor pro Achse, einstufiges Zahnrad-Getriebe, keine Kupplung, keine Gangschaltung!

Oder man streicht den Dieselmotor, zieht einen Fahrdraht über dem Gleis entlang und betreibt die Fahrzeuge mit Strom aus dem Netz! Zum Glück fahren Eisenbahnen auf einer Bahn aus Eisen, wie der Name sagt, so dass ein Rückweg für den Strom von vornherein gegeben ist. Eisen ist nicht der optimale elektrische Leiter, aber der Querschnitt der Schienen ist hinreichend groß, um dem Fahrleitungsdraht aus Kupfer ebenbürtig zu sein, also kein Problem! Dann kann man die ganze Debatte über die Kraft-Übertragung vergessen. Ein einstufiges – manchmal zweistufiges – fixes Übersetzungsgetriebe genügt, denn der Elektromotor vereint sehr gute Wirkungsgrade von deutlich über 90% mit optimalen Eigenschaften für den Fahrzeug-Antrieb:

- Höchstes Drehmoment im Stillstand – keine Kupplung, kein Schaltgetriebe, kein Drehmomentwandler erforderlich,
- kurzzeitige Überlastbarkeit – höheres Beschleunigungs-Vermögen als die Nennleistung erwarten lässt (Stichwort »Stundenleistung« bei Lokomotiven),
- kein Leerlauf-Verbrauch im Stillstand, beim Rollen und Bremsen
- und vor allem die Umkehrbarkeit des Prozesses, Generatorbetrieb beim Bremsen

machen den elektrischen Antrieb unter all den zuvor dargelegten Aspekten zur nahezu idealen Lösung gerade für Bahnfahrzeuge. Schon die alten Reihenschlussmotoren der Schaltwerksloks glänzten durch robuste Bauform, hohe Leistungsdichte und eine dem Bahnbetrieb auf den Leib geschneiderte Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie. Da diese Motoren aber vom Aufbau her Gleichstrommaschinen sind, die nur deshalb auch mit Wechselstrom laufen, weil derselbe Strom nacheinander – also ohne Phasenverschiebung – sowohl durch die Erregerwicklung als auch durch den Anker fließt und die zweimalige Umpolung der Magnete

sich somit aufhebt, erzeugen sie beim Bremsen Gleichstrom. Dieser lässt sich nicht in die Oberleitung zurück speisen und muss über Bremswiderstände absorbiert werden. Später hätte man diese Lokomotiven zusätzlich mit einem Umrichter nachrüsten können, der den Gleichstrom in Wechselstrom von 16,7 Hz umwandelt, doch war das bei 30 bis 40 Jahre alten Fahrzeugen nicht mehr wirtschaftlich. Dann kauft man lieber nach und nach neue.

Denn bereits seit 1980 befindet sich die BR 120, die weltweit erste mit »synthetischem« Drehstrom betriebene Lokomotive, bei der DB im praktischen Einsatz: Ein leistungselektronischer Umrichter verwandelt den Wechselstrom aus der Fahrleitung in Gleichstrom und den Gleichstrom sodann in Drehstrom. Dessen Spannung und Frequenz lassen sich unabhängig voneinander in weiten Grenzen stufenlos verstellen. Der Strom lässt sich begrenzen. Dem Drehstrom-Asynchronmotor kann daher nahezu unabhängig von der ihm eigenen Charakteristik praktisch jede andere Charakteristik aufgezwungen werden. Das Wichtigste ist: Er kann auch als Generator betrieben werden. Ein Elektromotor und ein Generator sind im Prinzip dasselbe. Der größte Teil der zum Beschleunigen oder auf Steigungsstrecken aufgewendeten Energie kann so beim Verzögern bzw. bei Talfahrt wieder zurückgewonnen werden.

3.1 Theorie und Praxis

Jedenfalls im Prinzip ist das so. Die Praxis zeigt leider allzu häufig, dass unser oben genannter IC-Zug aus einer Lokomotive der BR 120 oder der moderneren Nachfolgerin BR 101 und 9 Reisezugwagen überraschend zum Bremsen gezwungen wird oder der Fahrplan – bzw. des Lokführers Bestreben, ihn wieder einzuholen – das sanfte Bremsen über nur 4 von 40 Achsen nicht gestattet. Der ganze Zug muss beitragen. Der Geruch von heißen Bremsbelägen zeugt davon. Tatsächlich konnte die Lok wieder einmal nur einen kleinen Teil der kinetischen Energie zurück gewinnen. So wird (in »statistisch ausgewählten Messwerten«, also keiner vollständigen Erhebung)[20] für die BR 120 eine Rückspeisequote von nur 6,4% angegeben. Die BR 101 bringt es immerhin auf 9,3%.

Das ist leider an der Tagesordnung, auch im Nahverkehr, wo moderne Doppelstockwagen mit einer modernen Umrichter gesteuerten Lokomotive wie der BR 146 auf einer traditionellen Strecke verkehren. Zwar wird für die BR 146 eine zunächst erfreulich wirkende Rückspeisequote von 18,6% angegeben, doch vergleichen wir dies einmal mit dem theoretischen Potenzial und lassen einen solchen Zug mit 5 Wagen von Aachen nach Dortmund fahren. Der Zug wiegt etwa 300 t, fährt in der Regel 140 km/h schnell und hält auf der Strecke 22 Mal. Zwei Stationen lassen wir unberücksichtigt, weil es sich um Stadtteile von Aachen handelt und dazwischen sicher nicht die volle Geschwindigkeit erreicht wird. Dann verbraucht der Zug allein für die 20 Beschleunigungs-Vorgänge etwa 1600 kWh – die, wie klar geworden sein sollte, den Löwenanteil des gesamten Energie-Verbrauchs ausmachen. Allein zur Überwindung der Reibungswiderstände, führe der Zug die gesamte Strecke konstant mit 140 km/h, wäre nur knapp halb so viel aufzuwenden. Tatsächlich ist es noch weniger, da der Zug – leider – bei Weitem nicht dauernd so schnell fährt und die Luftreibung im Quadrat zur Geschwindigkeit steigt. Führe nämlich der Zug die Strecke zwar ohne Halt, aber in der im Fahrplan vorgesehenen Zeit – also konstant mit seiner Durchschnittsgeschwindigkeit von 53 km/h – so fiele der Energiebedarf zur Überwindung der Reibungswiderstände noch einmal um mehr als die Hälfte. Zur Beschleunigung ist also – je nach dem, wie man es sieht – gut doppelt so viel bzw. fast die fünffache Energie aufzuwenden wie zum »eigentlichen Fahren«. Im Idealfall werden von diesem größeren Anteil des Energie-Verbrauchs beim zweimaligen Durchlaufen des gesamten Antriebsstrangs mit dem in Abschnitt 1.3.2 erwähnten Wirkungsgrad von jeweils 87% also insgesamt 75% zurück gewonnen. Sind es im realen Fall vielleicht nur 25%, so ergibt dies einen Unterschied von 800 kWh zwischen

Optimum und Realität. Beim Niedertarif nach Bild 17 in Abschnitt 1.3.2 macht dies 60 €, zur Hochtarifzeit fast 70 € je Fahrt aus.

Die Frage, wer sich den »Gewinn« einsteckt, wenn Strom von einer DB-Lok in eine andere DB-Lok fließt, müssen die Betriebswirte der DB Energie untereinander klären. Die Antwort liegt wahrscheinlich in den Privatbahnen, die ebenfalls Strom aus dem DB-Netz entnehmen und nach Verbrauch abrechnen. Die Fahrzeuge sind mit geeigneten Stromzählern ausgerüstet, die Verbrauch und Rückspeisung getrennt erfassen, denn es kann nicht angehen, dass ein Nutzer ein fremdes Netz – zuerst zum Verbrauch und dann zum Rückspeisen – zwei Mal nutzt und unter dem Strich nichts dafür bezahlt.[21] Das wäre gerade so, als bekäme man die Maut für beide gefahrene Strecken erstattet, wenn man dieselbe Strecke hin und zurück fährt. Nun waren allerdings die Tarife für die Rückspeisung anfangs als Motivation zum Rückspeisen nicht sonderlich geeignet (Bild 26, Tabelle 3) – bis die Bundesnetzagentur hier einschritt.[22]

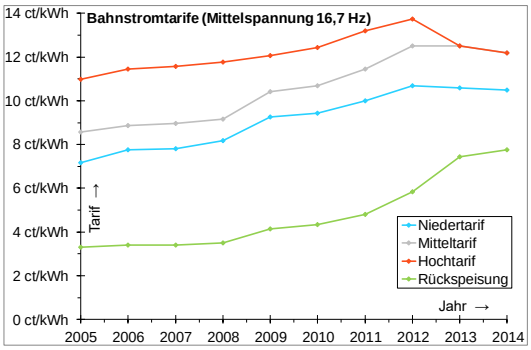


Bild 26: Bahnstromtarife (Bundesnetzagentur)

	von	bis
Hochtarif	5:30	9:00
	16:00	0:00
Mitteltarif	9:00	16:00
	19:00	22:00
Niedertarif	0:00	5:30
	22:00	0:00

Tabelle 3: Dies ist unter den Tarifen in Bild 26 zu verstehen

Seit 2014 ist auch der Bundesnetzagentur eine derartige Aufstellung nicht mehr möglich, da die Bahnstromtarife sich nunmehr in einen (eigentlichen) Strompreis und eine Netznutzungsgebühr gliedern, was die Sache beträchtlich verkompliziert. So viel zur Erklärung der unterschiedlichen Tarife für »frischen« und »gebrauchten« Strom – obwohl doch der Strom immer »neuwertig« beim Verbraucher ankommt – und damit zurück zu den Kosten, Preisen und Einspar-Potenzialen unseres Regionalzuges bei der Rückspeisung:

Bei 6 Fahrten pro Tag kommen 370 €, bei 300 Verkehrstagen im Jahr 111 000 € zusammen. Auch könnte man den Standpunkt beziehen, wenn dieselbe Gesellschaft, die den Strom erzeugt, ihn auch verbraucht, müsse für rückgespeiste Energie derselbe Preis angesetzt werden wie für den Verbrauch, da es sich unter dem Strich um eingesparten Verbrauch handelt. Doch wie auch immer man rechnet, könnte der optimale Einsatz der (nun schon einmal eingebauten und somit bezahlten!) Spartechnik gegenüber deren geschätztem gegenwärtigem, suboptimalem Gebrauch über das voraussichtlich 30 Dienstjahre währende Leben der Lok also über 3 Millionen Euro einsparen – wenn nur die Technik rund herum jener in der Lok entspräche und angemessen ausgelegt wäre. Insgesamt, so lässt sich hiermit schätzen, könnte die Rückspeisetechnik im Laufe der Dienstzeit der Lok etwa so viel einsparen wie die ganze Lok gekostet hat – die **ganze** Lok und nicht etwa nur der Mehrpreis dieser Spartechnik! Dabei wurde mit Energiepreisen von 2014 gerechnet, weil neuere zur Zeit offenbar nicht zu bekommen sind, und nur die Energiekosten berücksichtigt, nicht der eingesparte Verschleiß an Bremsscheiben und Bremsbelägen (Bild 27).

3.2 Plant die Bahnen mit Verstand: Neue Züge braucht das Land!

Der oben beschriebene Zug benötigt also knapp ein Drittel seines gesamten Energie-Verbrauchs zur Überwindung der Reibung und gut zwei Drittel für die Beschleunigungen. Von diesen zwei Dritteln könnten theoretisch drei Viertel zurück gewonnen werden. Damit müsste der Zug zwischen Dortmund und Aachen gut halb so viel Energie ins Netz speisen wie er insgesamt von dort bezogen hat. Tatsächlich aber berichtet DB Regio für 2017 eine Rückspeiserate von nur 20%[23] (der aufgenommenen elektrischen Energie laut Stromzählern in den Loks). Wo aber bleiben die anderen 30%? Das bestehende Potenzial ist bislang offensichtlich nur zu $^2/_5$ ausgeschöpft. Rückspeiseleistung wird offensichtlich ein Bisschen wie Fallobst behandelt: Schön, wenn man zufällig darauf stößt, aber wenn nicht, dann eben nicht. Warum ist das so?

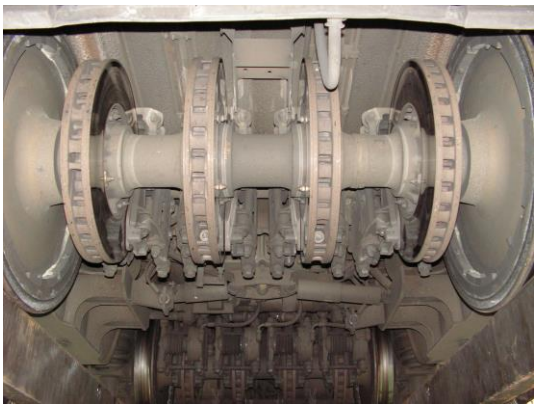


Bild 27: Zupackend und wartungsintensiv: Scheibenbremsen im ICE2 – doch ihr Gebrauch ließe sich durch optimale Infrastruktur minimieren

Bild 28: Gehört in jeden Führerstand, nicht nur in den der BR 402: Ein Zugkraft-Messgerät (links), doch der Bereich reicht wesentlich weiter ins Negative als ins Positive, denn bremsen können alle Achsen – und tun es auch noch immer zu oft

Nun, wenn bei einem Reibungskoeffizienten von 0,35 (bei Nässe weniger, in Verbindung mit Herbstlaub noch weniger) nur 84 t von insgesamt 300 t auf den Antriebsrädern (Antriebsachsen oder, bahntechnisch korrekt, »Radsätze«) liegen, muss die Nutzbremsung aber zwangsläufig ein Teil-Erfolg bleiben, oder die Bremsung müsste dermaßen früh eingeleitet werden, dass der Fahrplan hierfür mehr Luft ausweisen müsste. Im Klartext: Die Verbindung mit 20 Zwischenhalten würde langsamer. Dies liegt weder im Interesse der Bahn noch ihrer Fahrgäste. Die Haftgrenze ist aber der kritische Faktor bei der Traktion, und ein Zug kann daher unter voller Ausnutzung der generatorischen Bremsung prinzipiell nicht stärker bremsen als derselbe Zug auch beschleunigen kann, selbst wenn alle heute vorhandenen Vorkehrungen, die zur besseren Beschleunigung beitragen, wie etwa stufenlose, ruckfreie Regelung und Schleuderschutz, im Einsatz sind und die unsägliche Begrenzung der Nutzbremskraft auf 150 kN endlich entfiele, von der niemand sagen kann, wozu diese Grenze jemals eingeführt wurde und ob die Begründung heute noch besteht. Zum Glück wurde sie – wenigstens theoretisch – mittlerweile auf 240 kN erhöht. Praktisch gefahren, berichtet ein Fachmann, würde sie bei den SBB, aber beim Überfahren der Grenze wieder zurückgesetzt.

3.3 Zwischenbemerkung zu den Fachausdrücken

Fachsprachen sind nützlich; klingt doch »Radsatzwellenschaden« gleich etwas weniger gefährlich als »Achsbruch«. Das ist aber nur das Eine. Viele Ausdrücke der Allgemeinsprache

kommen darüber hinaus in spezifischen Fachsprachen nicht vor, weil es das Beschriebene in dem betreffenden Fachbereich nicht gibt. Manchmal werden diese Ausdrücke aber auch mit einer neuen, fachsprachlichen Bedeutung belegt. Den »Taubenschlag« hatten wir schon im Abschnitt 1.2. Auch werden bei der Bahn zwar keine Hosen, wohl aber Züge »aufgebügelt«, also der Stromabnehmerbügel hochgefahren. »Bogenschnell« durchfahren Neigetriebzüge jetzt mitunter wieder die Kurven, also schneller als für konventionelle Fahrzeuge zugelassen (zwischenzeitlich gab es dagegen – wegen technischer Probleme – wenn überhaupt, dann nur eine »Komfortneigung« ohne erhöhte Geschwindigkeit). Auch kann ein Schienenfahrzeug im herkömmlichen Sinn nicht schleudern. Der Ausdruck »schleudern« wird daher für eine neue Verwendung frei und bezeichnet im Bahnjargon das Durchdrehen der Antriebsräder – und somit, wie gesagt, eine äußerst kritische Traktionsgröße. Moderne Triebfahrzeuge sind in der Regel mit einem »Schleuderschutz« ausgestattet, vom PKW her als ASR (Anti-Schlupf-Regelung) bekannt. Diese nimmt sofort das auf eine Achse einwirkende Antriebsmoment zurück, sobald deren Drehzahl über die der anderen Achsen ansteigt. Natürlich ist der Schleuderschutz bei allen elektrischen Fahrzeugen mit Nutzbremsung auch umgekehrt aktiv und wirkt also beim Bremsen als ABS, bei der Bahn »Blockierschutz« genannt. Eine graduelle Verbesserung der Beschleunigung und somit auch der Nutzbremsung hat der elektronisch gesteuerte Schleuderschutz insofern gebracht, als immer an der Haftgrenze der Gleitreibung gefahren werden kann, wo bislang das Feingefühl des Lokführers gefragt war – mit den zwangsläufigen Sicherheitsmargen und Reaktionszeiten. Eine Möglichkeit der separaten Beeinflussung einzelner Achsen war ihm auch nicht gegeben, sondern lediglich der Überwachung der Motorströme (Bild 7). Wenn eine Achse ins Schleudern geriet, musste die speisende Spannung aller Fahrmotoren zurück gestuft werden. Das ist heute besser, wo ein Umrichter nur ein bis zwei Motoren speist. Der Nutzen der Rückspeise-Fähigkeit moderner Elektrolokomotiven bleibt aber leider in der heutigen Praxis noch begrenzt.

3.4 ICE – der ultimative Zug?

Auch die Geburt der ICE-Züge, die 1991 den fahrplanmäßigen Verkehr aufnahmen, brachte hier noch keinen Quantensprung.[24] Der ICE1 wurde als Triebzug relativ großer, aber variabler Länge mit zwei Triebköpfen konzipiert. Dies ist noch kein echter Triebwagen, sondern entspricht eher einem Zug mit einer integrierten, nur zu diesem Wagentyp passenden Lokomotive an jedem Ende. Entsprechend erhielten die Triebköpfe die Baureihen-Bezeichnung 401 und die Wagen die Nr. 801 (siehe Abschnitt 2.1), und die Fahrdynamik unterschied sich unwesentlich von der eines konventionellen, Lok bespannten Zuges. Schließlich werden auch diese bei entsprechender Länge unter Umständen mit zwei Lokomotiven ausgestattet.

Das als ICE2 bekannte Nachfolgemodell der BR 402 / 802 ist kürzer und hat nur einen Triebkopf. Am anderen Ende wird ein Steuerwagen mitgeführt. Von ferne lässt sich dieser Zug vom Vorgänger unterscheiden, weil der »Buckel« auf dem Speisewagen nun entfallen ist. Der Einsatz erfolgt zum Teil als »Flügelzug«[25], also als Doppelzug, der an einem bestimmten Bahnhof im Verlauf der Strecke getrennt wird, z. B. von Berlin (fahrplanmäßig mit 250 km/h) kommend in Hamm. Der eine Zug bedient die Ruhrgebietsstrecke über Dortmund, Bochum, Essen und Duisburg nach Düsseldorf und der andere die parallele Hauptstrecke über Hagen, Wuppertal und Solingen nach Köln. Dies macht den Einsatz flexibler, aber unser Quantensprung[24] hinsichtlich der Fahrdynamik und der Energie-Effizienz ließ noch immer auf sich warten.

Dieser ging im Jahr 2000 in Form des ICE3, des Triebzuges der BR 403, in Betrieb, eines echten Triebwagenzuges ohne Lokomotive oder Triebkopf und mit einer fixen Länge von 8 Wagen. Der Antrieb und sämtliche für den Betrieb erforderliche Komponenten sind unterflur angebracht. Es gibt 2 Trafowagen, die je einen Bahntransformator beherbergen, 2 Umrichterwagen und 4 Motorwagen mit je 4 auf je eine Achse wirkenden Drehstrom-Fahrmotoren zu je 500 kW Nennleistung. Obwohl 4 Wagen nicht direkt über einen Antrieb verfügen, werden auch diese als BR 403 bezeichnet, denn der Zug bildet eine feste Einheit, und auch diese 4 Wagen beinhalten für den Antrieb erforderliche Komponenten. Bei den Baureihen 401/801, 402/802 und neuerdings der BR 412/812 (siehe unten Abschnitt 3.6) ist das anders.

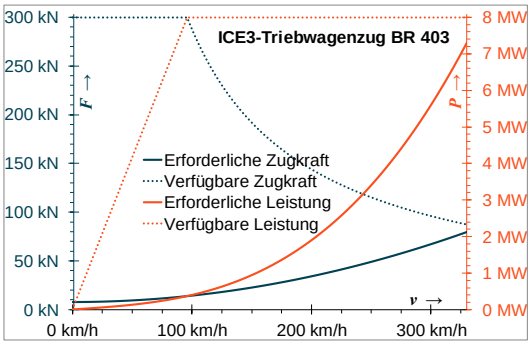


Bild 29: Erst ein ICE3-Triebzug erreicht mit 330 km/h eine Reisegeschwindigkeit, zu deren gleichförmigem Fahren die verfügbare Antriebsleistung von 8 MW weit gehend ausgeschöpft werden muss

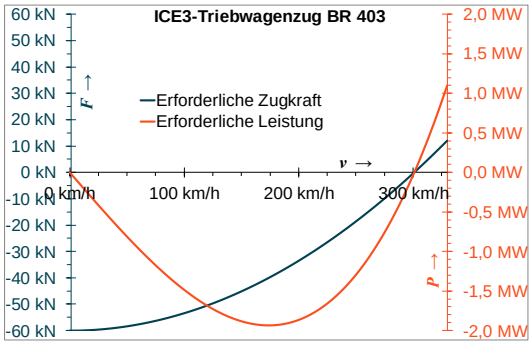


Bild 30: Ein Gefälle von 15‰ (nur 1,5%!) ohne Antrieb und ungebremst herunter rollend, würde der ICE3-Triebzug (nach Stunden) eine Endgeschwindigkeit von 300 km/h erreichen

Das 32-achsige Fahrzeug hat also 16 einzeln angetriebene Achsen und eine Antriebsleistung von insgesamt 8 MW – und nicht nur das, sondern der Zug verfügt auch über 16 Umrichter mit 16 separaten Regel-Einrichtungen. Dieser Aufwand hat sich allerdings als unverhältnismäßig teuer erwiesen, und zukünftige Versionen werden wieder wenigstens jeweils 2 Achsen zwar mit 2 Motoren, aber nur einem Umrichter antreiben, denn der Einsatz von Asynchronmotoren kann über den Schlupf zumindest einen sehr geringfügigen Unterschied im Abnutzungsgrad der Räder ausgleichen. So wie der Einsatz permanent erregter Synchronmotoren fortschreitet, wie sie für Triebwagenzüge allmählich üblich werden, müssten von einem gemeinsam gespeisten Stromrichter gespeiste Motoren so streng synchron laufen als wären sie über Zahnräder gekuppelt.

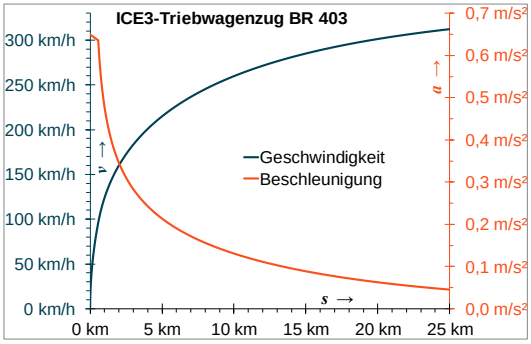


Bild 31: Beschleunigung eines ICE3-Triebzuges über der gefahrenen Strecke

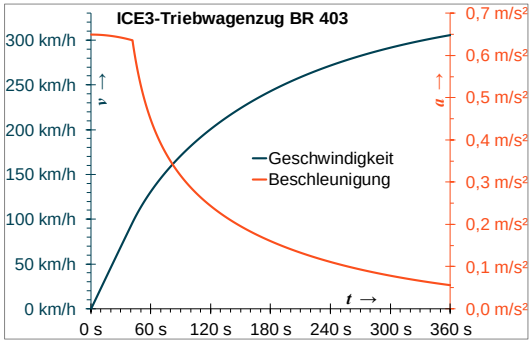


Bild 32: Beschleunigung eines ICE3-Triebzuges über der Fahrzeit

Entsprechendes gilt für das »Schwestermodell«, die BR 406, die der BR 403 äußerlich und innerlich gleich ist, jedoch über die Fähigkeit verfügt, ausländische Stromsysteme mit 1,5 kV Gleichspannung, 3 kV Gleichspannung sowie 25 kV Wechselspannung mit einer Frequenz von 50 Hz aus dem öffentlichen Netz – einem sehr verbreiteten Bahnstromsystem – zu verdauen. Mithin verfügt dieser Zug über mehrere Stromabnehmer (das einzige äußerliche Unterscheidungsmerkmal) und die Leittechnik und Zulassungen für Fahrten ins Ausland.

3.5 Plant die Strecken mit Verstand: Neue Gleise braucht das Land!

Wie auch immer – neue Züge allein bringen keinerlei Fortschritt, wenn ihnen die vorhandene Infrastruktur nicht gerecht wird. Da das Wort »Bahn« für ein Fahrzeug ebenso stehen kann wie für den Fahrweg, auf dem es fährt, wird schon klar, dass das »System Bahn« ganzheitlich betrachtet werden muss.

3.5.1 Fernverkehr

Erst wenn er auf die »Rennbahn«, die Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Köln und Frankfurt(M), entlassen wird, zeigt der moderne Zug dann, wie Eisenbahn fahren heute eigentlich sein sollte. Hier verkehrten bis 2018 ausschließlich ICE3-Triebzüge, und diese zumeist in Doppeltraktion als 400 m lange, 820 t schwere und entsprechend bis zu 16 MW aus der Oberleitung beziehende Züge mit 16 Wagen und gut 800 Sitzplätzen – die oft genug noch nicht einmal ausreichen, um die Nachfrage zu befriedigen. Die höchstzulässige Geschwindigkeit von 330 km/h verleiht dem Begriff »Hochgeschwindigkeitszug« neue Dimensionen, doch das ist nicht das Wichtigste. Sanft gleitend, noch ehe der gemeine Fahrgast es überhaupt wahrnimmt, aber dennoch um Klassen kräftiger als jeder IC-, ICE1- oder ICE2-Zug beschleunigt das Fahrzeug bis auf seine fahrplanmäßige Geschwindigkeit von 300 km/h. »Wie schnell mögen wir jetzt wohl sein?« fragte die neue Mitfahrerin, »180?« Dann fällt ihr Blick auf die Anzeige im Wagen: »299 km/h« steht dort. »Was, so viel? Das merkt man ja überhaupt nicht!«

Die dicken Leiterseile, die man parallel zur Fahrleitung aufgehängt hat, legen beredtes Zeugnis davon ab – nein, nicht davon, wie viel Strom hier verbraten wird, sondern in erster Linie, wie viel Strom hier von einem Zug zum anderen hin und her geschoben wird, damit »der Laden läuft«. Eigentlich sollten sie immer so dick sein – nicht nur, um die Temperatur und die Betriebsspannung im Fahrdraht beim gleichzeitigen Beschleunigen oder Bremsen mehrerer Züge innerhalb zulässiger Grenzen zu halten, sondern auch, um die hiermit verbundenen Energie-Verluste zu reduzieren. Unter Umständen rechnet sich das auch auf anderen, nicht ganz so stark und so schnell befahrenen Strecken. Bei den Niederländischen Staatsbahnen[26] wurde dies vor Jahren schon untersucht[27, 28], steht verschiedentlich immer wieder zur Diskussion und erregte u. a. an der TU Wien und bei einer Firma in Österreich[29] großes Interesse.

Die meisten Züge halten noch ein Mal im »Kunstbahnhof« Siegburg / Bonn. Einige fahren die gesamte Strecke bis Frankfurt Flughafen Fernbahnhof ohne Halt – 180 km in 48 Minuten! Der Routenplaner errechnet für die Autobahn auf dieser Strecke die doppelte Zeit. So sieht das dann auch aus, wenn der Blick auf die parallel verlaufende Autobahn einmal frei wird: Die Straßenfahrzeuge scheinen allesamt mehr oder weniger zu stehen.

Manche Züge fahren noch einen Schlenker über den Flughafenbahnhof Köln / Bonn und nehmen im weiteren Verlauf auch noch die anderen »Kunstbahnhöfe« Limburg Süd und Montabaur mit, die hier inmitten der grünen Wiese speziell für diese Strecke errichtet

wurden. Das kostet einen Doppelzug rund 2500 kWh allein für die Beschleunigungs-Vorgänge. Ein teurer Spaß wäre das, könnte davon nicht das Meiste beim Bremsen wieder ins Netz zurück gegeben werden. Doch gerade dafür ist diese Neubaustrecke optimal eingerichtet: Sehr große Kurvenradien, im Zweifel lieber Brücken oder Tunnel, koste es, was es wolle, aber das Fahrgast-Aufkommen zeigt, dass die 6 Milliarden Euro schwere Investition[30] sich lohnt! Die Journalisten, die so gern dieses »Prestige-Objekt« als »Fehlinvestition« geißeln, kennen es offenbar nur von außen. Ihnen sei eine Probefahrt am Montagmorgen oder Freitagnachmittag angeraten – jedoch verbunden mit der dringenden Empfehlung, sich frühzeitig eine Platzkarte zu besorgen, sonst endet der Versuch mit einer Stehpartie! Bei täglich 50 Verbindungen je Fahrtrichtung, großenteils mit Doppelzügen, kommen jährlich fast eine Milliarde Euro in die Kasse.

Sowohl die Baureihen 401 und 402, die immerhin in 2011 eine Rückspeisung von 13% der aufgenommenen Energie berichteten,[20] als auch beispielsweise die französischen TGV sind gegen die ICE3-Züge der BR 403 / 406 / 407 vom Konzept her schon veraltet; stellt doch derselbe Bericht für diese Baureihen nicht weniger als 17,4% Rückspeisung fest – und dies, während sie auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke Frankfurt(M) - Köln selten halten, was das Sparpotenzial absolut schmälert, und mit sehr hoher Geschwindigkeit fahren, was den Energieverbrauch für die Luftreibung beträchtlich steigert und so das Sparpotenzial relativ noch einmal in den Keller zieht. Andererseits aber, heißt es in dem Bericht, sei die Strecke auch reich an Steigungen und Gefällen, an einer Stelle z. B. mit einem unmittelbaren Übergang von 40‰ Gefälle auf 40‰ Steigung. Selbst bei 300 km/h jedoch könne auf dem Gefälle nur die Hälfte der Hangabtriebskraft zum Vortrieb genutzt werden; der Rest werde über die Fahrmotoren aufgenommen und zurück gespeist! Dies deckt sich mit den in Abschnitt 6.2.1 ausgeführten Berechnungen. Die Strecke ist also mit Verstand gebaut – auch mit den steilen Steigungen.

Während dessen jedoch wurden die ICE-Züge der ersten und der zweiten Generation für weitere 15 Dienstjahre komplett überholt. Solche Züge sind sehr teuer und müssen laufen und laufen und laufen, damit sich die Sache lohnt. 15 Millionen Kilometer (warum sagt eigentlich niemand »15 Gigameter«?) dürften sie bei der Ausmusterung nach mindestens 30 Jahren hinter sich haben. Eine Investitionspolitik »von der Hand in den Mund« wäre hier falscher als sonst irgendwo. Zum Glück sind die Weichen bei der DB AG heute richtig gestellt. Dass beispielsweise die Rückspeisefähigkeit bereits seit 30 Jahren in die Elektrolokomotiven eingebaut wird, auch wenn und obwohl sie vielleicht anfangs nur begrenzten Nutzen brachte und bringt, ist in Anbetracht der langen Nutzungsdauer dieser Maschinen genau das richtige Signal. Weitsichtiger geht es nun wirklich nicht mehr.

Bedauerlicher Weise gibt es bislang nur sehr wenige Strecken, die ganz und gar auf die neuen Fahrzeuge abgestimmt sind und umgekehrt, denn hierbei handelt es sich um Mammut-Projekte. Bekanntlich arbeitet die DB AG zur Zeit heftig daran, dieses Angebot auszuweiten. Um in Deutschland auch die bestehenden Strecken etwas aufzupeppen und besser auszunutzen, wurden ergänzend die Neigezug-Triebwagen ICE-T entwickelt, die 7-teilige BR 411 und die 5-teilige BR 415, die mit ihrer Höchstgeschwindigkeit von 230 km/h gern als Kombipack mit zusammen 12 Wagen auftreten und das gleiche Ambiente wie die ICE3-Züge bieten.

3.5.2 Vor allem neue Bahnhöfe bräuchte das Land

Die Züge durchfahren die Bahnhöfe schnurgerade und mit unverminderter Geschwindigkeit, was bei traditionell gewachsenen Bahnhöfen vollkommen illusorisch wäre. Die Züge, die hier anhalten, fahren frühzeitig in sehr sanften Bögen vom Durchfahrtgleis ab und halten an der

Seite in gehörigem Abstand vom Durchfahrtgleis. Das ist vom Konzept her im Vergleich zu historisch gewachsenen Bahnhöfen ein Unterschied wie eine Ampelkreuzung gegenüber der Ausfahrt aus der Autobahn. Dabei setzt der Bremsvorgang gerade rechtzeitig ein, um den Zug unter vollem Gebrauch der Nutzbremsung auf den Punkt genau an der richtigen Stelle zum Stehen zu bringen – nicht früher und nicht später. Wenn ein solcher Doppelzug beispielsweise in Frankfurt Flughafen Fernbahnhof einfährt, kann der Führerstand am Beginn des Bahnsteigs noch mit gut 100 km/h hinein rasen. Dennoch hört man ausschließlich die hohen Summtöne der Umrichter und erst im allerletzten Moment vor dem Anhalten ein kurzes Quietschen der konventionellen Bremse. Ob die Bremsen eines solch modernen Zuges so schauerlich quietschen müssen, ist eine andere Frage, aber sei es drum. Der Zug hält kurz an und ist, sobald der Zugführer das Signal gibt, im Nu wieder auf und davon. Wenn der letzte Wagen den Bahnsteig verlässt, kann er gut und gern schon wieder 80 km/h schnell sein. Das richtige Konzept von Fahrzeug, Streckenführung und Bahnhof weist hier den Weg in die Zukunft – zu Gunsten der Energie-Effizienz und gleichzeitig im Sinne des Fahrgastes, der schnell bedient werden möchte. Versierte Stammkunden der DB wissen aus trauriger Erfahrung, wie viele Minuten ein Zug – auch ein ICE3 – vor der Einfahrt in einen »konventionellen« Bahnhof schon vor sich hin dümpelt und wie oft der Zug noch mit niedriger Geschwindigkeit Weichen überfahren und das Gleis wechseln muss, während die weniger erfahrenen Fahrgäste schon seit geraumer Zeit an den Türen zum Aussteigen bereit stehen und noch entsprechend oft durcheinander gewürfelt werden. Am »Kunstbahnhof« dagegen sind auch »BahnCard-100-Dauerfahrer« immer wieder frappiert, wie schnell man plötzlich aussteigen muss, wenn man nicht über das Ziel hinaus fahren möchte.

3.5.3 Regionalverkehr

Für den Nah- und Regionalverkehr gingen die entsprechenden Fahrzeuge der Baureihen 422 / 423 / 424 / 425 / 426 in Betrieb, die als Regional-Express ebenso wie als S-Bahn-Züge mit 140 km/h bzw. 160 km/h schon seit der »Expo 2000« ihren Dienst verrichten. Immer neue Züge (BR 442, BR 1440) kommen hinzu, auch befeuert durch das vermehrte Auftreten privater Anbieter, die oftmals andere Modelle einkaufen – die dann auch nicht in das Nummernsystem der DB passen. Nur die vollständigen UIC-Nummern müssen alle Fahrzeuge tragen.

Durch den ebenfalls auf viele Achsen verteilten Antrieb, somit sehr weit reichende Rückspeise-Möglichkeit und konsequenten Leichtbau wurde gleichzeitig das Angebot für den Fahrgast verbessert und der Energie-Verbrauch minimiert. Eine Einsparung des Energie-Verbrauchs von über 70% gegenüber den hierdurch abgelösten schweren Zügen mit Schaltwerksloks scheint durchaus möglich. Schon gegenüber dem Vorläufer-Modell, dem S-Bahn-Triebwagen der Baureihe 420, gibt die Bahn selbst in ihren Bahntech-Mitteilungen[31] eine Einsparung von 56% an. Eine andere Quelle nennt 40%.[8] Dabei wurden auch diese Triebwagen schon unter reichlichem Einsatz von Aluminium gebaut; nur arbeitet die dynamische Bremse dort noch auf Bremswiderstände. So viel relative Ersparnis auf einmal gibt es sonst kaum jemals. Nur der Ersatz von Glühbirnen durch Kompakt-Leuchtstofflampen und dann durch die LED-Leuchtmittel gibt ein einsames, leuchtendes Parallel-Beispiel ab – aber absolut gesehen auf sehr viel niedrigerem Niveau! Die Baureihen 403, 411, 415 und 422 bis 426 sind die ultimativen Züge und weisen hierzulande schon den Weg, wohin die Bahntechnik weltweit gehen sollte, wenn Energie eines Tages nicht nur teuer, sondern schlichtweg knapp wird. An den S-Bahn-Triebwagen der Baureihen 422 und 423 wurden schon 2013 im praktischen Betrieb 40,6% Rückspeisung gemessen.[20]

3.5.4 Rekordhalter: Straßenbahnen

Trotz geringer Geschwindigkeiten ist offensichtlich der häufige Halt der entscheidende Faktor, wie eine Messung an einer Straßenbahnlinie zeigte. Hierfür wurde beispielhaft ein 3,93 km langer Streckenabschnitt mit 8 Zwischenhalten ausgewählt. Das Fahrzeug mit einer Leermasse von 53 t und einer Kapazität von 335 Fahrgästen verbrauchte hier 24 kWh elektrischer Energie und konnte davon nicht weniger als 13 kWh beim Bremsen wieder erzeugen (eine Computer-Simulation kam auf fast genau die gleichen Werte). Leider gingen davon »nur« 9 kWh zurück in das Netz und die übrigen 4 kWh in die Bremswiderstände (hier brachte die Computer-Simulation bessere Werte). Dies genau war Gegenstand der Untersuchung:[32] Um wie viel ließe sich die Rückspeisung mittels Energiespeicher verbessern? Gedacht war an einen Kondensatorspeicher mit einer Kapazität von 100 F. Bei der auf Grund von Messungen angenommenen Leeraufspannung der Oberleitung von 860 V ergibt dies brutto eine Energie-Kapazität von 10 kWh (nutzbar etwas weniger). Dieser Wert erwies sich als die Sättigungsgrenze: Darüber hinaus ergab die Simulation keine weitere Einsparung mehr. Mit der Hälfte dieser Kapazität ließen sich allerdings auch schon 85% dieser Einsparung errechnen.

Die Situation, dass die Bremswiderstände eingesetzt werden müssen, ergibt sich kaum jemals im Innenstadt-Bereich, sondern an Netzausläufern, wo bei Rückspeisung anderenfalls durch die Widerstände der Leitungen die zulässige Oberleitungsspannung überschritten werden kann. Je nach dem, ob der große oder der kleine Speicher gewählt wurde, ob dieser im Netz (am Unterwerk) oder im Fahrzeug angeordnet war und ob er, wenn im Fahrzeug, dann durch dessen Betrieb oder durch die Spannung in der Oberleitung – das Netz – gesteuert wurde, ergaben sich Amortisationszeiten zwischen 11 und 30 Jahren. Den besten Wert von 11 Jahren erzielt man mit dem kleinen Speicher im Fahrzeug, wenn er Netz bezogen geregelt wird, nicht Fahrzeug bezogen. Das ist insofern logisch als die Vergleichmäßigung der Last entfällt, wenn der Speicher sich direkt am Unterwerk befindet. Der Widerstand der Oberleitung wird hier mit 0,0758 Ω/km angesetzt. Hinzu kommen 0,0111 Ω/km für den Rückweg über die Schienen, bei einer zweigleisigen Strecke die Hälfte. Damit aber liegt der Spannungsfall beim maximalen Oberleitungsstrom des Fahrzeugs von ± 900 A und einer Entfernung zum Unterwerk von z. B. 1 km um 8,5% bis 9%. Diesen Anteil hat also auch die Verlustleistung der Leitung an der Leistungsaufnahme des Fahrzeugs. Der Speicher im Fahrzeug spart mithin zweifach:

- Zum einen muss die rückgespeiste Energie überhaupt nicht mehr durch die Fahrleitung laufen – kein Mal statt zwei Mal.
- Zum anderen werden die Stromspitzen reduziert, die im Quadrat zum Strom in die Verluste eingehen: Beim halben Strom geht nur noch halb so viel Spannung verloren. Die Verlustleistung fällt damit auf ein Viertel.

Nichtsdestoweniger lautet das Fazit des Berichts: Eine Wirtschaftlichkeit ist nicht gegeben – Amortisationszeit zu lang. Was nun fehlt, ist eine Untersuchung der Alternativen:

- Aufrüstung der betreffenden Unterwerke von einfachen Gleichrichtern, die Drehstrom aus dem öffentlichen Netz in Gleichstrom für das Straßenbahnnetz umwandeln, hin zu Wechselrichtern, die auch umgekehrt arbeiten können.
- Verstärkung der Oberleitungen in den betroffenen Netzausläufern durch dickere oder zusätzlich verlegte parallele Leiter.

Nun trägt die erstgenannte Option jedoch – wie der im Fahrzeug angeordnete Speicher – nichts zur Entlastung des Netzes bei. Man wird also das eine tun müssen, ohne das andere zu lassen. Dann wird es mit der Wirtschaftlichkeit wieder richtig eng. Man sollte sich also zu-

nächst auf die zweite Option konzentrieren. Eine Verstärkung des Netzes ist immer gut und muss nicht teuer sein.

3.5.5 Ausland

Nun hat Deutschland allerdings Glück im Unglück, dass seine Großstädte im Zweiten Weltkrieg weit gehend zerstört wurden. Dadurch konnte man fast überall bei Adam und Eva anfangen und Durchgangs-Bahnhöfe errichten. Auch die neue Hauptstadt hat ihre Teilung nun in jeder Hinsicht überwunden und endlich einen Hauptbahnhof erhalten, der zudem kein Kopfbahnhof ist. Ärgerlich ist nur die Berliner Stadtbahn. So kurvenreich ist diese nicht für ICE-Verkehr tauglich. Man musste sich aber am Machbaren orientieren. Dem Stuttgarter Kopfbahnhof geht es zur Zeit an den Kragen, und Frankfurt am Main leistet sich zusätzlich den Flughafenbahnhof als Durchgangs-Bahnhof.

Hingegen in London, Paris, Madrid, Barcelona, Mailand, Rom … – die Liste ließe sich beliebig fortsetzen – scheinen Besucher zwar willkommen. Eine reine Durchfahrt mit dem Zug aber ist völlig unmöglich. Fernbahnlinien kommen aus allen möglichen Richtungen und enden mehr oder weniger nahe am Zentrum – meist eher weniger.

Nun ist jedoch die Siedlungsstruktur in den meisten Ländern mit wenigen großen Metropolen und unbewohnten Flächen dazwischen anders. 10% aller Franzosen leben in ihrer Hauptstadt; in Deutschland sind es nur etwa 4%. Die Flächen zwischen den Ballungsräumen sind bei uns von einer Vielzahl mittlerer und kleiner Städte übersät. Das gibt dem Ausland mehr Raum für die Anwendung der Hochgeschwindigkeits-Bahnverbindungen. Spanien, Russland, China, Saudi-Arabien, die Türkei und viele andere bauen zur Zeit solche Strecken auf oder haben sie schon seit einigen Jahren in Betrieb. Dabei kommen zum Teil eigene Entwicklungen zum Einsatz (China), zum Teil werden die Züge aus Deutschland bezogen (die Siemens »Velaro« Familie, zu der auch die BR 403 gehört, läuft z. B. in Russland mit 10 Wagen und besonderer Ausstattung für sibirische Verhältnisse) – ganz davon abgesehen, dass die traditionellen Bahn-Nationen Frankreich und Japan über solche Bahnen schon deutlich länger verfügen als Deutschland.

Vielleicht ist im Vergleich dazu das neue deutsche Konzept mit Grüne-Wiese-»Kunstbahnhöfen« nicht nur praxisgerechter, sondern auch zukunftsfähiger, denn der Mensch von heute sieht sich nicht mehr mit der Frage konfrontiert, ob er mit der Bahn fährt *oder* sich ein Auto kauft, sondern fährt *mit* dem Auto *zur* Bahn. Parkplätze gibt es dort auf der Wiese, und sollte nun das Elektroauto trotz aller widrigen Umstände seinen Platz auf dem Markt finden, dann liegt er dort, direkt neben dem Fernbahnhof, denn bis dorthin könnten den Fahrgast auch die heute schon verfügbaren Akkumulatoren mit akzeptabler Geschwindigkeit und dem gebührenden Komfort bringen. Die Zukunft liegt im Verbund der Verkehrsmittel; dann hat auch das Elektromobil seinen Sinn und eine Chance. So machen es letztlich elektrische Bahnen möglich, dass das Elektroauto seinen Sinn und Zweck bekommt. Strom macht mobil!

3.6 Hochgeschwindigkeitszug oder schnelles Reisen?

Genau hier setzen die Kritiker des Hochgeschwindigkeitsverkehrs an, dass ein schnelles oder superschnelles Fahrzeug gar nichts hilft, wenn es nicht auf speziell hierauf abgestimmten Fahrwegen verkehrt – und damit haben sie Recht. Andere Länder hätten ein Hochgeschwindigkeitsnetz, wird dann moniert, aber Deutschland habe hier und da einmal ein paar Einsprengsel von Hochgeschwindigkeitsstrecken. Nun ist allerdings zum einen Rom auch nicht an einem Tag erbaut worden und der Konflikt zwischen Umweltschutzgruppen, die den Ausbau des Bahnverkehrs fordern, und Umweltschutzgruppen, die ihn jeweils im konkreten Fall verhindern wollen, nirgends so scharf. Des Weiteren findet man aber auch

kaum eine Region auf der Welt, die eine relativ hohe Bevölkerungsdichte mit so relativ homogener Verteilung statt Konzentration auf eine oder wenige Metropolen aufweist, so dass es selten lange dauert, bis man wieder einen Bahnhof antrifft, an dem zu halten für den Schnellzug eben doch lohnt. Wo diese Struktur mehr oder weniger durchbrochen wird, vorzugsweise in Ostdeutschland, bewahrheitet sich allerdings die Erkenntnis. So fuhr einst der IC 2861 von Köln nach Berlin den 241 km langen Streckenabschnitt von Hannover bis Spandau ohne Halt fahrplanmäßig in gerade mal 1:23 h. Ein Zug mit einer höchstzulässigen Geschwindigkeit von 200 km/h erreicht hier also einen Netto-Durchschnitt ohne Einrechnung der Aufenthalte von nicht weniger als 174 km/h, also 87% der Höchstgeschwindigkeit (Tabelle 4)! Der Bruttowert über den gesamten Zuglauf liegt dagegen nur bei 120 km/h – oder was heißt schon »nur«? Der ICE 516 von München nach Dortmund brachte es auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Frankfurt Flughafen und Siegburg / Bonn auf fahrplanmäßige 227 km/h, landet aber im Gesamtschnitt über die 697 km lange Strecke bei nur 116 km/h, also weniger als der IC und nur 35% seiner zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Tabelle 5)!

Es stimmt also: Die Strecke macht's, nicht der Zug. Was zu beweisen war. Folgerichtig haben die Nachfolge-Modelle des ICE3 eine etwas moderatere Höchstgeschwindigkeit. Die Rekorde sind gejagt; jetzt kann man sich darum kümmern, den praktischen Nutzwert zu optimieren. Die neue aufgepeppte Version des ICE3, die 2013 in Betrieb gegangene BR 407, die mit verbesserten Wirkungsgraden, niedrigerem C_W-Wert und etwas weniger Masse – mithin also nochmals deutlich gesenktem Energieverbrauch – aufwarten konnte, weist eine höchstzulässige Geschwindigkeit von »nur noch« 320 km/h auf. Am Konzept an sich gab es keine wesentlichen Änderungen.

Zuglauf IC 2861			Entf.	Zeit		Geschwindigkeit	
				netto	brutto	netto	brutto
Köln Hbf	Abfahrt	14:28h	42km		00:25h		101km/h
Düsseldorf Hbf	Ankunft	14:50h					
	Abfahrt	14:53h	8km	00:05h	00:07h	96km/h	69km/h
Düsseldorf Flughafen	Ankunft	14:58h					
	Abfahrt	15:00h	15km	00:08h	00:10h	113km/h	90km/h
Duisburg Hbf	Ankunft	15:08h					
	Abfahrt	15:10h	19km	00:11h	00:13h	104km/h	88km/h
Essen Hbf	Ankunft	15:21h					
	Abfahrt	15:23h	15km	00:10h	00:12h	90km/h	75km/h
Bochum Hbf	Ankunft	15:33h					
	Abfahrt	15:35h	18km	00:11h	00:13h	98km/h	83km/h
Dortmund Hbf	Ankunft	15:46h					
	Abfahrt	15:48h	31km	00:19h	00:23h	98km/h	81km/h
Hamm(Westf)	Ankunft	16:07h					
	Abfahrt	16:11h	67km	00:25h	00:27h	161km/h	149km/h
Bielefeld Hbf	Ankunft	16:36h					
	Abfahrt	16:38h	110km	00:50h	00:53h	132km/h	125km/h
Hannover Hbf	Ankunft	17:28h					
	Abfahrt	17:31h	241km	01:23h	01:25h	174km/h	170km/h
Berlin-Spandau	Ankunft	18:54h					
	Abfahrt	18:56h	11km	00:12h	00:14h	55km/h	47km/h
Berlin Hbf	Ankunft	19:08h					
	Abfahrt	19:10h	6km	00:09h		40km/h	
Berlin Ostbahnhof	Ankunft	19:19h					
Gesamt	**Zeit**	**04:51h**	**583km**	**04:03h**	**04:42h**		
Mittel (zwischen den Halten)			**49km**	**00:22h**	**00:25h**	**144km/h**	**124km/h**

*Tabelle 4: Dieser IC-Zug fährt 241 km seiner fahrplanmäßigen Strecke mit einer fahrplanmäßigen Durchschnittsgeschwindigkeit von **87%** seiner höchstzulässigen Geschwindigkeit*

Zuglauf ICE 723			Entf.	Zeit		Geschwindigkeit	
				netto	brutto	netto	brutto
Essen Hbf	Abfahrt	14:53h	19km		00:15h		76km/h
Duisburg Hbf	Ankunft	15:06h					
	Abfahrt	15:08h	23km	00:11h	00:13h	125km/h	106km/h
Düsseldorf Hbf	Ankunft	15:19h					
	Abfahrt	15:21h	38km	00:21h	00:23h	109km/h	99km/h
Köln Messe/Deutz	Ankunft	15:42h					
	Abfahrt	15:44h	164km	00:50h	00:53h	197km/h	186km/h
Frankfurt(M) Flughafen Fernbf	Ankunft	16:34h					
	Abfahrt	16:37h	11km	00:11h	00:17h	60km/h	39km/h
Frankfurt (Main) Hbf	Ankunft	16:48h					
	Abfahrt	16:54h	46km	00:28h	00:30h	99km/h	92km/h
Aschaffenburg Hbf	Ankunft	17:22h					
	Abfahrt	17:24h	78km	00:39h	00:41h	120km/h	114km/h
Würzburg Hbf	Ankunft	18:03h					
	Abfahrt	18:05h	102km	00:54h	00:57h	113km/h	107km/h
Nürnberg Hbf	Ankunft	18:59h					
	Abfahrt	19:02h	171km	01:03h		163km/h	
München Hbf	Ankunft	20:05h					
Gesamt	**Zeit**	**05:12h**	**652km**	**04:37h**	**04:09h**		
Mittel (zwischen den Halten)			**72km**	**00:34h**	**00:31h**	**141km/h**	**157km/h**

*Tabelle 5: Dieser ICE-Zug fährt im gesamten Verlauf seiner fahrplanmäßigen Strecke nur mit einer fahrplanmäßigen Durchschnittsgeschwindigkeit von **35%** seiner höchstzulässigen Geschwindigkeit*

Dann war es Zeit, die recht alten IC-Reisezugwagen zu ersetzen. Unter dem Arbeitsnamen »ICx« wurde ein nun wieder modular aufgebauter Triebwagenzug entwickelt. Hier lassen sich motorisierte »Powercars« mit Laufwagen flexibel kombinieren. Als der Zug dann 2017 mit den Baureihennummern 412 bzw. 812 den Betrieb aufnahm, hieß er aber überraschender Weise »ICE4«. Man darf argwöhnen, dass er sich berechtigt fühlt, unter der Bezeichnung »ICE« höhere Fahrpreise zu erheben. Die Höchstgeschwindigkeit liegt »nur noch« bei 250 km/h. Dennoch läuft er auch auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen

Köln und Frankfurt – die bis dato allein den Baureihen 403 und 406 vorbehalten war. Vorerst sind 7-teilige, 12-teilige und 13-teilige Garnituren unterwegs.

Für den IC-Verkehr nahmen während dessen neue Doppelstockwagen den Verkehr auf. Sie unterscheiden sich äußerlich nur in der Farbe von den sehr verbreiteten Regionalzugwagen. Die Innen-Einrichtung wurde etwas aufgepeppt, doch sind diese Wagen wie jene für nur 160 km/h zugelassen. Eine Aufwertung mit dem Pinsel? Tatsächlich läuft es letztlich – vereinfacht ausgedrückt – darauf hinaus. Wirklich neu sind weder die Wagen noch die bekannten Lokomotiven der BR 146 (Bild 33).

Bild 33: IC-Doppelstockzug – verdächtige Ähnlichkeit mit Regionalzügen

Wenn das so weiter geht, sehen wir demnächst Straßenbahnen in ICE-Farben in unseren Städten, die nur mit Fernverkehrs-Fahrscheinen benutzt werden dürfen. Allerdings hat sich auch durch diese Umstellung z. B. die über 7 Stunden in Anspruch nehmende Direkt-Verbindung von Dresden nach Köln gegenüber den alten, 200 km/h schnellen IC-Zügen um nur 10 Minuten verlängert. Alles ist relativ.

4 Zur Ökobilanz gehört noch mehr

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die elektrische Zugförderung dem Diesel-Antrieb sowohl von der Leistungsfähigkeit her als auch ökonomisch und ökologisch überlegen ist – von den alten Dampflokomotiven ganz zu schweigen, die es auf 7%, bestenfalls 10% Wirkungsgrad brachten und Staub, Ruß und Asche völlig ungefiltert ausbliesen. Das stärkste Modell, die schwere Güterzuglok BR 044, brachte es auf rund 1500 kW. Dabei krankten bis auf einige kleine Tenderloks alle Dampflokomotiven daran, dass nur ein Teil der gesamten Masse auf Antriebsrädern ruhte und daher das Schleudern beim Anfahren an der Tagesordnung war. Die Anfahrzugkraft und das Beschleunigungsvermögen waren entsprechend sehr bescheiden. Der Lokführer navigierte stets hart am »Schleudertrauma«, und der Heizer hätte eigentlich hellseherische Fähigkeiten haben müssen; musste doch stets gemäß den erwarteten Anforderungen zumindest der nächsten paar Minuten gefeuert werden. Ging das schief, so war entweder der nötige Druck nicht da, oder der gerade erzeugte Dampf musste ungenutzt und unter donnerndem Getöse abgeblasen werden, und Lärm ist auch eine Umwelt-Belastung. Daran konnten auch die Rettungsversuche der letzten Zeit nichts mehr ändern: Die Dampflok mit Dampfturbinen-Antrieb, die Dampflok mit Einzelachs-Antrieb, die Dampflok mit Stromlinien-Verkleidung, der Kondensationstender, der die Mitnahme mehrerer Tonnen Wasser erübrigte, und die viel besser regelbare ölbefeuerte Dampflok kamen zu spät und konnten sich nicht mehr durchsetzen. Zudem hätte die Ölbefeuerung auch den Nachteil der Abhängigkeit vom Erdöl mit der Diesellok gemeinsam gehabt, ohne diesen durch angemessene Vorteile hinreichend auszugleichen. Die mit Kohle befeuerte Dampflok hätte man immerhin notfalls auch mit Holz oder Abfällen befeuern können; die Diesellok fährt noch nicht einmal mit ranziger Butter.

4.1 Der Antrieb

An eben dieser Stelle aber erweist sich der elektrische Antrieb wieder als überlegen, denn bei der elektrischen Energie kann man im Prinzip vollkommen frei wählen, aus welcher Primärenergie man sie erzeugen möchte. Der Kraftwerksmix ist je nach den Erfordernissen der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes wandelbar. In dem Ausmaß, wie regenerative Energie in das Bahnstromnetz gelangt, werden auch E-Loks mit regenerativer Energie fahren – Dieselfahrzeuge natürlich nicht. Petrochemischen Erzeugnissen einen grünen Anstrich zu verleihen ist sehr schwierig. Das separate Stromsystem mit seiner eigenen Betriebs-Frequenz von 16,7 Hz bietet sogar die Möglichkeit, unabhängig von der öffentlichen Versorgung z. B. einen höheren Anteil aus regenerativer Herkunft oder Kraft-Wärme-Kopplung einzusetzen, wie es z. B. in Deutschland der Fall ist, denn Strom ist immer genau so »grün« oder so nachhaltig wie seine Erzeugung – ungeachtet vielfältiger Ansprüche, »nur Ökostrom« zu verwenden, so auch derer der Deutschen Bahn (Abschnitt 1.3).

Der zweite große Vorteil ist, wie aufgezeigt, die im Prinzip recht weit reichende Möglichkeit, Bremsenergie zurück zu gewinnen. Praktisch ist hieran noch zu arbeiten. Die bislang entstandenen, auf die hierauf verkehrenden Fahrzeuge optimal abgestimmten Strecken mit der richtigen Signaltechnik zeigen, dass es geht – und dass es sich ökonomisch und ökologisch gleichermaßen lohnt.

Der dritte Vorteil der elektrischen Energie ist ihre unbegrenzte Vielseitigkeit. Die mühelose, verlustarme Umkehrbarkeit des Umwandlungs-Prozesses von elektrischer in mechanische Energie ist nur das Eine. Zugleich aber lässt sich elektrische Energie in jede andere Energie umwandeln, und dabei sind die Umwandlungs-Wirkungsgrade meist bedeutend besser als

die der konkurrierenden Technologien, sofern überhaupt vorhanden. Die Beleuchtung ist neben der mechanischen Energie ein leuchtendes Beispiel: Die Erfindung der Glühbirne hat den Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Licht gegenüber der Wachskerze um den Faktor 100 verbessert, die Leuchtstofflampe hat diese Verbesserung noch einmal vervierfacht. Mit der LED kam noch einmal ein Faktor von etwa 1,5.[33] Elektrizität ist also eine sehr wertvolle Form von Energie. Während allgemein davor gewarnt werden muss, Wert mit Preis und Preise mit Kosten zu verwechseln, darf »wertvoll« in diesem Zusammenhang als »teuer« verstanden werden, weil bei der Erzeugung im thermischen Kraftwerk mindestens die Hälfte, meist eher zwei Drittel der Wärme weggeworfen statt in Strom verwandelt wird. Der obige Verbesserungsfaktor von 1,5 * 4 * 100 muss also ehrlicher Weise noch einmal durch 3 geteilt werden. Dennoch – und das ist der Punkt – bietet sich die elektrische Energie zum Antrieb von Bahnen auch deshalb an, weil es die gleiche Energieart ist, die im Zug zugleich für ausnahmslos alle anderen Zwecke eingesetzt wird:

4.2 Sonstiger Energie-Verbrauch

Rund 80% seiner Energie verbraucht ein ICE-Zug zum Fahren.[11] Dummer Weise verbrauchen Personenzüge aber auch eine Menge Energie für die Heizung (Tabelle 6). Nicht nur, dass von außen im ganz normalen Betrieb eine Luftkühlung erfolgt, wie sie ein Wohnhaus noch nicht einmal während eines Orkans erfährt, während alte, klapprige Reisezugwagen des Nah- und Regionalverkehrs schlecht isoliert waren und die »Zug-Luft« durch alle Ritzen drang – nein, dann blieb auch noch allzu gern der Heizungsregler hängen und verwandelte den Fahrgastraum all dessen zum Trotz in einen Backofen. Die Fahrgäste konnten sich dessen nur noch erwehren, indem sie die Fenster öffneten. Für jede teuer erzeugte Kilowattstunde Wärme, die so nutzlos ins Freie entwich, entwichen zeitgleich im Kraftwerk zwei Kilowattstunden Wärme nutzlos ins Freie. Dabei erfordert eine solch starke Elektroheizung eine gewaltige Anschlussleistung. Die für die Heizanlage gewählte Nennspannung von 1000 V legt beredtes Zeugnis davon ab, wie viel Leistung und Energie für die Beheizung einzurechnen ist, während für die Beleuchtung und alle anderen Hilfsbetriebe – außer der Klimaanlage, aber die ist im Nahverkehr noch nicht lange Standard – eine Spannung von 24 V aus dem in jedem Wagen untergebrachten Akkumulator genügt.

Wenn die Diesellok der BR 218 aus Abschnitt 2.2 anfährt, wird die elektrische Zugheizung vorläufig abgeschaltet, da sonst zu wenig Traktionsleistung übrig bliebe. Die Anstrengung im Stillstand bleibt ihr erspart, wenn die alte ZVA (Bild 34, Bild 35, Bild 35) noch in Betrieb ist. Die war zur Dampflokzeit eingeführt worden, denn Dampflokomotiven konnten nicht elektrisch heizen. Sie besaßen nicht viel mehr als einen »Fahrrad-Dynamo«, der beim Fahren angetrieben wurde und einen Akkumulator auflud, der gerade einmal für die 3 Stirnlampen, 2 Schlusslichter und ein paar Glühlampen im Führerstand ausreichte. Strom-Erzeugung im Stillstand war nicht möglich, wohl aber das Heizen mit Dampf über eine durch den Zug geführte Dampfleitung. Kühlwasser von einem Dieselmotor war leider nicht vorgesehen. Eine Umrüstung erschien unter den damaligen Energiepreisen – 1977, als die letzte Dampflok aus dem fahrplanmäßigen Verkehr der Deutschen Bundesbahn ausgemustert wurde – nicht als lohnend, ebenso wenig wie heute der Gebrauch der ZVA, die von Hand angeschlossen und vor der Abfahrt wieder abgezogen werden muss. Gespeist wurde die ZVA aus dem öffentlichen Mittelspannungsnetz über einen besonderen Transformator, der die Unsymmetrie dieser zweiphasigen Last in Grenzen halten sollte – die aber dennoch zu Problemen oder zumindest Bedenken bei Praktikern führen konnte.[34] So groß immerhin war die hier verheizte Leistung. »Eine Reisezuggarnitur von heute, die über Nacht aufgebügelt ist (s. Abschnitt 0), verbraucht rund 250 kW – das ist zu viel, meine ich.«[35] Allerdings stammt dieses Zitat auch schon von 2011.

Verteilung des gesamten Energie-Verbrauchs im Zug (ICE)	
Antrieb	80%
Klimatisierung	7%
Abfuhr der Verlustwärme	8%
Frostschutz	1%
Druckluft	3%
Steckdosen	1%

Tabelle 6: Der Zug benötigt Energie hauptsächlich – aber nicht nur – zum Ziehen

Bild 34: Überbleibsel aus der Dampflokzeit:

Natürlich sind neuere Personen-Fahrzeuge besser isoliert. In Hochgeschwindigkeitszügen lässt sich gar kein Fenster mehr öffnen. Entsprechend dicht sind diese ausgeführt. Dennoch stellt man fest, wenn man die technischen Unterlagen eines Bahntransformators der ICE1- und ICE2-Triebzüge studiert, dass die Gesamt-Nennleistung gut 5 MVA beträgt und die Heizwicklung – allein der Begriff erinnert an alte »Dampfradios« – davon schon 500 kVA für sich beansprucht. Dabei wird kein einziger Verbraucher an Bord direkt mit der Fahrdrahtspannung von 15 kV versorgt, sondern ausnahmslos sämtliche elektrische Energie passiert diesen Transformator. 10% der Leistungs-Aufnahme des Zuges und somit der Nennleistung des Transformators sind also der Heizung zugedacht. Immerhin aber wird der Trafo auch dann noch die Bremsenergie wenigstens auf die Heizwicklung übertragen, wenn eine Rückspeisung in die Fahrleitung nicht möglich ist, weil z. B. im Moment in der näheren Umgebung zu viele Züge bremsen und die Spannung schon bis zur zulässigen Obergrenze angestiegen ist.

Bild 35: Mittels einer Zugvorheiz-Anlage (ZVA) wurde vor Zeiten der bereit stehende Zug über eine flexible Leitung…

Bild 36: …und einen Steckverbinder mit Strom aus dem öffentlichen Netz vorgeheizt, bis die Lok kam – heute stehen diese Anlagen nur noch herum

Dank des Bahnstromsystems mit einem eigenen Hochspannungsnetz kommt es dazu allerdings fast nie. Von der BR 120, der ersten Stromrichterlok, wird berichtet, sie sei anfangs

noch mit Bremswiderständen ausgestattet gewesen, die jedoch später wieder ausgebaut worden seien, da nie benutzt. Bremswiderstände sind mehr ein Thema von Gleichstrombahnen (Abschnitt 3.5.4). Im Sommer kann diese Leistung zudem zum Teil von der Klimaanlage aufgenommen werden. Bemerkenswert ist hier die Erkenntnis, dass moderne Elektrozüge mit Klimaanlage weniger Strom verbrauchen als alte ohne! Die Fachleute wunderten sich und vermuten, dass der erhöhte Luftwiderstand beim Fahren mit offenen Fenstern den Verbrauch stärker erhöht als die Klimaanlage.[36] Sollte dies den Tatsachen entsprechen, ist der Verbrauch der heute zum Standard gehörenden Klimatisierung tatsächlich als negativ anzusehen.

4.3 Leichtmetall statt Schwermetall?

Dabei darf man sich nicht vom schlechten Wirkungsgrad eines solchen Transformators täuschen lassen. Etwa 95% werden angegeben, während von einem stationären Transformator gleicher Nennleistung ein Wirkungsgrad von gut 99% erwartet werden darf. Die Wirkungsgrade elektrischer Maschinen, zu denen auch Transformatoren gerechnet werden, lassen sich nahezu grenzenlos verbessern, indem man die eingesetzte Menge aktiven Materials (Eisen und Kupfer bzw. Aluminium) erhöht oder indem man die Aluminiumleiter durch Kupferleiter (mit der 1,5-fachen Leitfähigkeit, leider aber auch der 3-fachen Masse – und bezahlt wird nach Masse) ersetzt.[37] In ortsfesten Maschinen und Anlagen ist also eine Investition in voluminösere bzw. schwerere Einheiten gleicher Bemessungsleistung in sehr weiten Grenzen sinnvoll und nützlich. In Fahrzeugen jedoch wirkt jede Erhöhung des Gewichts bzw. der Masse kontraproduktiv. Ein solcher Bahntransformator bringt 10 t auf die Waage, während ein Transformator gleicher Leistung im öffentlichen Stromnetz auf gut und gerne 30 t käme. Würde er einphasig und vor allem auf die niedrigere Bahnfrequenz von nur 16,7 Hz ausgelegt, käme er auf etwa 50 t. Beim mobilen Trafo muss man also Folgendes gegeneinander aufrechnen:

- Wird der Fahrzeugtrafo im Laufe eines 30 Jahre währenden Lebens mit umgerechnet 3200 Volllast-Betriebsstunden jährlich belastet, so entstehen darin Verluste in Höhe von 1,25 GWh. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades von 95% auf 99% könnte hiervon $^4/_5$ und somit 1 GWh einsparen.
- Die hierfür aufzuwendenden zusätzlichen 40 t Aktivmaterial müssen jedoch während dieser 30 Jahre etwa 15 000 Mal auf die Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h beschleunigt werden. Das kostet näherungsweise 2 GWh, wovon bei heutiger Betriebsweise höchstens die Hälfte beim Bremsen zurück gewonnen wird – macht netto 1 GWh zusätzlichen Verbrauch.

Der Trafo ist also gemäß dieser sehr groben Schätzung richtig ausgelegt: Der Einsatz wesentlich mehr aktiven Materials brächte erhebliche Mehrkosten, aber die Gesamt-Effizienz des Fahrzeugs bliebe ungefähr gleich. Die gewählte Auslegung befindet sich offensichtlich gerade am energetischen Optimum – das allerdings sehr flach zu verlaufen scheint, so dass eine genauere Schätzung oder Berechnung zu einem ganz ähnlichen Ergebnis führen würde.

Entsprechendes gilt tendenziell für die Fahrmotoren und alle anderen elektrischen Betriebsmittel an Bord – wie gesagt ganz im Gegensatz zu stationären Anwendungen, wo die »dickere« Lösung mit mehr Eisen und Kupfer **immer** die effizientere darstellt. Beim Fahrzeug jedoch steht stets die Einsparung an Masse bzw. Gewicht an oberster Stelle. Ein weiterer Ersatz von Stahl durch Aluminium und bestimmte Kunststoffe kann hier sicher, wie schon bisher, noch weitere gute Dienste leisten. Auch ermöglichen verbesserte Werkstoff-Eigen-

schaften und optimierte Gestaltung dank moderner CAD-Technologien die Fertigung von Stahlteilen gleicher Beanspruchbarkeit aus weniger Stahl.

Bild 37: Stromschienen innerhalb der Lok – in »West-Loks«, wie hier in der BR 111, trotz doppelten Gewichts immer aus Kupfer

Bild 38: Kupferschrott ist kein Abfall, sondern ein zu Spitzenpreisen gehandelter Rohstoff – ein Bild mit Seltenheitswert, denn die hohen Metallpreise haben die Depots mit ausgemusterten Fahrzeugen »leergeräumt«

Da läge der Gedanke nahe, das Kupfer im Bahntrafo und in den Traktionsmotoren durch Aluminium zu ersetzen, denn Aluminium hat nur $^1/_3$ der Dichte von Kupfer, aber immerhin $^2/_3$ der elektrischen Leitfähigkeit, also sollten $^3/_2$ des Volumens und somit die Hälfte an Masse ausreichen, um in einer elektrischen Maschine die gleiche Funktion zu erfüllen. Diese Rechnung geht jedoch nicht auf, da dieses Mehr an Volumen, das vom leichten Aluminium eingesetzt werden müsste, mehr Baugröße, also auch den Einsatz von mehr Dynamoblech, erfordern würde, und Eisen ist fast so schwer wie Kupfer. So werden auch die Läuferkäfige der Traktionsmotoren aus Kupferprofilen zusammengeschweißt, statt gegossene Läuferkäfige aus Aluminium zu verwenden. Hierdurch lässt sich entweder bei sonst gleichem Aufbau des Motors ein noch besserer Wirkungsgrad erzielen, oder man kann bei gleichem Wirkungsgrad die Leistungsdichte erhöhen, also den ganzen Motor kleiner und somit insgesamt, trotz der Verwendung des wesentlich schwereren Leiterwerkstoffs, leichter bauen.

Doch auch dort, wo der zusätzliche Platz-Bedarf für Aluminium nicht die Ausschlag gebende Rolle spielt, weil dies nicht zum Einsatz von mehr Eisen oder anderer Werkstoffe führen würde (Bild 37), hat man mit Aluminium wegen seiner technologischen Eigenschaften sehr schlechte Erfahrungen gemacht, wie ein Mitarbeiter der DB AG, vormals bei der DR beschäftigt, berichtet: »Bei der BR 143 wurden zu DDR-Zeiten Alu-Stromschienen eingebaut. Dies war für die Instandhaltung ein Desaster. Erstens wies das Material an den Verschraubungen ein Fließverhalten auf. Verschraubungen mussten ständig bezüglich des Drehmomentes geprüft werden. Weiterhin hat man höhere Übergangswiderstände und einen geringeren Leitwert. Korrosion an den Kontakten verschlechterte den Zustand weiter. … Aber was macht man nicht alles, wenn man kein Kupfer hat?«

4.4 Entsorgung

Wenn die geplanten 30, praktisch eher 40, manchmal 50 Betriebsjahre (Bild 7) nun doch einmal verstrichen sind, muss auch ein vormals moderner Zug verschrottet werden. Eine alte Elektrolokomotive besteht zum größten Teil aus Eisen. Außerdem enthält sie etwa 5 t Kupfer. Sie stellt somit keinen Problemmüll, sondern vielmehr eine Quelle begehrter Rohstoffe zur Erschaffung neuer, zeitgemäßer Triebfahrzeuge dar (Bild 38). Da stehen sie dann auf dem Abstellgleis und warten auf den Tag, an dem ihr Schrottwert vielleicht vom fünf- in den sechsstelligen Bereich vorrückt, so dass sich die sorgsame Demontage lohnt. Die traum-

haft hohen Preise für Kupfer- und Eisenschrott der Jahre 2006 bis 2008 hätte man zudem nutzen sollen, um die alten Umformersätze östlicher Prägung (»Kupferbergwerke«) durch moderne Anlagen zu ersetzen. Das Kupfer hätte man hier gleich wieder einsetzen können, um die Effizienz zu optimieren, indem man die Umformer durch verlustarme leistungselektronische Umrichter ersetzt. Dieser Prozess jedoch ist mittlerweile ohnehin fast abgeschlossen – und wirklich billig ist Kupfer in der Zwischenzeit niemals wieder geworden. Die Überschrift zu diesem Abschnitt ist also eine Themaverfehlung erster Güte: Mitnichten gibt es hier irgendwelche Sorgen loszuwerden – und wenn, dann allenfalls die Sorge, woher man schnell genug so viel Kupfer bekommt; keinesfalls etwa, wo und wie man es los wird. Das ergibt sich oft genug schneller, als einem lieb ist, bei Nacht und Nebel. Zwar enthält unsere Erdkruste so viel Kupfer, dass man damit den gesamte Globus einen halben Meter dick verkupfern könnte, aber die Anlagen zum Abbau lassen sich nicht von heute auf morgen errichten.[38]

In den modernen Zügen findet sich außerdem noch viel Aluminium und Kunststoff. Während bei den Kunststoffen zumeist »Hopfen und Malz verloren« ist und eine Wiederverwertung, wenn überhaupt, nur unter erheblichem Wertverlust (zu Deutsch »downcycling«) möglich ist, trägt das Aluminium noch seinen Teil zum Schrottwert bei, und mit dem Verlust des Kunststoffs kann man nach 30 Jahren und 12 »Gigametern« ununterbrochenen Dienstes leben. Außerdem wird es in 30 Jahren bessere Aufbereitungstechniken für die heute eingesetzten Kunststoffe geben – schon allein, weil der Ausgangsstoff Erdöl langfristig mit Sicherheit nicht gerade billiger wird – und neue Kunststoffe werden sich wieder besser verwerten lassen.

So kommt die Bahn dem nachhaltigen Verkehr der Zukunft schon jetzt ziemlich nahe. Nun fehlt nur noch ein Elektrofahrzeug für nicht elektrifizierte Strecken – aber da tut sich etwas:

5 Konzepte für die Zukunft

Die Strecken, deren Elektrifizierung sich zur Zeit nicht lohnt, werden nicht nur schwach, sondern in aller Regel auch verhältnismäßig langsam befahren. Die Luftreibung als einer der Fahrwiderstände und somit der physikalischen Gründe für den Energie-Bedarf ist dann sehr gering. Die Rollreibung ist immer gering. Was bleibt, ist der erhebliche Energie-Aufwand für die Beschleunigung und die Steigungsstrecken. Hier gilt es, den Verbrauch beim Bremsen umkehrbar zu machen, denn was heißt schon die Aussage »Strecken, deren Elektrifizierung sich *zur Zeit* nicht lohnt« bei einer geplanten Betriebsdauer von 30 Jahren? Die Betriebskosten auf der Basis *gegenwärtiger* Energiepreise zu optimieren ist nicht *zukunfts*fähig. Um im Mittel auf ein realistisches Ergebnis zu kommen, müssten die in 15 Jahren zu erwartenden Energiekosten zu Grunde gelegt werden, die zwar heute noch niemand kennt, die aber auf jeden Fall schon wieder um Einiges höher liegen werden als die gegenwärtigen.

5.1 Diesellok bleibt Diesellok

Nachdem der Einzelachs-Antrieb schon die Dampflok nicht retten konnte, versucht man es nun mit entsprechenden Mitteln bei der Diesellok. Bei der neuen BR 246 sollen 4 einzeln zu- und abschaltbare Motoren eine bessere Anpassung an den Bedarf ermöglichen und so den Verbrauch senken.[39] Gesenkt wird in der Tat der Leerlauf-Verbrauch, wenn die einzelnen Motoren entsprechend dynamisch gesteuert werden. Es bleibt aber dabei, dass der RE von Aachen nach Dortmund (Abschnitt 3.1) nur $^1/_3$ seines Energie-Verbrauchs zur Überwindung der Reibungs-Widerstände, aber $^2/_3$ für die Beschleunigungs-Vorgänge aufwenden muss. Von diesen $^2/_3$ könnte eine E-Lok $^3/_4$, also die Hälfte des gesamten Energie-Verbrauchs, beim Bremsen zurück gewinnen. Die Diesellok verbraucht also allein deswegen, weil sie dies nicht kann, systembedingt schon doppelt so viel Primärenergie wie die E-Lok. Der viele Leerlauf, der durch das neue Konzept auch nicht ganz vermieden, sondern lediglich reduziert werden kann, kommt dann noch hinzu. Die Beheizung des Zuges mit »Abfallwärme« entfällt bei dieser dem Personenverkehr zugedachten Maschine – ein weiterer Grund, warum ursprünglich aus Kreisen der DB AG verlautete, der Personenverkehr solle auf lange Sicht gänzlich auf Triebwagen umgestellt werden. Warum hiervon bei der DB ebenso wie bei mehreren Privatbahnen nun wieder abgewichen wird, ist unerklärlich.

Dabei gibt es doch den 4-motorigen Dieseltriebwagenzug schon (s. Abschnitt 5.7). Eine automatische Zu- und Abschaltung von Motoren nach Bedarf ließe sich hier also einbauen; das Heizen mit Abwärme würde aber auch hier aufwändiger. Selbst wenn ein Verbrauch von 2,1 l/km rund 7 kWh mechanischer Energie und 14 kWh Wärme je Kilometer entspricht, was unter dem Strich für die Heizung weit mehr als ausreicht, wird die gleichmäßige Verteilung etwas aufwändig.

Außerdem wird die gesamte Nennleistung der neuen Lokomotive mit 2252 kW angegeben. Dies sind nun mal nur $^2/_5$ der elektrischen Konkurrenz – bei rund $^5/_2$ des Verbrauchs. Dabei muss noch beachtet werden, dass beim Vergleich nicht Leistung gleich Leistung ist. Die Nenn-Motorleistung elektrischer Triebfahrzeuge entspricht der Netto-Antriebsleistung, von der nur noch die Getriebe-Verluste abzuziehen sind. Der Stromverbrauch an Bord wird anderweitig – direkt vom Bahntransformator – gedeckt. Wird aber bei Diesellokomotiven die »Motorleistung« angegeben, so bezieht sich diese auf den Dieselmotor, der gleichzeitig auch noch alle Hilfsbetriebe, vor allem etwaige elektrische Heizung, im Schlepp hat. So werden z. B. in einer Berechnung[40] für eine Fahrt des Diesel-ICE der BR 605 (Abschnitt 5.7) von Berlin nach Hamburg mindestens 1767 kWh, höchstens 1973 kWh elektrischer Traktionsenergie für

die elektrischen Fahrmotoren, zusätzlich aber 353 kWh Strombedarf für Hilfsbetriebe errechnet. Es landen also rund 20% des an Bord erzeugten Stroms nicht in den Fahrmotoren, sondern anderswo im Zug.

5.2 Die eingebaute Rangierlok

Eine weitere – schon nicht mehr ganz neue – Meldung kündet so zu sagen von einer »E-Lok mit eingebauter Rangierlok«. Die »letzte Meile«, wie es dort[41] heißt, könne die damals neue Bombardier Traxx Elektro-Lokomotive der BR 187 durch einen kleinen Dieselmotor überwinden, der »am Rad noch 180 kW leistet«. Zwar soll immer noch die volle Zugkraft von 300 kN erreicht werden, doch Leistung ist Kraft mal Geschwindigkeit, und wenn man die Leistung von 180 kW durch diese Zugkraft teilt, dann ergibt sich, dass diese Zugkraft nur bis zu einer Geschwindigkeit von 0,6 m/s oder gut 2 km/h gehalten werden kann. Das ist selbst für eine Rangierlok recht mager und erlaubt wirklich keine großen Sprünge. Die »letzte Meile« ohne Oberleitung muss man hier wohl mehr oder weniger wörtlich nehmen; nimmt sie doch allein schon 45 Minuten für sich in Anspruch! Dafür kauft man sich den hohen Wartungsaufwand für eine Diesellok ein, und dieser Dieselmotor ist den gleichen betrieblichen Nachteilen unterworfen wie der im Auto – wird unter Umständen über lange Zeit nie richtig warm. Das soll für einen Verbrennungsmotor gar nicht gut sein. Einem Elektromotor macht dies vergleichsweise wenig aus – im Gegenteil: Je kälter, desto besser.

Der Aufpreis des neuen Ausstattungsmerkmals wird mit etwa 10% angegeben[42]. Dafür hätte man auch etwa 300 kWh Lithium-Ionen-Speicherkapazität bekommen. Dann wären mit entsprechenden Hochleistungszellen auch wesentlich mehr als 180 kW machbar gewesen – beispielsweise 600 kW für 30 Minuten – und dies völlig wartungsfrei und garantiert immer taufrisch voll verfügbar, wenn die Lok dort ankommt, wo der Akku gebraucht wird. Beim Tank hingegen muss »irgendjemand« daran denken, dass dieser bisweilen auch mal wieder befüllt werden muss. Hoffentlich klappt das – bei einer E-Lok! Und wenn, dann haben die Kosten – nicht für den nur selten und in geringem Umfang anfallenden Verbrauch, sondern für eine funktionierende Wartung und entsprechende Logistik – diejenigen für den teuren Akkumulator sicher bald überholt.

Vielleicht hat man beim Entwurf der neuen Lokomotive in erster Linie an Container-Verladestationen gedacht, denn »Fahrdraht und Containerkräne passen nicht zusammen«.[43] Gerade hier böte sich der Akkumulator eher an, so wie man ihn bei der Straßenbahn zur Überbrückung kaum oder gar nicht elektrifizierbarer kurzer Strecken schon mehrfach einsetzt.[44]

5.3 Optimal: Akkumulator getriebene Nahverkehrs-Triebwagen

Aus den genannten physikalischen Gegebenheiten folgt, dass ein Schienenfahrzeug weitaus näher an der – auch kommerziellen – Realisierbarkeit eines Akkumulator betriebenen Antriebs liegen müsste als das neuerdings so hoch gelobte, viel besungene, schwer subventionierte, aus nachvollziehbaren Gründen aber dennoch mager verkaufte Elektroauto. Dabei gab es doch bei der Bahn schon seit 1907 aus Bleiakkumulatoren gespeiste Elektro-Triebwagen. Von 1955 bis 1995 war bei der Deutschen Bundesbahn die BR 515 im Einsatz, ohne dass dies jemals viel Aufsehen erregt hätte. Die Bahn hat nichts, aber auch gar nichts unternommen, um sich an Hand dieses Fahrzeugs in der öffentlichen Wahrnehmung als Innovationsmotor und Vertreterin fortschrittlichen Denkens darzustellen. Dies ist indes kein Wunder, denn 1955 waren solche Themen nicht aktuell. Da hatte man noch andere Sorgen. 1995 dann war das Thema zwar aktuell, *dieses* Fahrzeug aber schon von vorgestern. Zu jener Zeit gehörte es schon zum alten Eisen (bzw. zum alten Blei). Dabei brachte es dieser Triebwagen damals immerhin schon auf ein Tempo von 100 km/h und fuhr mit einer Auf-

ladung der Pb-Akkus mit einer Kapazität von – je nach Serie – 350 kWh bis 550 kWh rund 300 km weit, natürlich noch ohne stufenlose Stromrichter-Regelung und ohne Rückspeise-Fähigkeit. Die 2 Fahrmotörchen zu je 150 kW Stundenleistung verliehen dem bleischweren Gefährt natürlich nicht die Fahrdynamik, die man mit Strom aus dem Netz auch damals schon gewöhnt war. Der Energie-Verbrauch dagegen errechnet sich hieraus zu sehr bescheidenen 1,2 kWh/km bis 1,8 kWh/km. Wiederum mit einem pauschalen Erzeugungs- und Verteilungs-Wirkungsgrad des Stroms von 33% gerechnet, entspräche dies 0,5 l bis 0,75 l Dieselkraftstoff (oder Heizöl) je Kilometer, die z. B. ein Blockheizkraftwerk zur Erzeugung des Stroms verbraucht hätte, mit dem das Elektrofahrzeug einen Kilometer weit führe. Das ist also knapp die Hälfte dessen, was die in Abschnitt 2 betrachteten Dieselfahrzeuge zu sich nehmen – bei gleicher Sitzplatz-Kapazität, wenn man der BR 515 den zugehörigen Beiwagen BR 815 anhängt.

Bauen wir doch jetzt einmal auf diesem Wissen auf und entwerfen in Gedanken einen neuen Akku-Triebwagen nach modernsten Erkenntnissen. Als Referenz diene das erste Paradepferd des elektrischen Straßenverkehrs, der imposante zweisitzige Elektro-Sportwagen Tesla Roadster 2008 (spätere Modelle existieren nur als Vorankündigung und mit allzu fantastischen oder ganz ohne Angaben):

- Mit 56 kWh aus Lithium-Ionen-Akkumulatoren fährt dieser Wagen zwischen 90 km und 500 km weit. Die Werksangabe beträgt 350 km. Damit liegt der Verbrauch zwischen 0,1 kWh/km und 0,6 kWh/km. Das ist sehr wenig, aber pro Sitzplatz immer noch das 5- bis 50-Fache des Doppel-Triebwagens BR 515 / 815.
- Diesen statten wir nun mit doppelt so viel Li-Akku-Kapazität aus wie seinerzeit an Pb-Akkus höchstenfalls im Einsatz waren, also mit 1100 kWh. Dadurch verdoppelt sich die Reichweite des Schienenfahrzeugs auf 600 km. Das reicht für eine 16-Stunden-Schicht im Nahverkehr.
- Dank der vierfachen Energiedichte der Li-Akkus kann das Akku-Gewicht gleichzeitig halbiert werden. In »Tesla«-Akkus gerechnet wären es 20 Stück zu je 400 kg, also etwa 8 t.
- Es lässt sich auch wie folgt rechnen: Die Masse des Motorwagens BR 515 wird mit 49 t … 56 t, die Akku-Kapazität mit 352 kWh … 548 kWh angegeben.[45] Mit der Annahme, der Unterschied in den Bauformen erschöpfe sich in der unterschiedlichen Kapazität, lässt sich hieraus die mutmaßliche Energiedichte der damals verwendeten Akkumulatoren zu
$$w = \frac{548\text{kWh-}352\text{kWh}}{56\text{t-}49\text{t}} = 28\frac{\text{kWh}}{\text{t}}$$
errechnen. Dies entspricht genau einem Fünftel der 56 kWh aus 0,4 t Akkus im Tesla und bestätigt hiermit sogar die fünffache Energiedichte.
- Diese Einsparung beim Gewicht und die optimierte Antriebssteuerung mit Rückspeisung dürfte näherungsweise den Brutto-Mehrverbrauch kompensieren, den ein modernes Fahrzeug durch zeitgemäß erhöhte Fahrdynamik – mindestens 140 km/h, besser 160 km/h Höchstgeschwindigkeit – und durch verbesserten Komfort (z. B. Klimaanlage) zwangsläufig mit sich brächte.
- Der Akkumulator des »Tesla« soll sich angeblich mit 10 000 US$ im Preis des Fahrzeugs niederschlagen. Kauft man die betreffenden Zellen im Internet, wird man 23 225 € los, entsprechend etwa 415 €/kWh – was schon günstig ist. Zu Zeiten des Preisverfalls bei Li-Ionen-Akkumulatoren stellt man nämlich bei Internet-Recherchen von 2015 bis 2018 immer noch ein Niveau um 700 €/kWh fest.

- Rechnen wir also einmal mit 500 €/kWh, so müsste man für 20 »Tesla«-Akkus einen Preis von etwa 560 000 € bezahlen. Die Lebensdauer kann mit 3000 Ladezyklen angenommen werden. So würde sich der Kaufpreis der Zellen, auf die im Laufe ihres Lebens gespeicherte Energie (3000 * 1100 kWh) umgerechnet, also mit einem Zuschlag von mindestens 17 Cent auf die Kilowattstunde Strom bemerkbar machen.

5.3.1 Akku-Strom 2,5 Mal so teuer – und doch billiger als Diesel!

Der Strom aus dem Akku ist also mit annähernd 30 ct/kWh rund 2,5 Mal so teuer wie »gewöhnlicher« Bahnstrom. Da das Fahrzeug aber mindestens so effizient wie der alte Akku-Triebwagen sein und also mit etwa 1,5 kWh/km auskommen dürfte, lägen die Energiekosten – wie gesagt, **einschließlich** Abnutzung des Akkus – nur bei ≈ 45 Cent je Kilometer. Ein Dieseltriebwagen, der 1,6 l/km schluckt, bringt es auf über 2 €/km, da die »Schienensteuer« für Dieselkraftstoff bei der Bahn offenbar um nichts niedriger liegt als die Straßensteuer, die der PKW-Nutzer an der Tankstelle entrichten muss, sondern eher noch im Gegenteil: Im »integrierten Bericht 2018« der DB AG[46] werden für einen Verbrauch von 429,6 Millionen Liter Dieselkraftstoff Kosten in Höhe von 1078 Millionen Euro aufgeführt, entsprechend einem Preis von deutlich über 2 €/l – ein fairer Ausgleich für das steuerfreie Kerosin im Luftverkehr? Nebenbei bemerkt werden damit die Schienen zwei Mal bezahlt, weil die Bahn sie selbst legen und pflegen muss, doch auch ohne diese Schieflage, etwa zum Preis von Heizöl, sähe die Bilanz für den Dieseltriebwagen sehr schlecht aus. Die Energiekosten wären noch immer doppelt so hoch wie bei unserem Akku-Fahrzeug.

Aufgeladen würde dieses zum günstigen Nachttarif, denn am Tage ist das Fahrzeug im Dienst. So trüge es auch noch zur Lastgang-Regulierung bei, statt die Lastgang-Problematik mit zu verursachen, wie die konventionellen E-Fahrzeuge es natürlich tun. Das Fahrzeug führe also mit Nachtstrom, während die damit verglichenen Oberleitungszüge ihren meisten Strom zur Hochtarifzeit verbrauchen. Dies mag als ökonomischer Ausgleich dafür dienen, dass in dieser vereinfachten Rechnung auch die Lade-Entlade-Verluste unberücksichtigt blieben.

Ökologisch ginge die Rechnung ohnehin auf, denn selbst wenn rein fossil erzeugter Strom eingesetzt wird, reduziert sich der Brennstoff-Bedarf auf ein Drittel. In Ländern, deren Stromversorgung in erster Linie auf Wasserkraft beruht (Österreich und die Schweiz 60%, Brasilien 85%, Norwegen 98%), zieht das ökologische Argument entsprechend stärker. Eigentlich sollten die Bahnen Europas ganz schnell solche Fahrzeuge auf die Schiene bringen, ehe die derzeit verfügbaren Vorräte an Lithium für weniger sinnvolle Anwendungen vergriffen sind. Weitere Argumente ergäben sich auf Nebenstrecken – alle anderen sind ohnehin elektrifiziert – für leise und abgasfreie Fahrten durch Wohngebiete, Naturschutzgebiete, Tunnel und andere Problemfelder.

Die Schwachpunkte der alten BR 515, derentwegen sie nach 40 Dienstjahren und weit über 200 gebauten Exemplaren ausgemustert wurde, dürften neben den Wartungskosten und der begrenzten Lebensdauer der Pb-Akkumulatoren vor allem die zu geringe Reichweite und Fahrdynamik gewesen sein. 300 km mit höchstens 100 km/h sind für heutige Anforderungen schlichtweg unattraktiv, und 300 kW Stundenleistung bieten nicht die wünschenswerte Spurtfreudigkeit und Steigfähigkeit. Diese Lücken dürfte der Li-Ionen-Akkumulator, wenn nicht beim Automobil, so aber doch beim Schienenfahrzeug zu schließen in der Lage sein. Durch genauere Berechnungen müsste sich dies bestätigen lassen.

5.3.2 Sorgenkind Heizung

Die Frage ist dann noch, wie man das neuartige Fahrzeug beheizt. Das alte Auslaufmodell war mit einer Ölheizung versehen, doch dies kann nicht der Sinn der Sache sein. Eine übliche Bahn-Elektroheizung würde die Reichweite des Akkus zu sehr schmälern. Vielleicht käme für den Akku-Triebwagen der Zukunft nur eine weitere Verbesserung der Wärme-Isolierung des Wagenkastens zusammen mit einer Wärmepumpe in Frage. Diese ist in Form der Klimaanlage – siehe mehr Komfort – ohnehin vorhanden. Man müsste diese nur anders herum arbeiten lassen. Die Umkehrbarkeit senkt zwar auch wieder deren Wirkungsgrad, doch ist dies gegen das Mitschleppen einer zweiten Anlage sicher der kleinere Nachteil.

5.4 Hy-time? Oder »Der Stoff, aus dem das Wasser ist«

Der Nachteil des deutlich schlechteren Wirkungsgrads einer Brennstoffzelle – Werte von knapp über 50% werden genannt – gegenüber einem Akkumulator wird hier zum Vorteil: Eine Brennstoffzelle lässt genügend Wärme für die Heizung »übrig«. Weitere Energieverluste entstehen zwar leider bei der Kompression des Wasserstoffs auf 350 bar, was netto – isotherm und ohne die Verluste des Kompressors betrachtet – schon 4,65% des Brennwerts kostet. Auch ist das erforderliche Tankvolumen fast 10 Mal so groß wie dasjenige für Dieselkraftstoff. Dennoch ist eine Reichweite von 1000 km in Reichweite – so viel wie bei der konventionellen Diesel-Version auch. Mehr noch als das: Sie wurde schon praktisch umgesetzt! Dem elektrischen Bahn-Antrieb, der mit Antriebsenergie recht sparsam umgeht, sei es gedankt. So wurde aus dem Coradia Lint – »leichter, innovativer Nahverkehrstriebwagen« von Alstom – der Wasserstoff-Brennstoffzellenzug Coradia iLint, der auf der InnoTrans 2016 vorgestellt wurde. Im April 2018 fuhr dann der erste Zug im Taunus, weitere ab September von Cuxhaven nach Bremerhaven und Buxtehude, wo bis dahin Dieselfahrzeuge unterwegs waren.

Die Züge im Taunus tanken in Frankfurt-Höchst; für diejenigen in Niedersachsen wurde eine mobile Station aufgestellt, die von Linde mobil versorgt wird. Der Wasserstoff für die Taunusbahn entsteht im Industriepark Frankfurt-Höchst als Koppelprodukt der chemischen Industrie,[47] derzeit noch nicht in Elektrolyseuren aus Solarstrom, wie es dem eigentlichen Konzept dahinter entspräche. Nichtsdestoweniger liegt die Umsetzung im Spur geführten Verkehr der Bahn wegen des niedrigen Energie-Bedarfs der elektrischen Traktion und der folglich großen Reichweite wesentlich näher als im Straßenverkehr, wo ein Tankstellennetz ein echtes Problem darstellt.

5.5 Optimal: Akkumulator getriebene Rangierloks

Ein weiteres Anwendungs-Gebiet, auf dem sich der reine Akkumulator-Antrieb vielleicht noch eher anbieten würde, zumal noch nicht einmal ein Fahrgastraum beheizt werden müsste, wäre der Verschiebedienst, also Rangierloks. Kaum irgendwo bringen Verbrennungsmotoren einen so großen Teil ihrer Betriebszeit im Leerlauf zu – während die gelegentliche Abforderung großer Zugkräfte über kurze Zeit dem Elektromotor ebenso wie vielen Akkumulator-Typen geradezu auf den Leib geschrieben wäre. Ein DB-Betriebswerk berichtet z. B. im langjährigen Mittel einen Verbrauch von 16 bis 20 Litern Kraftstoff pro Stunde für eine kleine 2-achsige Rangierlok von nur 390 kW. Somit kostet der Betrieb selbst einer solch bescheidenen Rangierlok allein für den Kraftstoff schon etwa 300 € am Tag oder 300 000 € in 3 Jahren. Dafür könnte man etwa 400 kWh Lithium-Ionen-Akkukapazität einkaufen – wenn man die im Internet frei zugänglichen Preise einsetzt statt der Angaben für die internen Kosten der Lithium-Ionen-Zellen für elektrische PKW, wie sie ebenfalls allenthalben kolportiert, aber nicht belegt werden. Von nur etwa 100 €/kWh statt der o. g. 700 €/kWh ist bei

E-Automobilen stets die Rede. Warum die Automobil-Industrie in der Lage sein soll, ein so teures Gut für gerade mal $^1/_7$ des auf offenen Märkten zu zahlenden Preises einzukaufen, wird nirgends angegeben, aber diese hier präsentierte Rechnung sollte vorsichtshalber auf der sicheren Seite zu liegen kommen. Damit wäre der zuvor skizzierte Akku-Triebwagen schon 250 km weit gekommen, was also locker für einen Tag Rangierdienst reichen müsste. Die Investition hätte sich also bereits nach rund 3 Jahren amortisiert – bzw. nach 5 Monaten, wenn man annimmt, die Hersteller von Lokomotiven bekämen Zellen zu ähnlichen Preisen wie die PKW-Industrie.

Kommerziell verfügbar ist der monovalente Batterie-elektrische Antrieb bereits im kleinen Maßstab – für so genannte »Rangiergeräte«. Dies sind unbemannte »Lokomotivchen« für den Bereich bis zur Schrittgeschwindigkeit, im Einsatz zur Einfahrt in bzw. Ausfahrt aus Hallen, wo keine Oberleitung betrieben werden kann, zur sequentiellen Entladung von Güterwagen und dergleichen, oft als Zwei-Wege-Fahrzeug ausgeführt. Dies bedeutet, dass das Fahrzeug beliebig zwischen Gleisen und asphaltierten Flächen wechseln kann. Der Antrieb, der in beiden Fällen über Gummireifen erfolgt, erhöht die Zugkraft dieser wegen der geringen Leistung nicht gerade besonders schweren Fahrzeuge deutlich. Ein solches Gefährt wurde bereits 2013 vorgestellt.[48] Eine Akkuladung (von etwa 20 kWh) soll für eine Schicht ausreichen. Bleiakkumulatoren sorgen hier für das erforderliche Gewicht.

5.6 Auch kombinierbar mit Stromabnehmer

Die meisten Nahverkehrslinien führen aus den Ballungsräumen heraus »aufs platte Land«. Die Dieseltriebzüge fahren längere oder kürzere Streckenabschnitte unter einem Fahrdraht, den sie zwar nicht benutzen, dafür aber beschmutzen (was auch ein Problem darstellen soll), ehe sie auf die nicht elektrifizierten Nebenstrecken abbiegen (Bild 39). Hier könnte ein Akku-Fahrzeug, das zusätzlich mit einem Bahntransformator und Stromabnehmer ausgestattet ist, wie ein konventionelles Elektrofahrzeug fahren und zugleich die Akkumulatoren aufladen.

Genau dies wird seit Anfang 2019 bei den ÖBB im Zuge der Beschaffung neuer dreiteiliger Elektro-Triebwagen »Desiro ML« von Siemens erprobt. Einige der Fahrzeuge werden als »Desiro ML Cityjet eco« zusätzlich zum Stromabnehmer und Bahntransformator mit einem 528 kWh fassenden Akkumulator ausgerüstet.[49] Welche Reichweite man sich davon verspricht, ist leider nicht überliefert. Von obiger Annahme (1,5 kWh/km – Abschnitt 5.3.1) ausgehend, sollten sich die früher schon mit Blei-Akkumulatoren möglichen 300 km überbieten lassen. Die Kosten für die Akku-Ausstattung müssen wohl – davon abhängig, wovon man ausgeht (siehe oben Abschnitt 5.5) – unter 100 000 € oder über 300 000 € liegen. Dies läge dann in der Größenordnung von 10% des Fahrzeugpreises – kein wirklicher Aufreger und kein prohibitives Markthemmnis. Dem steht eine beachtliche Ersparnis gegenüber, wenn man bedenkt, dass ein solches Fahrzeug, mit Dieselmotor angetrieben, wegen dessen ungeeigneter Charakteristik (Abschnitt 2, Abschnitt 5.1) mindestens 0,9 l/km schlucken würde. Das ist mal gleich um die 9 kWh/km und damit doppelt so viel wie es bei rein fossiler Elektrizitätsgewinnung sein dürfte, wenn die beiden Erzeugungsketten für Diesel- und Elektro-Traktion gleich effizient wären. Von den Kosten her stünden gut 1 €/km beim Dieseltriebzug nur knapp 20 ct/km beim Akku-Triebzug gegenüber, falls auch die ÖBB »Schienensteuer« in Höhe der für KFZ-Kraftstoffe üblichen Mineralölsteuer zahlen muss (wie die DB AG – Abschnitt 5.3.1). Anderenfalls stünden gut 60 ct/km beim Dieseltriebzug den knapp 20 ct/km beim Akku-Triebzug gegenüber. Damit hätten sich die Mehrkosten für die Akkumulator-Technik zwischen 250 000 km und etwa 1 Mio. km amortisiert. So viel fährt ein solches Fahrzeug in 1 bis 5 Jahren – und irgendwo innerhalb dieser Spanne liegt also die Amortisationszeit. Dem steht eine geplante Gebrauchsdauer von 30 Jahren gegenüber.

Selbst wenn damit gerechnet wird, dass der Akku nach 15 Jahren ein Mal getauscht werden muss – worauf wartet man dann noch?

In anderen Berichten von ähnlichen Versuchen war mehrmals von Reichweiten um 40 km bis 80 km die Rede. Offensichtlich hat man sich dort mit weit weniger als den 528 kWh Akku-Kapazität zufrieden gegeben, sondern vielmehr mit einem Bruchteil hiervon. Wie oben beschrieben, dürfte dies auch für die Mehrzahl aller Anwendungsfälle ausreichen. Die Amortisationsrechnungen fallen dann wieder ähnlich aus.

Besonders vorteilhaft wäre die Einführung dieser Technik für Flügelzüge.[25] Nur allzu oft ist eine der Strecken vollständig und die andere lückenhaft elektrifiziert, was dazu führt, dass zwei Dieseltriebzüge zum Einsatz kommen, da es zueinander kompatible Diesel- und Elektrozüge nicht gibt. Der eine Zugteil befährt dann eine komplett elektrifizierte Strecke mit Diesel-Antrieb.

In Großbritannien wurde schon 2013 ein Versuch mit einem »echten« Lückenfüller geplant, der ohne Dieselmotor, allein mit Akkumulator, Streckenabschnitte ohne Oberleitung überbrücken soll.[50] In Japan gibt es ihn schon seit 2014.[51]

Ein weiterer Kostenvorteil ergäbe sich bei Einführung dieser Technik so zu sagen von selbst oder zusätzlich, weil auch dann, wenn eine Oberleitung vorhanden ist, die Speicherung der Bremsenergie im Fahrzeug ökonomischer ist als die Rückspeisung in die Oberleitung. Dies liegt daran, dass man den technischen Wirkungsgrad – zwei Mal die Verlustkette vom Stromabnehmer über Transformator, Umrichter, Motoren und zum Teil Akku und wieder zurück (≈ 75%) – mit dem Verhältnis Rückspeisepreis / Bezugspreis ≈ 70% (Bild 17) multiplizieren muss, um zum »ökonomischen Wirkungsgrad« zu gelangen. Bei Speicherung im Fahrzeug verbleibt nur der technische Verlust, nicht dieser kaufmännische, was den finanziellen Verlust um mehr als die Hälfte reduziert. Dies ist insbesondere für Privatbahnen interessant; bei DB-Zügen bliebe im Grunde alles »in der Familie«. Durch geschickte Aufteilung der Zuständigkeiten zwischen DB Netze und DB Energie lässt sich nämlich der vom Gesetzgeber geforderte diskriminierungsfreie Zugang zu Bahnstrecken und zum Bahnstrom juristisch wieder aushebeln. Dafür bezieht der DB-Konzern natürlich andererseits wieder moralische Prügel. Tut er es nicht, passt also nicht ordentlich auf das ihm von den Fahrgästen anvertraute Geld auf, bezieht er auch Prügel – unter Umständen sogar von derselben Seite. Ein Akku im Fahrzeug führt auch aus diesem Dilemma wieder heraus und wird so doppelt genutzt – unter der Oberleitung, um aus der finanziellen Situation das Beste zu machen, und fehlt die Oberleitung, dann aus rein technischen Gründen, um das ökonomisch *und* ökologisch vorteilhafte elektrische Fahren auch hier zu ermöglichen.

Während dessen verlautete noch 2019, die DB habe schon 2012 bei Pesa in Polen 72 Einheiten des neuen Regionaltriebwagens Pesa Link bestellt (mit einer Option auf nicht weniger als 470 Stück – bei der DB zweiteilig als BR 632 und dreiteilig als BR 633 im Einsatz) und nach Verzögerungen bis 2016 auch endlich geliefert bekommen – ganz normale, konventionelle Dieseltriebwagen.[52] Die Option hat sich allerdings inzwischen zerschlagen; zu groß waren die in der Tagespresse im Laufe des Jahres 2019 vielfach berichteten Probleme mit den Fahrzeugen (s. a. Bild 39).

Wie weit denkt man denn bei der DB? Diese Triebwagen hat man jetzt dort für die nächsten 30 Jahre am Bein. Oder wird man sie nach einigen Jahren günstig ins Ausland verkaufen? Nach Polen vielleicht? Nur, wenn die PKP sie dann noch haben will – doch auch dort gibt es inzwischen sehr viel mehr Fortschritt als früher üblich war. Pikanter Weise wird der Dieseltriebzug schon gleich auf dem Firmenfoto unter einer Oberleitung dargestellt! In einer Werbe-

broschüre[53] wird er 7 Mal (von außen) abgebildet; davon fährt er 5 Mal unter einer Oberleitung.

5.7 Das Nicht-Hybrid-Fahrzeug auf Schienen

Sofern die Linien aber keine oder zu wenig elektrifizierte Hauptstrecken berühren, könnte, solange der rein elektrische Betrieb sich noch nicht durchsetzen lässt, ein Fahrzeug eine Brücke bilden, das vordergründig wie ein Auto mit Hybrid-Antrieb scheint. Nüchtern betrachtet, also vom Standpunkt der Energie-Versorgung her, verhielte sich ein solches Fahrzeug wie ein reines Dieselfahrzeug, doch könnte hiervon ein wesentlich größeres Sparpotenzial erschlossen werden als auf der Straße. Dies sollte im Abschnitt 2 deutlich geworden sein, da die Dieselmotoren bei der Bahn grob geschätzt 80% ihres Lebens im Leerlauf zubringen. Statt die Dieselmotoren direkt auf die Antriebsachsen wirken zu lassen, sollte ein ganz »gewöhnlicher« Einzelachs-Antrieb mit Elektromotoren eingesetzt werden, die die volle Leistung entfalten. Hinzu käme ein Dieselgeneratorsatz, der nur für die gemittelte Leistung, einschließlich der negativ gerechneten Rückspeisung, ausgelegt sein müsste. In Wirklichkeit würde es sich dabei um ein Elektrofahrzeug mit eingebauter Stromversorgung handeln, nicht um ein Hybridsystem, denn ohne den Akkumulator könnte ein solches Fahrzeug mit dem Dieselmotörchen allein nicht fahren. Vielmehr ginge es hier um ein Elektrofahrzeug mit »Reichweiten-Verlängerung« (zu Deutsch »Range Extender«), das jedoch ausschließlich über den Reichweiten-Verlängerer betrieben würde. Für ein Fahrzeug ähnlich dem »TALENT«[54]-Triebzug der Baureihe 643, das von zwei Dieselmotoren zu je 315 kW angetrieben wird, müsste ein PKW-Motor von 100 kW ausreichen – oder deren zwei, da der Leerlauf-Betrieb oftmals kein reiner Leerlauf ist, insbesondere wenn die Klimaanlage in Betrieb ist. Den zweiten Generatorsatz könnte man ggf. wahlweise nach Bedarf zu- oder abschalten. Alternativ kämen auch Gasturbinen in Betracht, deren Vorteil in einer hohen Drehzahl liegt, wodurch das gesamte Aggregat kleiner und entsprechend leichter würde. Gerade Turbinen lassen sich dort besonders wirtschaftlich einsetzen, wo sowohl Drehzahl als auch Last konstant bleiben. Eben deswegen trifft man sie bisher nie im Fahrzeug-Antrieb, stets aber in Kraftwerken an. Von ihrer hohen Leistungsdichte zeugt der Einsatz in der Luftfahrt.

5.7.1 Vom dieselelektrischen Antrieb zum Hybrid-Antrieb

Zwischen den Generator und den elektrischen Antrieb setzt man einen Akkumulator, der hier nur einen Bruchteil der Kapazität des voll elektrischen Fahrzeugs haben müsste. Eine Auslegung, die zur Überwindung einer Steigung mit 100 m, 200 m oder 300 m Höhen-Unterschied – je nach Einsatzfall – ausgelegt ist, wäre ausreichend. Ein Beschleunigungs-Vorgang verbraucht weniger als das. Lediglich die gleiche Strom-Belastbarkeit wie beim reinen Akku-Fahrzeug wäre gefordert. Der Dieselmotor liefe ständig mit voller Leistung – gleichbedeutend mit optimaler Drehzahl und bestem Wirkungsgrad – und die Differenz zwischen dem konstanten Angebot und der stark schwankenden Nachfrage würde der Akku »ausglätten«. Die Nutzbremsung wäre in vollem Umfang gegeben. Wärme würde kontinuierlich produziert, müsste also nicht bergauf zum größten Teil weggeworfen, bergab zusätzlich im Heizkessel erzeugt werden. Der Dieselmotor könnte automatisch oder ferngesteuert rechtzeitig vor Antritt der Fahrt angelassen werden und eine Zeit lang so zu sagen als Blockheizkraftwerk laufen, damit das Fahrzeug bereits schön warm ist, wenn die ersten Fahrgäste des Tages zusteigen. Das Fahrzeug sollte dazu am Abend zuvor ganz gezielt mit noch nicht ganz vollem Akku abgestellt werden, damit es noch etwas aufzuladen gibt, wenn es etwas zu heizen gibt. Der Heizkessel könnte entfallen und würde die Kostenbilanz weiter entlasten. Ein auf diese Weise von der Netzfrequenz entkoppeltes Blockheizkraftwerk könnte, durch eine Gasturbine angetrieben, beliebig schnell laufen, wodurch auch der Generator kleiner

und leichter und die Frequenz höher würde, was die Gleichrichtung und Glättung bei Speisung auf eine Gleichstromlast (Laden eines Akkumulators) erleichtert.

Bild 39: Die Dieseltriebwagen BR 648 stellten z. B. die Verbindungen vom Ruhrgebiet ins Sauerland her – 2018 abgelöst durch die BR 632, aber Ende 2019 Anfang 2020 war die BR 648 wieder da

Natürlich ließe sich ein solches Fahrzeug auch zusätzlich mit einer Ladevorrichtung für die Nacht (»Plug-In Hybrid«) oder, falls es unter Fahrdraht übernachtet, mit einem Stromabnehmer (»Pop-Up Hybrid?«) ausstatten, mit billigem Nachtstrom vorheizen und dann das erste Stück ohne Gebrauch des Dieselmotors fahren. Es kommt jedoch darauf an, was der Lokführer daraus macht. Schon jetzt beobachtet man, dass der eine beim Dieselfahrzeug während eines mehrminütigen planmäßigen Aufenthalts die Motoren abschaltet, der andere sie aber auch schon mal 25 Minuten am Stück laufen lässt.

Überhaupt gilt es zu bedenken, dass der Preis des Akkus im PKW wahrhaft erschreckend wirkt, da er bei solchen Reichweiten die Hälfte des Kaufpreises ausmacht. Beim Akku-Triebwagen jedoch wäre es nur etwa ein Zehntel des Gesamtpreises. Mit dem Diesel-Aggregat wird nur noch ein Bruchteil dieser Speicherkapazität gebraucht, und so bleibt genügend Platz und Geld für den Generator übrig. Der einzig verbliebene, stark geschrumpfte Dieselmotor kostet und wiegt – zumal ohne das komplizierte Getriebe – ebenfalls weit weniger als die beiden Fahrmotoren der BR 643 oder beispielsweise 648, und bei permanentem »Vollgas«-Betrieb verbraucht er etwa 20 Liter Kraftstoff in der Stunde. Damit führen die bestehenden Baureihen 643 und 648 nur etwa 25 km weit. Im fahrplanmäßigen Betrieb sollten sie eigentlich das Doppelte in einer Stunde schaffen. Entsprechend groß wäre der Einspar-Effekt: Rund einen halben Liter Dieselkraftstoff auf jedem Kilometer. Strom macht's möglich.

5.7.2 Hybrid-Antrieb auch im Fernverkehr?

Dabei muss ein solches Fahrzeug nicht notwendiger Weise auf den Nahverkehr beschränkt bleiben. So gab es bei der DB AG nach langer Zeit für eine kurze Episode zwischendurch wieder wenigstens ein einziges Dieselfahrzeug des Fernverkehrs: Den 4-teiligen ICE-Triebzug der BR 605 mit Neigetechnik, angetrieben von 4 Dieselmotoren zu je 560 kW und mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h. Seit der Indienststellung der 20 Züge im Jahr 2000 führten jedoch auch die 19 verbliebenen – einer wurde bei einem Sturz von einer Hebebühne vollständig zerstört – ein glückloses Dasein. Wegen technischer Probleme durfte u. a. die Neigetechnik auf Geheiß des Eisenbahn-Bundesamtes nicht genutzt werden. Letztendlich wäre die Elektrifizierung der Strecken, für die diese Fahrzeuge vorgesehen waren, kostengünstiger gewesen. Eben deshalb würden sich diese Fahrzeuge für einen Umbau als Versuchszüge geradezu anbieten, denn:

- Diese Züge sind mit dieselelektrischem Antrieb ausgestattet, verfügen also bereits über elektrische Fahrmotoren und Umrichter.
- Sie entstanden nach Angaben der DB auf der Plattform des 5-teiligen elektrischen Triebzugs der BR 415.
- Sie waren über den größten Teil ihres bisherigen Lebens außer Dienst gestellt.

- Sie standen zum Verkauf, aber niemand wollte sie haben.
- Als Grund für die beiden letztgenannten Punkte werden u. a. hohe Kraftstoffkosten angeführt.
- Zwei der Züge wurden deshalb 2016 verschrottet.
- Zwei weitere wurden bereits zu Versuchsträgern umgebaut – allerdings eben nicht für den Antrieb, sondern für Steuerungs- und Leitsysteme, aerodynamische Untersuchungen, Fahrer-Assistenzsysteme bis hin zum autonomen Fahren und anderes. 15 Stück warten also noch auf eine sinnvolle Verwertung.

Etwa 10 Jahre lang bediente ein Teil dieser Züge die 644 km lange Strecke von Berlin über Hamburg nach Kopenhagen, während die übrigen weiterhin im Depot standen. Noch 2010 war zu lesen: »Der ICE-Verkehr mit den dieselelektrischen Triebzügen BR 605 zwischen Berlin - Hamburg und Kopenhagen oder Århus ist weiterhin kommerziell sehr erfolgreich.«[55] Auch 2015 verlautete noch: »Zum Bestand gehören auch weiterhin 16 dieselelektrische Triebzüge BR 605, davon 13 mit Ausrüstung für den Verkehr nach Dänemark«,[56] doch wurde noch im selben Jahr das Ende angekündigt.[57] Die Tour verlief bis Hamburg über 285 km zunächst mit hoher Geschwindigkeit, aber ohne Halt, danach mit mehr Halten, aber recht gemächlichem Tempo, was jeweils den Kraftstoff-Verbrauch dämpfen sollte. Dieser wird für diese Strecke mit etwa 1,7 l/km angegeben[58]. Eine als Reaktion auf diese Veröffentlichung durchgeführte Simulationsrechnung ergab für den Streckenabschnitt von Berlin bis Hamburg einen Verbrauch von 2,1 l/km.[40] Damit verbraucht dieser dieselelektrische Zug mit 4 Wagen und einer höchstzulässigen Geschwindigkeit von 200 km/h nur unwesentlich mehr als die dieselhydraulische BR 612 mit nur 2 Wagen und einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Dies zeigt auf bemerkenswert deutliche Weise, warum der dieselelektrischen Kraftübertragung trotz des deutlich höheren Aufwands weltweit der Vorzug gegeben wird.

Bild 40: ICE BR 605 ohne Stromabnehmer – aber der Witz der Geschichte ist auch hier, wie so oft: Meistenteils fährt er doch unter einer Oberleitung!

Bild 41: Endlich kommerziell verfügbar: Rangierlokomotive mit Hybrid-Antrieb aus Diesel-Generator und Akkumulator, auf der Innotrans 2010 in Berlin der Fachöffentlichkeit vorgestellt

Getankt werden sollte aus Preisgründen vorzugsweise in Dänemark, doch dies erwies sich bei diesem Verbrauch als knapp. Auch ist der größere Teil der Strecke elektrifiziert. Da die sagenhafte »Feste Fehmarnbeltquerung« – ob nun als Brücke oder als Tunnel – noch auf sich warten lässt, wurden die Züge zwischen Puttgarden und Rødby auf eine Eisenbahnfähre verladen. Beim Einfahren wurden 3 der 4 Motoren abgeschaltet, um die Abgas-Belastung im Inneren des Schiffes zu begrenzen. Während der Überfahrt durfte dann gar kein Dieselmotor laufen, und der Zug wurde über Steckvorrichtungen vom Bordnetz des Schiffes

versorgt – sprich letztendlich wieder mit Strom beheizt, der aus Dieselgeneratoren stammte, während sich die Fahrgäste noch nicht einmal im Zug, sondern an Deck des Schiffes aufhielten.

Damit lagen die Kraftstoffkosten bei 1500 € für eine einfache Fahrt! Das entspricht rund 12 Vollpreis-Reisenden, 21 Fahrgästen mit BahnCard 50 oder 18 Inhabern von Sparpreis-Fahrkarten auf den insgesamt 195 Sitzplätzen, die laut DB zu 40% besetzt sein mussten, damit sich der Zug wirtschaftlich betreiben ließ. Dies entspräche 78 Fahrgästen, von denen also je nach Tarif 14%, 28% bzw. 22% allein für die Kraftstoffkosten zahlten. Wenn also Energiekosten bei der DB AG nur 3% ausmachen, so ist das dem hohen Grad der Elektrifizierung zu verdanken.

Was läge angesichts all dessen näher als 2 oder 3 der 4 Dieselaggregate gleich ganz auszubauen und den Platz zum Einbau von Akkumulatoren zu nutzen? 285 km am Stück mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 140 km/h schafft der Zug zwar mit einem Motor nicht mehr und mit zweien nur mit Mühe, wie die o. g. Simulation verdeutlichte, doch diese lässt wiederum die Frage offen, warum sie nur für diesen schnellen, im Idealfall mit konstanter Geschwindigkeit zu fahrenden Streckenabschnitt durchgerechnet wurde und nicht für die gesamte Strecke bis Kopenhagen. Schließlich gehört dieses Fahrzeug gar nicht auf eine durchgehend elektrifizierte Fernverkehrsverbindung.

Zu erwägen wäre daher der rein elektrische Betrieb gewesen, je nach Verfügbarkeit auf dem jeweiligen Streckenabschnitt aus dem Akkumulator oder dem Fahrdraht gespeist – zumal die einstmals weit hinterher hinkende Elektrifizierung bei den Danske Statsbaner große Fortschritte macht. Eine Baureihe, der zeitweise schon stark der zweifelhafte Ruhm einer Fehlplanung anhaftete, könnte hier zu einem Paradepferd und Vorzeige-Objekt der DB AG in Sachen Umweltschutz, Energie-Einsparung, Internationalität und vereintem Europa werden – und sich ganz nebenbei auch noch bezahlt machen, ehe die BR 605 zum »E 605« in den Bilanzen der DB AG wird. Womöglich fänden sich nun auf einmal Käufer für den Zug – aber dieser stünde nicht mehr zum Verkauf; es sei denn, er würde als neues Industrieprojekt aufgelegt und in entsprechenden Stückzahlen gezielt für den Export gebaut. Das wäre eine Sache der Bahnindustrie. Deren Totschlag-Argument ebenso wie vor allem das der DB AG ist, dass der Umbau eines vorhandenen Fahrzeugs stets mit erheblichem bürokratischem Verwaltungs-Aufwand für die Neuzulassung verbunden ist.

Entsprechende Vorschläge findet man nicht nur hier, sondern zumindest auch an einer anderen Stelle, nämlich bei niemand Geringerem als dem – an sich doch gar nicht für den Schienenverkehr zuständigen – Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), wie die Fachpresse berichtet. 19,2 t Batterien führt in deren Konzept »NGT LINK« ein Zubringerzug mit sich, ein Nachfolger für die IC-Züge mit einer Höchstgeschwindigkeit von 230 km/h, um zwischendurch auch »nicht elektrifizierte Strecken befahren zu können«.[59]

5.7.3 Hybrid-Antrieb im Nahverkehr – Versuche machen allmählich Mut

Im Personen-Nahverkehr gibt es mittlerweile einige – anfangs recht zaghafte – Versuche in diese Richtung. Nach einer Quelle[60] wurde 2010 lediglich einer der beiden Dieselmotoren zu je 315 kW des Dieseltriebwagens BR 642 weggelassen und der andere zusammen mit einer Elektromaschine auf einer Welle angeordnet. An anderen Stellen ist vom Austausch beider Aggregate die Rede. So gelangte man zu einem Parallel-Hybrid, bei dem der Dieselmotor indirekt über den Elektro-Antrieb und auch direkt auf die Antriebsräder arbeiten konnte, jedoch »der Antriebsstrang des hydrodynamischen Getriebes blieb unverändert«. Somit zog die Elektromaschine im Motorbetrieb darüber hinaus auch noch den Dieselmotor mit, und der verlustreiche hydrodynamische Antriebsstrang, über den die Elektromaschine nun zu

arbeiten gezwungen war, war für diese so überflüssig wie ein Kropf. Das war kein echter Hybrid-Antrieb, sondern Flickschusterei – genau wie man bei den Elektroautos über Jahrzehnte hinweg immer wieder einmal aus einem bestehenden, für einen Otto- oder Dieselmotor konzipierten Fahrzeug diesen ausbaute, durch einen Elektromotor ersetzte und so zielsicher vermied, dass die Vorteile des elektrischen Antriebs wirksam wurden. Die bescheidene elektrische Antriebsleistung und die geradezu spartanische Bemessung der Akkumulator-Kapazität konnten an dem Konzept nichts als Zweifel aufkommen lassen. Entsprechend erwartete man von diesem so genannten Hybrid-Triebwagen, der konsequenter Weise immer noch die Baureihennummer 642 trug (statt z. B. die 700er-Nummern hierfür heran zu ziehen oder gar eine 500er zu vergeben, was für »Akku-Triebwagen« stünde), Kraftstoff-Einsparungen »bis zu 25%«.

2017 nahm man sich wieder die BR 642 vor – dieses Mal schon etwas mutiger. Von einem seriellen Hybrid[61] war dort die Rede, also einem Diesel-Generator, der den Fahrstrom für ein eigentlich elektrisch fahrendes Fahrzeug erzeugt. So wird ein Schuh daraus. Schwerpunkt des Projekts soll denn auch eine möglichst weit reichende Erschließung des Rekuperationspotenzials sein. Die Akkumulator-Kapazität ist von niedlichen 4,7 kWh auf vernünftige 152 kWh angewachsen. Auch eine Steckdose zum Nachladen ist vorgesehen.

Gleiche Zeit, gleiche Baureihe: Auch die Idee der Kombination des Elektroantriebs mit Akkumulator, Dieselmotor und Stromabnehmer wurde nun zumindest als Konzept entworfen.[62] Dabei wurde auch gleich angedacht, die Elektrik so auszulegen, dass eine punktuelle Nachladung an gewissen kurzen »Oberleitungs-Ladepunkten« mit 50 Hz aus dem Landesnetz möglich ist.

5.7.4 Aus Angst vor Akku-Kosten: Das »Zweikraft-Fahrzeug«

Das »Zweikraft-Fahrzeug« dagegen gibt es schon lange, bei dem ein Elektro-Antrieb über Stromabnehmer und ein Diesel-Antrieb alternativ vorhanden sind. Diese sind jedoch gegeneinander »elektrisch verriegelt«, so dass sie sich nicht parallel betreiben lassen, denn dazu ist dieses Konzept nicht gedacht. Vielmehr sollen die Vorteile des Oberleitungsstroms genutzt werden, wo eine solche vorhanden ist. Daher sieht man seit einigen Jahren bei der DB AG wie bei Privatbahnen wieder sowohl Lokomotiven für Güter- und Personenzüge als auch Triebwagen mit Zweikraft-Antrieb auftauchen – auch wenn es sich bei der »zweiten Kraft« mehr oder weniger um eine »Behelfslösung« handelt. Gewöhnlich ist die Motorleistung, teilweise auch die Höchstgeschwindigkeit, bei diesen Fahrzeugen im Dieselbetrieb deutlich geringer als im elektrischen Betrieb.[63] Elektro-Traktion ist eben doch in vielerlei Hinsicht überlegen; nur diesen dummen Draht braucht sie immer noch. Der Akku könnte es richten…

Eine »Brückentechnologie« soll Ende 2020 in den Niederlanden in Betrieb gehen: Stadler will hier 18 Züge liefern, die zunächst als Zweikraft-Triebwagen 1,5 kV Gleichstrom / Biodiesel ausgeliefert werden sollen.[64] Später sollen die Dieselmotoren durch Akkumulatoren ersetzt werden. Mit einer Speicherkapazität von 180 kWh will man eine Reichweite von 150 km erzielen. Man rechnet also mit einem Energieverbrauch von 1,2 kWh/km.

5.7.5 Love me Tender!

Ein Projekt dagegen,[65] das ohne jede Öffentlichkeit und offenbar auch ohne öffentliche Förderung auskam, befasste sich mit der Entwicklung eines Tenders für Elektrolokomotiven,[66] der nicht weniger als 500 Mal so viel Energie zu speichern in der Lage sein sollte wie o. g. »Hybrid«-Umbau (Abschnitt 5.7.3). Damit wollte man Lücken in der Elektrifizierung des bestehenden Netzes ohne Lokwechsel durchfahren können. Allerdings hat man seither

auch nichts mehr davon gehört, und die entsprechende Webseite ist verschwunden. Sie kündigt lediglich noch an, dass das betreffende Institut »seine Pforten schließt«.

Ein ähnlicher Ansatz versuchte schon 1975 mit drei Prototypen, eine dieselelektrische Lokomotive auf elektrifizierten Streckenabschnitten rein elektrisch fahren zu lassen, indem man auf einen »Stromversorgungswagen«, der einen Bahntransformator beherbergte, einen Stromabnehmer setzte und eine entsprechende Verbindung zu der Lokomotive herstellte. Während dieses Projekt damals in erster Linie dazu diente, den Bahnbetrieb mit Drehstrom-Asynchronmotoren zu erproben und seine Tauglichkeit nachzuweisen, was 1983 in der BR 120 erstmalig umgesetzt wurde, wurde die ursprüngliche Idee 2016 wieder aufgegriffen: Acht dieselelektrische Lokomotiven der BR 245 können damit auf den Linien der Südostbayernbahn elektrisch fahren.[67] Damit muss dann zwar auf den nicht elektrifizierten Strecken noch immer mit Diesel gefahren werden – aber wenigstens nur dort.

5.7.6 Hybrid-Antrieb im Rangierdienst

Die Rangierlokomotive mit Hybrid-Antrieb hingegen gibt es schon. Nach 5 Jahren Entwicklungszeit wurde auf der Innotrans 2010 erstmals eine solche vorgestellt (Bild 41) und zu Preisen um etwa 1,6 Millionen Euro angeboten. Dabei handelte es sich damals noch um von Grund auf renovierte, umgebaute, sehr alte Lokomotiven der Reichsbahn der DDR. Sie wurden mit Nickel-Cadmium-Akkumulatoren ausgerüstet und die Leistung des Dieselmotors deutlich reduziert, der zudem erst automatisch anspringt, wenn die Akkuladung zur Neige geht. Anderenfalls wäre es vorhersehbar, dass die Lokführer, die den Kraftstoff nicht bezahlen müssen, aber Ärger bekommen, wenn die Lok nicht fährt, den Motor »vorsichtshalber« eben doch in gewohnter Manier dauernd laufen lassen. So aber werden 40%, teilweise je nach Quelle – und natürlich abhängig von der Betriebsart – auch 50% Kraftstoff-Einsparung angegeben. Die Amortisationszeit soll bei der für Rangierloks typischen Betriebsweise etwa 5 Jahre betragen. Dies erscheint plausibel, da sich diese Betriebsweise ganz erheblich vom Hybrid-PKW unterscheidet, wo man schon einen Ottomotor einbauen muss, damit der Hybrid-Antrieb noch etwas bringt, weil der Dieselmotor sich für das Anforderungsprofil im Straßenverkehr schon »zu gut« eignet.

Seither werden jedes Jahr mehr solche Rangierlokomotiven kommerziell angeboten, denn das Projekt wies in die richtige Richtung. So wäre es nun an der Zeit, mit dem in Abschnitt 2.3 erwähnten »Gütertriebwagen« einen neuen Anlauf in Hybridtechnik zu wagen.

6 Bilanz

Nun haben wir viele Aspekte des Bahnverkehrs betrachtet, wie er ist, wie er sein könnte, wie er sein sollte und wie er sich zur Zeit entwickelt. Die physikalischen Gegebenheiten wurden auf ihre Auswirkungen hin untersucht, Chancen und Risiken, Theorie und Praxis einander gegenüber gestellt. Was folgt aus all dem nun für die eingangs gestellten Fragen, etwa:

6.1 Ist die Bahn denn nun ein Energie sparendes Verkehrsmittel?

Eindeutig ja. Als Massenverkehrsmittel ist sie dem Individualverkehr in diesem Punkt naturgemäß deutlich überlegen. Das Flugzeug ist zwar auch ein Massenverkehrsmittel, kann aber auf Grund der außerordentlich hohen Geschwindigkeiten nicht gleichzeitig außerordentlich sparsam sein. Das ist physikalisch unmöglich. Allein ein Flugzeug mit einer Masse von 100 t, also einem Gewicht von ≈ 1 MN, in 10 000 m Flughöhe zu heben kostet theoretisch

$W = 10^6$ N * 10^4 m = 10^{10} Nm = 10^{10} J = 10 GJ ≈ 2,8 MWh

oder praktisch, wieder mit einem Wirkungsgrad von 33% gerechnet, etwa 1 t Kerosin. Danach nimmt sich das Flugzeug erstaunlich bescheiden aus. Trotz der hohen Geschwindigkeit ist der Bedarf pro Sitzplatz über die Strecke gemittelt nur unwesentlich höher als beim Auto, denn dort oben ist die Luft dünn und der Luftwiderstand entsprechend geringer. Die absoluten Verbräuche sind »nur« deswegen so hoch, weil die zurück gelegten Entfernungen auch ausgesprochen lang sind. Selbst gänzlich ohne jede Kraftstoffsteuer berichtet die Lufthansa daher von Treibstoffkosten in Höhe von 20% des Umsatzes – statt nur 3% bei der DB AG einschließlich »Schienensteuer«. So regt denn auch das Flugzeug schon die Gemüter wieder an, unter der Bezeichnung »Hyperloop« ein Netz ultraschneller Bahnen in Röhren mit vermindertem Luftdruck zu errichten, um den irgendwann mangels fossilen Kraftstoffs nicht mehr möglichen Luftverkehr zu ersetzen, denn der Kraftstoff ist in jedem Fall – Auto oder Flugzeug – endgültig verbrannt, verpufft und verloren. Nur der Schienenverkehr bietet dagegen die Möglichkeit des elektrischen Antriebs, der den Energiefluss im Prinzip umkehrbar macht. Schon seit über 30 Jahren wird bei vielen europäischen Bahnen die entsprechende Technik in die Triebfahrzeuge eingebaut, so auch bei der DB in die aktuelle Schnellzuglok der BR 101. Das Energiekostenmanagement der DB AG gab deren durchschnittliche Laufleistung für 2009 mit 347 620 km bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 15,2 kWh/km während der Fahrt an. Da sich wiederum ein Liebhaber gefunden hat, der ihr eine eigene Webseite widmet,[68] erfährt man dort weiterhin, dass diese E-Lok mit ihrer Motorleistung von üppigen 6600 kW für etwa 3 Millionen Euro zu haben ist. Das ist natürlich kein Pappenstiel! Der Energie-Verbrauch addiert sich aber zu etwa 5,28 GWh im Jahr oder knapp 160 GWh in 30 Dienstjahren. Dazu kommt ein Aufschlag von ≈ 10% für Verbrauch im Stillstand, der zum größten Teil auf die Zug(vor)heizung zurück zu führen sein dürfte. Den muss man mitrechnen, da man auch beim Dieselfahrzeug den verheizten Dieselkraftstoff zwangsläufig mitrechnen muss, wenn nur im Prinzip, nicht aber in der Praxis (Bild 22) getrennte Tanks verwendet werden. Mit dem Hochtarif (s. Abschnitt 1.3.2, Bild 17) gerechnet, liegen die gesamten Energiekosten in den 30 Dienstjahren der Lok also über 21 Millionen Euro – dem Siebenfachen des Anschaffungspreises! Selbst die mit der heutigen »suboptimalen« Fahrweise erreichte Rückspeisequote von 17% spart also über die Lebensdauer den Kaufpreis der kompletten Lok ein. Hier beim Einkaufspreis zu »sparen« wäre also eine der seltsamsten »Sparmaßnahmen« gewesen, die man sich hätte vorstellen können.

Von 2011 bis 2018 stieg der Anteil in das Fahrleitungsnetz zurückgespeister Energie von 8,9% auf 16,4% – von einem Bahnstrom-Verbrauch, der im selben Zeitraum von 10,4 TWh

auf 8,3 TWh fiel! Hieraus wiederum lässt sich zurückrechnen, dass von der Ersparnis von 2,1 TWh allein 14,75% auf das Konto der Rückspeisung gingen.

Dabei liegt der Anteil für die einzelne Lok, die das kann, etwas höher, da noch ein paar alte Loks unterwegs sind, die nicht zurück speisen können und so den Durchschnitt etwas herunter ziehen. In jedem Fall aber ist der Strom, so zu sagen, nach Gebrauch wieder vorhanden und kann erneut genutzt werden. Das funktioniert sonst nur bei Wasser (oder z. B. beim Kupfer!), aber niemals bei Kohle, Öl oder Gas und bei Uran auch nur sehr begrenzt. Die Schokoladenseite der E-Lok ist das, was sie mit dem berühmten Schokoriegel gemeinsam hat: Sie bringt verbrauchte Energie sofort zurück!

6.2 Könnte denn die Bahn noch mehr Energie sparen?

Eindeutig ja, und zwar insbesondere:

- Im Fernverkehr, wo sehr schnell gefahren wird,
- im Nahverkehr, wo oft gehalten wird,
- und im Güterverkehr, wo die bewegten Massen besonders groß sind.

Das Einspar-Potenzial liegt also bei der Bahn »insbesondere« … – überall! Sind die Potenziale auf der Straße und in der Luft während der letzten wenigen Jahrzehnte schon weit gehend erschlossen worden, blicken die Bahnen in einer Welt knapper und entsprechend teurer werdender Treib- und Brennstoffe dennoch einer großartigen Zukunft entgegen. Schon seit etlichen Jahren sind bei der Deutschen Bahn AG ebenso wie beispielsweise in den führenden »Bahn-Nationen« Frankreich und Japan optimale Züge und optimale Trassen in Betrieb, aber erst, wenn beides zusammenkommt, kommt der bereits lange – nicht nur auf dem Papier, sondern im wirklichen Leben – bestehende Fortschritt richtig zum Tragen. Die Elektrifizierung ist hierzu eine notwendige Voraussetzung.

Den Nachweis des prinzipiell minimalen Energiebedarfs im Schienenverkehr erbrachte 2016 eine Studentengruppe in Schweden:[69] Der kleine zigarrenförmige Versuchsträger konnte bis zu 6 Personen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 10 km/h befördern. Die Versuchsstrecke von 3,36 km Länge umfasste Steigungen und Gefälle von insgesamt nur rund 3 m. Dies jedoch reichte aus, damit das kleine Elektromotörchen nur knapp 10% der gesamten Fahrzeit arbeiten musste. Am Ende waren aus dem Akkumulator nur 0,84 Wh pro Person und Kilometer verbraucht worden. Das hätte man zwar ohne besondere Anstrengung auch ganz ohne Motor mit einer Schienendraisine bewältigen können, doch zeigt die pure Existenz dieser »Schienenfahrräder« schon das gleiche: Auf Schienen rollt es sich extrem leicht. – Und damit zurück zum wirklichen Leben:

6.2.1 Beispiel 1: Fernverkehr

Rechnerisch benötigt ein IC-Zug aus Lok und 3 Wagen, also aus 4 Fahrzeugen, bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h etwa 850 kW mechanischer Leistung allein zur Überwindung des Luftwiderstands. Hinzu kommen 200 kW für die Rollreibung; macht zusammen 1050 kW für die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, also 1050 kWh für 200 km oder 5,25 kWh/km. Der 4-teilige Dieseltriebwagenzug der BR 605 hat jedoch einen deutlich günstigeren c_w-Wert. Rechnet man mit 700 kW bei 200 km/h – plus wiederum 200 kW Rollreibung – so entspricht dies 900 kWh für 200 km oder 4,5 kWh bzw. (bei 33% Gesamt Wirkungsgrad) 1,5 l Kraftstoff für einen Kilometer. Der tatsächliche Verbrauch lag bei seinem letzten Einsatzfall bei 2 l/km.

Vergleich von Energieverbrauch und Energiekosten: E-Zug gegen Dieseltriebzug im Personenverkehr					
			E-Zug (IC-Zug mit BR 101 und Bistrowagen)	Dieseltriebzug (ICE TD BR 605 in Doppeltraktion)	
Nenn-Motorleistung gesamt			6600 kW	4480 kW	
Höchstzulässige Geschwindigkeit			200 km/h	200 km/h	
Anzahl Wagen (mit Bistro)			8	8	
Anzahl Sitzplätze			525	390	
Strecke gesamt	pro Jahr		380000 km	380000 km	
	in 30 Jahren		11,4 Mio. km	11,4 Mio. km	
Erzeugungsverluste			67%	15%	
Verbrauch im Fahrzeug	pro Fahrstrecke		15,2 kWh/km	3,7 l/km	37,0 kWh/km
	pro Sitzplatz	brutto	87,7 Wh/km	111,6 Wh/km	
		netto	29,0 Wh/km	0,95 l/100km	94,9 Wh/km
	pro Jahr		5,8 GWh	1406 m³	14,1 GWh
	in 30 Jahren		173,3 GWh	42180 m³	421,8 GWh
Preis			0,122 €/kWh	1,15 €/l	
Energiekosten	pro Fahrstrecke		1,85 €/km	4,26 €/km	
	pro Sitzplatz		0,353 ct/km	1,091 ct/km	
	pro Jahr		704672 €/a	1616900 €/a	
	pro Sitzplatz & pro Jahr		1342 €/a	4146 €/a	
	in 30 Jahren		21,14 Mio. €	48,51 Mio. €	
	pro Sitzplatz in 30 Jahren		40267 €	124377 €	

Tabelle 7: Exemplarischer Vergleich von Energieverbrauch und Energiekosten eines Elektrozuges mit einem Dieseltriebzug im Personenverkehr

In Tabelle 7 wurde dies einander gegenüber gestellt, basierend auf den folgenden Angaben und ergänzenden Annahmen:

- Die spezifischen Verbräuche liegen bei 15,2 kWh Strom je Kilometer für die E-Lok BR 101 und 1,7 l Dieselkraftstoff je Kilometer für den Dieseltriebwagen BR 605. Diese Werte stammen aus der betrieblichen Praxis.
- Der 4-teilige Dieseltriebwagenzug BR 605 wird hier (in Doppeltraktion) mit einem elektrisch betriebenen IC-Zug mit 8 Wagen verglichen – beim Fahrwiderstand einschließlich Bistrowagen, bei den Sitzplätzen jedoch mit nur 7 Wagen gerechnet, denn auch die beiden Dieseltriebwagenzüge führen je ein kleines Bistro mit.
- Die Jahreslaufleistung der BR 101 wird mit 380 000 km angegeben. Für die BR 605 lagen keine Angaben vor. Wegen der Gleichheit der Höchstgeschwindigkeit wurde der gleiche Wert wie für den Elektrozug angenommen.
- Um nicht nur die ökonomische, sondern auch die ökologische Rentabilität vergleichen zu können, wurde – ganz pessimistisch, aller Energiewende zum Trotz – eine rein thermische Strom-Erzeugung und einschließlich Übertragungs- und Verteilstrukturen ein Gesamt-Wirkungsgrad von ≈ 33% bis zum Stromabnehmer angenommen.
- Entsprechend wurde für die Herstellung von Dieselkraftstoff ein »Wirkungsgrad« von 85%, also 15% Energie-Verbrauch im Herstellungs- und Transport-Prozess aus Erdöl, eingesetzt.

Bestand		BR	geliefert	2007	2008	2009	2010	2011	2014	2015	2016	Alter
Schaltwerks-Triebfahrzeuge	Lokomotiven DB Fernverkehr	103	1972 bis 1974	3	3	3	3	1	3	2	2	40a bis 42a
		113	1962 bis 1963	1	3	2	3	3	0	0	0	51a bis 52a
		115	1962 bis 1964	36	36	28	19	17	12	10	8	50a bis 52a
		181.2	1974 bis 1975	0	0	0	0	0	0	8	8	39a bis 40a
	Lokomotiven DB Regio	110	1957 bis 1969	161	140	109	88	64	18	0	0	45a bis 57a
		111	1975 bis 1984	226	225	225	225	224	203	193	189	30a bis 39a
		112	1992 bis 1993	90	90	89	89	89	89	88	88	21a bis 22a
		114	1990 bis 1992	40	40	40	39	38	37	36	36	22a bis 24a
		143	1984 bis 1990	616	600	556	520	487	322	273	243	24a bis 30a
	Triebwagen DB Regio	420	1969 bis 1994	206	196	189	167	163	151	78	78	20a bis 45a
		450		4	4	4	4	4	4	4	4	
	Lokomotiven DB Cargo	140	1957 bis 1973	238	214	172	74	81	42	41	17	41a bis 57a
		151	1973 bis 1975	164	164	163	140	133	90	87	79	39a bis 41a
		155	1974 bis 1984	177	216	219	195	185	138	111	67	30a bis 40a
	Summen bzw. Mittelwerte	Lokomotiven		1752	1731	1606	1395	1322	954	849	737	40a
		Triebwagen / Triebzüge		210	200	193	171	167	155	82	82	33a
		Gesamt		1962	1931	1799	1566	1489	1109	931	819	**36a**
Rückspeisefähige Triebfahrzeuge	Lokomotiven DB Fernverkehr	101	1996 bis 1999	145	145	145	145	145	145	145	145	15a bis 18a
		120	1987 bis 1988	58	53	53	52	50	48	48	44	26a bis 27a
	Triebwagen DB Fernverkehr	401	1989 bis 1993	59	59	59	59	59	59	59	58	21a bis 25a
		402	1995 bis 1997	44	44	44	44	44	44	44	44	17a bis 19a
		403	ab 1997	50	50	50	50	50	50	50	50	bis 17a
		406	ab 1997	13	13	13	13	13	13	13	13	bis 17a
		407		0	0	0	0	0	4	8	12	
		409		2	2	2	2	2	0	0	0	
		411	1999 bis 2005	57	56	56	56	56	56	56	56	9a bis 15a
		415	1999 bis 2005	11	11	11	11	11	11	11	11	9a bis 15a
	Lokomotiven DB Regio	120	1987 bis 1988	0	5	5	5	8	8	8	8	26a bis 27a
		146	2001 bis 2006	110	110	110	110	110	110	110	142	8a bis 13a
		182	2001	0	0	0	5	25	25	25	25	13a
	Triebwagen DB Regio	422	2007 bis 2010	0	0	24	64	84	84	84	84	bis 7a
		423	1998 bis 2007	448	448	448	461	461	461	460	461	bis 16a
		424	ab 1998	40	40	40	40	40	40	40	40	bis 16a
		425	ab 1999	236	236	249	249	249	249	249	249	bis 15a
		426	ab 1999	42	42	42	42	42	42	42	42	bis 15a
		427	ab 2004	0	5	5	5	5	5	0	0	bis 10a
		428	ab 2014	0	0	0	0	0	0	3	14	bis 0a
		429	ab 2014	0	0	0	0	0	0	20	28	bis 0a
		440	ab 2008	0	0	4	37	80	80	102	108	bis 6a
	Lokomotiven DB Cargo	145	1998 bis 2000	79	79	79	79	79	79	79	79	14a bis 16a
		152	1997 bis 2001	170	170	170	170	170	170	170	170	13a bis 17a
		180	1988	15	15	15	10	10	10	0	0	26a
		182	2001	25	25	25	20	0	0	0	0	13a
		185	2000 bis 2009	279	319	356	375	399	385	385	385	5a bis 14a
		186	2011	0	0	0	0	20	20	8	0	3a
		189	2002 bis 2005	90	90	90	90	90	90	90	90	9a bis 12a
	Summen	Lokomotiven		971	1011	1048	1061	1106	1090	1068	1088	17a

Tabelle 8: Entwicklung des Bestands alter und neuer elektrischer Triebfahrzeuge bei der DB AG im Detail

Das Ergebnis besteht aus nichts als Pluspunkten für die elektrische Zugförderung:

+ Die jährlichen Energiekosten je Kilometer liegen beim Diesel-Betrieb gut doppelt so hoch, je Kilometer und Sitzplatz **3 Mal so hoch** wie beim Elektro-Betrieb! Diese Diskrepanz ist natürlich großenteils auf die denkwürdige Preispolitik beim Dieselkraftstoff (»Schienensteuer«) zurück zu führen, aber dennoch:
+ Bei der Primärenergie ergibt sich selbst mit den hier sehr ungünstigen Annahmen, wenn man ausschließlich von Wärmekraftwerken alter Prägung mit mäßigen Wirkungsgraden ausgeht, immer noch eine Einsparung von über 25%. Die neuesten GuD-Anlagen[70] er-

reichen jedoch schon 60% Maschinen-Wirkungsgrad, was einem Gesamt-Wirkungsgrad bis zur Lok – Stromabnehmer bzw. Einfüllstutzen – von 55% entspräche. Damit ergäben sich etwa 45% Brennstoff-Einsparung! Denn was nützt der Diesellok ein guter, aber eben auf die Nennleistung bezogener Motor-Wirkungsgrad von über 40%, wenn dieser Motor 80% seiner Betriebsdauer im Leerlauf verbringt und sich gar – bei einigen älteren Baureihen – zur Vernichtung der Bremsenergie noch zusätzlich anstrengen muss? Womöglich wäre hier eher der Leerlauf-Verbrauch die entscheidende Größe.

+ Je mehr Strom aus regenerativer Erzeugung im Kraftwerksmix enthalten ist, desto »grüner« wird die elektrische Zugförderung gegenüber dem Dieselfahrzeug. Die DB nimmt hier für ihre Bahnstromversorgung in 2018 eine Quote von 57% regenerativer Erzeugung in Anspruch[4] gegenüber 39% in der öffentlichen Versorgung.
+ Entsprechend fällt natürlich der Vergleich mit dem Haupt-Konkurrenten, dem Individualverkehr mit dem privaten PKW, aus: Wenn ein ICE-Zug mit 450 Sitzplätzen zur reinen Überwindung der Reibungswiderstände eine Antriebsleistung von 4,5 MW benötigt, um eine Geschwindigkeit von 300 km/h aufrecht zu erhalten, macht das 10 kW pro Sitzplatz aus. Der PKW benötigt bei »nur« 200 km/h bereits 25 kW je Sitzplatz. Bei dieser Geschwindigkeit benötigt der Zug nur noch 4 kW je Sitz. Gelingt es, durch die Vervollständigung der optimierten elektrischen Antriebe in einer noch zu optimierenden Umgebung die enorme kinetische Energie größtenteils zurück zu gewinnen, ist dies schon »die halbe Miete« und der Elektrozug der Gewinner.

Man darf also wohl davon ausgehen, dass im bestehenden elektrifizierten Regionalverkehr – allein durch weitestmögliche Ausnutzung der Rückspeisung und die Umstellung auf Triebzüge – noch ein Einsparpotenzial von 30% steckt! Im »konventionellen« Fernverkehr – IC, ICE1, ICE2 – dürfte es ähnlich aussehen; ICE3 und ICE-T sind hier weiter entwickelt. Der ICE4 macht noch einige Verbesserungen im Detail, wie verminderte Masse und besseren c_W-Wert, für sich geltend. Bei IC-Zügen liegt eine Möglichkeit der Verbesserung, die zum Teil schon praktiziert wird, in der »Sandwich-Traktion«: Der Zug bekommt eine zweite Lok am anderen Ende. Eine zweite Lok ist sehr teuer, aber der eingesparte Steuerwagen ist auch deutlich teurer als ein Mittelwagen, was die Kosten der Maßnahme dämpft.

6.2.2 Beispiel 2: Nahverkehr

Im Nahverkehr wird dagegen langsam gefahren, aber umso häufiger gehalten. Folglich sehen die Verhältnisse dort ganz ähnlich aus. Auch hierzu wurde ein Beispiel herausgegriffen, das nachfolgend dargestellt werden soll:

Fahrstrecke		100 km
Fahrzeit nach Plan	**netto**	1:26 h
	brutto	1:54 h
Anzahl Stationen		20
Fahrzeugmasse		90 t
Rollwiderstand		1,7‰
		1,50 kN
Wirkungsgrad	**Diesel**	35%
	elektrisch	85%
Energiepreis	**Diesel**	1,15 €/l
	elektrisch	11,4 c/kWh

Tabelle 9: Ausgangsdaten …

Geschwindigkeit			v_{min}	v_{mittel}	$v_{max[zul]}$
			70 km/h	**95 km/h**	120 km/h
Luftwiderstand			1,85 kN	**3,42 kN**	5,47 kN
Leistung für $v = const$			64,9 kW	**88,3 kW**	135,1 kW
Energiebedarf mechanisch	**Reibung $F_{roll} + F_{Luft}$**		93,0 kWh	**136,7 kWh**	193,6 kWh
	Beschleunigungen	**Diesel**	93,9 kWh	**173,7 kWh**	277,8 kWh
		elektrisch	23,5 kWh	**43,4 kWh**	69,4 kWh
	Gesamt	**Diesel**	186,9 kWh	**310,3 kWh**	471,4 kWh
		elektrisch	116,5 kWh	**180,1 kWh**	263,0 kWh
Mittlerer Bedarf mech. Leistung		**Diesel**	98,4 kW	**163,3 kW**	248,1 kW
		elektrisch	61,3 kW	**94,8 kW**	138,4 kW

Tabelle 10: … und Ergebnisse einer Betrachtung aus dem Nahverkehr

Die Regionalbahnlinie RB 51 benötigt für die etwa 100 km lange Strecke von Dortmund nach Enschede knapp 2 Stunden und hält auf der Strecke 20 Mal. Zieht man die fahrplanmäßigen Haltezeiten ab, so bleiben knapp 1,5 h reine Fahrzeit übrig. Dies ergibt eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, solange der Zug denn fährt, von ≈ 70 km/h (Tabelle 9). Mit dieser Geschwindigkeit zu rechnen ist natürlich unrealistisch, da dann die Beschleunigungs- und Bremsphasen vernachlässigt würden. Mit der höchstzulässigen Geschwindigkeit von 120 km/h zu rechnen wäre ebenso unrealistisch, da diese nicht notwendiger Weise zwischen zwei Halten immer – sondern im praktischen Betrieb eher selten – wirklich erreicht wird. So wurde in bestmöglicher Näherung mit 95 km/h der Mittelwert zwischen beiden als die stets zwischen zwei Halten gefahrene Geschwindigkeit angenommen, um den Bedarf an mechanischer Energie für eine Fahrt abzuschätzen. Dabei wurde für die Luftreibung so gerechnet, als führe das hier eingesetzte Fahrzeug (BR 643 in 3-teiliger Ausführung) konstant ohne Halt die gesamte Strecke mit dieser Geschwindigkeit. Zur Errechnung des Energie-Bedarfs für die 20 Beschleunigungen wurde ebenfalls diese Geschwindigkeit von 95 km/h und die Masse eines etwa halb voll besetzten Fahrzeugs angenommen. Die Ergebnisse (Tabelle 10) zeigen, ähnlich wie zuvor für den Fernverkehr und in Abschnitt 3.5.3 für den Regionalverkehr dargestellt:

- Vom gesamten Bedarf nach mechanischer Energie von 310 kWh entfallen etwa 174 kWh auf die 20 Beschleunigungen und nur etwa 137 kWh auf Roll- und Luftreibung. Somit fällt beim Diesel-Betrieb mehr als die Hälfte der erzeugten mechanischen Energie letztlich der Bremse zum Opfer.
- Nimmt man an, ein elektrischer Antrieb ermögliche die optimale Rekuperation von 75% der kinetischen Energie, so ließe sich der Bedarf an mechanischer Energie insgesamt von 310 kWh auf 180 kWh reduzieren.
- Der mittlere Bedarf an mechanischer Leistung für die Fahrt fiele von 193 kW auf 95 kW.
- Ein Dieselmotor, der (inklusive Hilfsbetriebe) knapp 2 Stunden lang gut 100 kW mechanisch plus knapp 200 kW thermisch abgibt, wird in dieser Zeit etwa 45 l Kraftstoff verbrauchen.
- Die bisher auf der Strecke verkehrende BR 643 verbraucht dagegen ≈ 90 l für eine Fahrt.
- Der Kraftstoff-Verbrauch ließe sich also grob halbieren.

Steigungen sind in der hier beispielhaft ausgewählten Strecke nicht enthalten (schließlich führt sie in die *Nieder*lande). Hätte man etwa die RB 52 von Dortmund nach Lüdenscheid (Bild 39) ausgewählt, käme noch hinzu, dass allein die 135 m Höhendifferenz auf den letzten 5 km von Brügge(W) bis Lüdenscheid ≈ 10 l Kraftstoff kosten. Die Elektrotraktion könnte davon auf dem Rückweg umgerechnet etwa 7,5 l wieder »zurückholen«. Bei der derzeitigen Praxis sind sie verloren und kosten auch noch Bremsbeläge. Zudem fährt dieser Dieseltriebzug nur etwa 40 km weit und davon fast die Hälfte unter Oberleitung, wo während der Fahrt nachgeladen werden könnte. Hier wäre die voll elektrische Akku-Lösung angesagt.

Mittlerweile ist Lüdenscheid auch von Köln direkt erreichbar. Die auf jener Strecke eingesetzten Züge der BR 620 haben das doppelte Gewicht. Damit verdoppelt sich der betreffende Verbrauch auf dem »letzten Hügel« für diese gleich mal auf ≈ 20 l Kraftstoff – und das Sparpotenzial entsprechend.

6.3 Ausblick

Dabei geht der Trend bereits seit langem in die richtige Richtung: Seit Mitte der 90er Jahre sind die spezifischen, auf die Beförderungsleistung bezogenen CO_2-Emissionen im Personenverkehr bereits um 25%, im Güterverkehr sogar um 29% zurück gegangen. Dies dürfte

zum größten Teil auf die weiter voran schreitende Elektrifizierung und den Ersatz alter Schaltwerks-Elektroloks durch neue, rückspeisefähige Fahrzeuge zurück zu führen sein (Bild 42).[71] International kann sich die DB hier sehen lassen: In einer Präsentation auf dem »Bombardier Kundentag« heißt es, von den weltweit laufenden 47 000 Lokomotiven seien keine 30% E-Loks, und das durchschnittliche Alter liege bei 27 Jahren![72]

Dabei wiegt besonders schwer, dass die DB AG für Dieselkraftstoff offenbar einen ähnlich hohen Steuersatz bezahlen muss wie der Autofahrer. Heizöl kostet nur die Hälfte. Die in der öffentlichen Wahrnehmung ebenso wie im wirklichen Leben vorhandenen ökologischen Vorzüge der Züge könnten vorzüglich genutzt werden, um den Vorsprung weiter auszubauen. Dies sollte in der Öffentlichkeit und in der Politik möglichst noch weiter gehend als bisher wahrgenommen werden. Das BMBF und die EU-Kommission fänden hier wirklich förderungswürdige Projekte vor, die Europa über die erzielbare Energie-Einsparung hinaus als Technologie-Standort stärken könnten.

Mittlerweile – während die Modernisierung der Bahntechnik bereits in vollem Gange ist – ist auch das Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur dahinter gekommen, von welcher Bedeutung dies ist, und will die entsprechenden Bemühungen von 2018 bis 2023 mit nicht weniger als 500 Millionen Euro unterstützen:[73] »Diese Richtlinie fördert insbesondere folgende Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur CO_2-Reduktion:

- Entwicklung oder Anschaffung neuer Stromrichtertechnologie
- Einführung vernetzter Fahrerassistenzsysteme
- Ausweitung der technischen Möglichkeiten zur Rückspeisung von Fahrstrom
- Anschaffung modernisierter oder neuer effizienterer Fahrzeuge / Fahrzeugtechnik zur Steigerung der Energieeffizienz und zur CO_2-Reduktion
- energiesparende Hybrid-/ Zweikraftlösungen für Loks
- moderne emissionsreduzierende Komponenten für Loks und Güterwagen
- Digitalisierung EVU-Flotten im Schienengüterverkehr
- Weiterentwicklung Standards und Sensorik für Internet of Things und Asset Intelligence im Schienengüterverkehr für Loks
- Ausrüstung von Güterwagen und Lok-Flotten mit moderner Sensorik und Digitaltechnik sowie deren Vernetzung
- Automatisierung im Schienenverkehr
- Automatisierung im Nahbereich und Zugbildung sowie Prozessautomation an der Schnittstelle zum Kunden im Schienengüterverkehr, (Weiter-)Entwicklung Assistenzsysteme und Automated Train Operation (ATO) im Fernbereich
- Automation von Zugbildungsanlagen und die Nahbereichsbedienung mit den Kunden
- Engineering und Ausrüstung von Streckenlokomotiven mit sogenannten ATO-Boxen (Autopilotfunktion)
- Automatisierung im Personenverkehr sowie ATO-Box
- Erhöhung Energieeffizienz Nebenverbraucher.«

Für jene Strecken, auf denen sich eine Elektrifizierung trotz alledem nach gegenwärtigen Praktiken und Rechenmethoden noch immer nicht lohnt, wurden Vorschläge entworfen, wie in Zukunft vielleicht der Strom für ein Elektrofahrzeug mitgenommen werden kann. Hoffnungen erweckende Fahrzeuge werden bereits angeboten, aber die DB ordert vorsichtshalber erst noch mal eine ordentliche Portion ganz konventioneller Dieseltriebwagen (Ab-

schnitt 5.6). Also muss z. B. auch das Angebot von Fahrkarten »mit 100% regenerativ erzeugtem Strom«[74] auf den Fernverkehr beschränkt bleiben, wo ausschließlich elektrisch gefahren wird. Auf den Nebenstrecken müsste zumindest durch Einsatz von deutlich mehr Elektrotechnik dem Dieselmotor beigebracht werden, den Kraftstoff weitaus besser auszunutzen als dies mit der derzeitig angewandten Technik möglich ist. Deutlich besser jedoch ist die zur Zeit völlig richtiger Weise immer weiter fortgeführte Elektrifizierung des Streckennetzes:

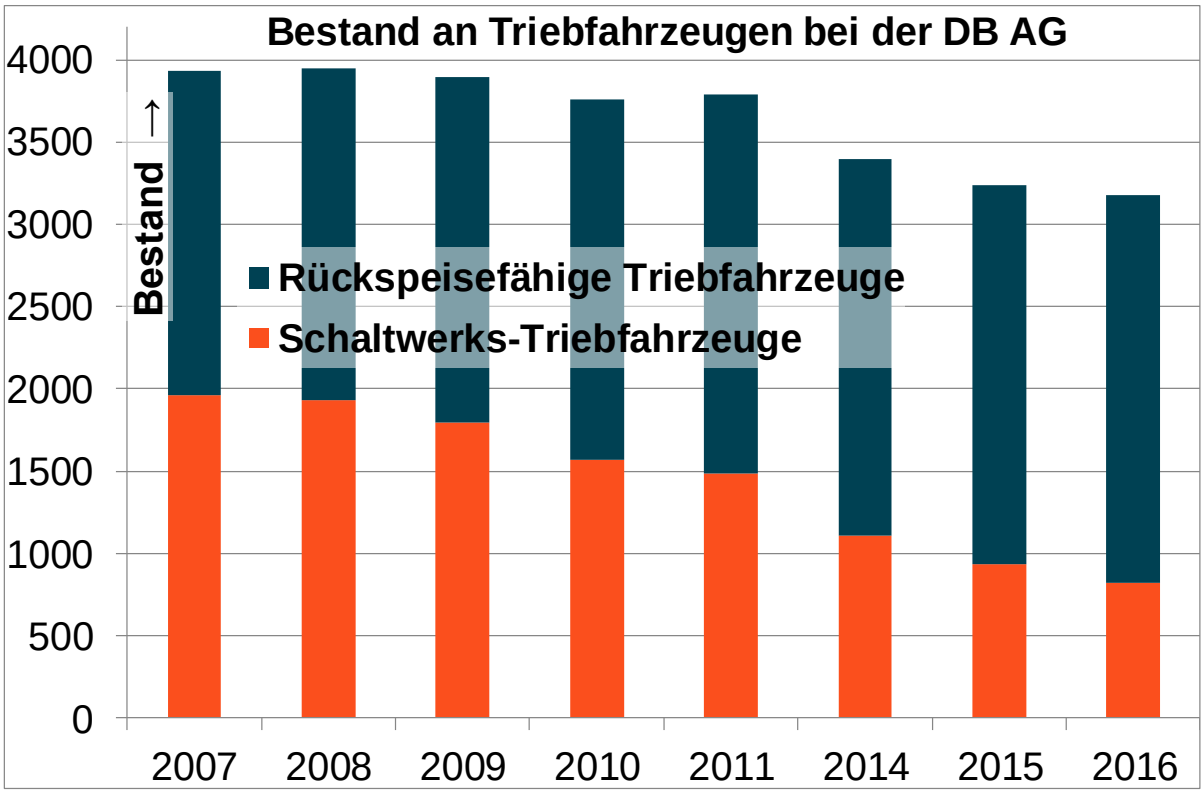


Bild 42: Entwicklung des Bestands alter und neuer elektrischer Triebfahrzeuge bei der DB AG in der Übersicht

- Fahren wir doch mal mit dem ICE3 über die Schnellfahrstrecke in 47 min 164 km weit von Köln-Deutz (ohne Halt) nach Frankfurt Flughafen. Dann kostet die einfache Normalpreis-Fahrkarte 2. Klasse 73 €. Sind von den 390 Sitzplätzen die Hälfte besetzt (was auf dieser Strecke wenig ist), dann sind in dem Fahrpreis knapp 3 € für Strom enthalten; gut 70 € kostet der gesamte Rest.
- Oder fahren wir doch mal in eher gemütlichen 7 h mit dem Doppelstock-IC von Köln nach Dresden. Der Zug ähnelt sehr dem Regional-Express von Dortmund nach Aachen (Abschnitt 3.1; Bild 33), doch kostet die einfache Normalpreis-Fahrkarte 2. Klasse hier 119 €. Sind wiederum etwa die Hälfte der 468 Plätze besetzt, dann sind in dem Fahrpreis gut 3 € für Strom enthalten (1 € für die 19 Beschleunigungen von 0 auf 160 km/h, 2 € für die Reibung auf der 700 km langen Fahrstrecke – umgekehrt wie beim Regional-Express wegen der im Mittel etwa 4 Mal so großen Entfernungen von Halt zu Halt).

Dies lässt zweierlei Schlüsse zu.

- Entweder: »Da sieht man, wie wenig Energie die Bahn schon jetzt verbraucht!«
- Oder: »Energie ist noch immer viel zu billig, um mit Kostenreduktion zu argumentieren!«

Beide sind richtig und berechtigt, doch wie auch immer – wo ist da nun der große ökonomische Hebel, die Betreiber zu motivieren, um von dem »1-€-Job« der Beschleunigungen annähernd 75% (statt wie bisher nur rund 20%) einzusparen? Mit einem PKW, in dem 2 von 4 Plätzen besetzt sind, von Köln nach Dresden zu fahren, kostet jeden der beiden Insassen allein für die Energie mal gleich das 10-Fache wie im Zug. Würde der Zug von einer Diesellok gezogen, sähe er allerdings auch nicht viel besser aus als der PKW. Wenn aber die Bahnen sich als extrem sparsam mit Energie umgehende Unternehmen profilieren wollen, dann **muss** dieser Hebel hier angesetzt werden! Das kann also nur die E-Mobilität.

---

[1] Bulletin Electrosuisse 10/2005, S. 29

[2] https://reporting.sbb.ch/_file/343/die-sbb-in-zahlen-und-fakten-2017.pdf

[3] https://presse.oebb.at/file_source/corporate/presse-site/Presseinformationen/2018/03/20180327_PI_Infra_KW-ObervellachII_Kaernten.pdf

[4] »DB Energie – Strom für die Deutsche Bahn – Anteil der erneuerbaren Energien steigt auf 57 Prozent.« https://www.dbenergie.de/resource/blob/3528740/dfe99555fe2ded3702e36a3b41b5b8fd/1118_80Prozent-data.pdf

[5] s. z. B. https://www.uniper.energy/de/kraftwerk-schkopau

[6] »Energiesparende Zahnstangenweiche«. Privatbahn-Magazin 4/2011, S. 26

[7] Markus Hecht, Carl-Roman Culemann: »Klimaschutz als Chance für die Bahn«. Deine Bahn 12/2018

[8] »Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2010«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 1-2 / 2011, S. 3

[9] Stefan Fassbinder: »Euroverbundnetz – wie funktioniert das?« Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik 11/2009, S. 55

[10] »Statische Frequenzumrichter – erste Anwendung für 50 Hz/50 Hz weltweit«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 8/2015, S. 392

[11] https://www.db-systemtechnik.de/resource/blob/1665152/b1e975afc4621103696b63e8247d37ce/Aktuell_D_Schulbroschüre-Regensburg_Das-System-Bahn---der-ICE-data.pdf

[12] F. Huneke, C. Perez Linkenheil, M. Niggemeier: »Kalte Dunkelflaute«, Greenpeace 2017, https://www.greenpeace-energy.de/presse/artikel/erst-windgas-und-flexible-langzeitspeicher-helfen-gegen-die-kalte-dunkelflaute.html

[13] Formeln und v. a. Werte für diese Berechnungen siehe Dr. Peter Spiess: »Fahrdynamik des Schienenverkehrs«, 2005, www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids_lehre/SFZ/Fahrdynamik_2006.pdf

[14] Bundesnetzagentur: Marktuntersuchung Eisenbahnen 2013 (https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2013.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

[15] Union Internationale des Chemins de Fer – www.uic.org

[16] Marin Kache; David Trinkle; Marcel Frank: »Analyse des Kraftstoffverbrauchs bei dieselhydraulischen Lokomotiven«, EI Der Eisenbahn-Ingenieur 08/2013, S. 61

[17] www.v160.de

[18] Deutsche Bahn AG, Geschäftsbericht 2001

[19] VDE-Studie »Energieoptimaler Bahnverkehr – auf dem Weg zum 1-Liter-Zug – Potenziale und Prioritäten auf der Basis von Zahlen und Fakten«, S. 43 & 44, https://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/article/26398/vde-studie-energieoptimaler-bahnverkehr-auf-dem-weg-zum-aa-liter-zug

[20] Uwe Behmann, Siegfried Großmann: »Bahnenergiemessung und -rückspeisung bei den DB-Verkehrsunternehmen«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 4/2014, S. 168

[21] Stefan Fassbinder: »Technik der Energiewende«. Elektropraktiker 2016, http://shop.elektropraktiker.de/item/Technik-der-Energiewende-PDF.html

[22] Marktuntersuchung Eisenbahn 2013 (https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2013.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[23] »Deutsche Bahn 2017 – Integrierter Bericht«, https://www.deutschebahn.com/de/investor_relations/ib_online-1187368

[24] Physiker, die es ganz genau nehmen, weisen darauf hin, dass in ihrer Terminologie unter Quantensprung die kleinstmögliche Zustandsänderung (eines Atoms) verstanden wird – doch für ein Atom ist eben diese Änderung schon relativ groß, und genau darauf zielt die Redensart ab

[25] www.fluegelzuege.de

[26] www.ns.nl

[27] European Copper Institute: »Optimal reduction of energy losses in catenary wires for DC railway systems«. Arnhem, 2000. Verfügbar auf: www.leonardo-energy.org/optimal-reduction-energy-losses-catenary-wires-dc-railway-systems

[28] Frederik Groeman: »Benefits of upgrading the overhead line of a DC railway line in the Netherlands a simulation case study«. Arnhem, 2001

[29] www.kruch.at

[30] http://de.wikipedia.org/wiki/Schnellfahrstrecke_K%C3%B6ln%E2%80%93Rhein/Main

[31] Bahntech 2/2008, S. 19

[32] Frank Becker: »Untersuchung des Nutzens von Energiespeichern im Freiburger Straßenbahnnetz«, »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 9/2019, S. 353

[33] Elektropraktiker: Dossier Technisches Licht (https://shop.elektropraktiker.de/item/Technisches-Licht-2019-PDF.html?s=b8ksabj4p8nr688gzdk87ib4q6qpfj9t44bxxq&r=b8ksbbj4pkpr6e8gzdqn7ib4q6qpfjbtq4blfq)

[34] Stefan Fassbinder: »Berechnungsgrundlagen für Zugvorheizanlagen«. »de« Der Elektro- und Gebäudetechniker 17/2005, S. 18, https://www.elektro.net/wp-content/archiv/2005/17/de_17_05_PP03.pdf

[35] Eberhard Buhl, Interview mit Dr. Johann Pluy, Geschäftsbereichsleiter Energie bei der ÖBB Infrastruktur AG, »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 8/2011, S. 380

[36] Uwe Behmann: »Einfluss veränderter Betriebsstrukturen auf die Bahnenergieversorgung«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 12/2013, S. 708

[37] Stefan Fassbinder: »Elektrische Leiter – Alternativen zu Kupfer?« Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik 10/2009, S. 23

[38] Stefan Fassbinder: »Kupfer: Es ist genug für alle da!« »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 8/2015, S. 30

[39] www.eisenbahn-kurier.de/startseite/449-suedostbayernbahn-erhaelt-acht-neue-diesellokomotiven

[40] »Leserforum.« »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 5 / 2012, S. 182

[41] www.eisenbahn-kurier.de/startseite/434-bombardier-praesentiert-die-neueste-traxx-generation

[42] »E-Lok mit Rangierdieselmotor«. EI Der Eisenbahn-Ingenieur 6/2011, S. 62

[43] www.container-linienzuege.de

[44] Stefan Fassbinder: »Leitungsungebundene Energieübertragung – Teil 3: Größere stationäre und mobile Systeme.« Elektropraktiker 3/2012, S. 196

[45] http://de.wikipedia.org/wiki/DB-Baureihe_ETA_150

[46] https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4045194/462384b76cf49fe8ec715f41e4a3202a/19-03-IB-data.pdf

[47] Uwe Behmann: »Weltpremiere für Brennstoffzellenzüge«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 4 - 5/2018, S. 116, fortgesetzt in »Dieseltriebzüge mit Hybridantrieb«, »eb« 10/2018, S. 389

[48] Maik Manthey, Stephan Zwiehoff: »Zwei-Wege-Rangierfahrzeuge mit neuartigem Antriebskonzept«. EI – Der Eisenbahn-Ingenieur 06/2013, S. 12

[49] »Desiro ML – Cityjet eco«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 10/2018, S. 382

[50] www.railwaygazette.com/news/single-view/view/independently-powered-emu-to-be-tested.html

[51] »Tagung Moderne Schienenfahrzeuge in Graz«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 11-12/2014, S. 112

[52] »EBA erteilt Deutschland-Zulassung für Pesa Link.« EI Der Eisenbahn-Ingenieur 07/2018, S. 54

[53] https://web.archive.org/web/20140318121529/http://www.pesa.pl/download/ENG/dmu.pdf

[54] TALBOTs leichter Niederflur-Triebwagen

[55] »Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2009«, »eb« Elektrische Bahnen – Elektromobilität im Verkehrswesen 1 - 2/2010, S. 18

[56] »Elektrische Triebfahrzeuge der DB – Teil 1«, »eb« Elektrische Bahnen – Elektromobilität im Verkehrswesen 4/2015, S. 178

[57] »Einsatzende für dieselelektrische Triebzüge ICE-TD«, »eb« Elektrische Bahnen – Elektromobilität im Verkehrswesen 10/2015, S. 525

[58] http://de.wikipedia.org/wiki/DBAG-Baureihe_605

[59] Joachim Winter: »Das andere HGV-Konzept: NGT LINK«. Privatbahn-Magazin 04/2014, S. 22

[60] »Hybrid-Antrieb: ab 2011 Testbetrieb«. EI Der Eisenbahn-Ingenieur 11/2010, S. 63

[61] Andreas Albrecht: »Eco Train – Umbau eines Triebzuges BR 642 zum Hybridtriebzug«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 1/2017, S. 24

[62] Falk Angermann: »Diesel-Hybrid Eco Train mit Nachladung aus der Wechselspannungs-Oberleitung«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 1/2017, S. 30

[63] Martin Kache: »Zweikraftfahrzeuge – ein Fahrzeugkonzept mit Zukunft«. EI – Der Eisenbahn-Ingenieur 09/2015, S. 16

[64] www.stadlerrail.com/media/pdf/warr0517d_print.pdf

[65] www.ecorailinnovation.de/projects/view/178

[66] www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10122/333_read-5261#/gallery/7620

[67] Ralf Roman Rossberg: »Elektrische Fremdversorgung von Diesellokomotiven«. »eb« Elektrische Bahnen – Elektrotechnik im Verkehrswesen 10/2016, S. 538

[68] www.br-101.de

[69] Stu Robarts: »Silver machine rolls down the track to new efficiency record«, https://newatlas.com/team-eximus-1-2016-delsbo-electric/43603

[70] Gas-und-Dampf-Technik – eine Gasturbine, deren Abgaswärme zur Erzeugung von Dampf und damit zum Antrieb einer weiteren Turbine dient. Diese können auch auf einer gemeinsamen Welle angeordnet sein. Der Kraftstoff wird hierdurch so zu sagen doppelt ausgenutzt

[71] »Nur die Eisenbahn kann EU-Klimaziele erreichen«. Privatbahn-Magazin 4/2011, S. 74

[72] International Railway Journal (IRJ), März 2012, www.railjournal.com

[73] https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2018/058-ferlemann-umweltfreundlicher-und-emissionsarmer-schienenverkehr.html

[74] www.bahn.de/p/view/service/umwelt/unterwegs_mit_oekostrom.shtml