VDE-Studie



Energieoptimaler Bahnverkehr

auf dem Weg zum 1-Liter-Zug

Potenziale und Prioritäten auf
der Basis von Zahlen und Fakten

ETG

VDE

Autoren

ETG Fachbereich A2 „Bahnen mit elektrischen Antrieben“

Dipl.-Ing. Nils Dube, Deutsche Bahn AG
Dipl.-Ing. Werner Fraas, Siemens AG
Dipl.-Ing. Wolfgang Glaunsinger, VDE|ETG
Dr.-Ing. Christoph Schätzer, Bombardier Transportation GmbH
Dipl.-Ing. Arno Seifert, Deutsche Bahn AG
Dr.-Ing. Carsten Söffker, ALSTOM Transport Deutschland GmbH (Leitung)
Dipl.-Ing. Frank Steinhorst, Hamburger HOCHBAHN AG
Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan, TU Dresden
Dr.-Ing. Jürgen van der Weem, Vossloh Kiepe GmbH
Dipl.-Ing. Ulrich von Stockhausen, VAG Verkehrs-Aktiengesellschaft
Dr.-Ing. Kristian Weiland, DB Energie GmbH

Dieser Bericht ist entstanden durch die Zuarbeit vieler einzelner Personen. Dank gebührt allen Mitgliedern des Fachbereichs A2 der ETG im VDE, die diesen Bericht in wesentlichen Teilen erstellt haben und auf diese Weise ihren persönlichen Beitrag zum guten Gelingen beigetragen haben. Besonderer Dank gebührt dem Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik, Professur für Elektrische Bahnen der Technischen Universität Dresden, seinem Leiter Prof. Arnd Stephan sowie studentischen Mitarbeitern, die diese Arbeit mit hohem Einsatz wissenschaftlich begleitet haben [5]; [4]; [2].

Impressum

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG)
Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main
Telefon 069 6308-346 · E-Mail etg@vde.com · http://www.vde.com/etg

Titelbild: Deutsche Bahn AG
Gestaltung: Michael Kellermann · Graphik-Design · Schwielowsee-Caputh

April 2013

Energieoptimaler Bahnverkehr

auf dem Weg zum 1-Liter-Zug

Potenziale und Prioritäten auf der Basis von Zahlen und Fakten

Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)

Vorbemerkung

ETG-Studien geben – entsprechend der ETG-Positionierung als neutrale, energietechnisch fundierte Institution – gemeinsame Erkenntnisse der Mitglieder der Task Force / des Fachbereichs wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wieder.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **5**

Abbildungsverzeichnis **7**

Tabellenverzeichnis **7**

Zum Titelbild **8**

Vorwort **11**

1 Einleitung **15**
1.1 Woher kommt die Bahn und wo ist sie heute? 15
1.2 Wohin fährt die Bahn? 16

2 Varianten der Elektromobilität **19**
2.1 „Zeitalter der Elektromobilität“: Mode-Erscheinung oder unausweichliche Zukunft? 19
2.2 Entwicklung des Transportenergiebedarfs 19
2.3 Vergleich Automobilität und Schienenbahnen 23
2.4 Vollbahn 26
2.5 Stadtverkehr 29
2.6 Verkehrskonzepte für die Zukunft 29

3 Ermittlung von relevanten Einflussgrößen **31**
3.1 Energieflüsse im elektrischen Bahnsystem 31
3.2 Fernverkehr 33
3.3 Güterverkehr 34
3.4 Regionalverkehr 35
3.5 U-Bahn 36
3.6 Straßenbahn 37
3.7 Ermittlung von relevanten Einflussgrößen 38

4 Simulationsergebnisse **41**
4.1 Methodik 41
4.2 Verbesserung der Fahrzeugtechnik 43
4.2.1 Verlustleistung im Antriebssystem 43
4.2.2 Rückspeisefähige Triebfahrzeuge 46
4.2.3 Leistungsbedarf für Hilfsbetriebe 47
4.2.4 Aerodynamischer Widerstand 49
4.2.5 Leermasse des Zuges 49
4.3 Betriebliche Maßnahmen 50
4.3.1 Fahrzeitverlängerung, Nutzung des Zeitrückhalts 50
4.3.2 Verzicht auf Haltestellen 51
4.3.3 Reduktion von Störstellen 52

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.4 Optimierung der Infrastruktur 52
4.4.1 Energieerzeugung 53
4.4.2 Energieverteilung 53
4.4.3 Tunnelbauart 56
4.5 Einflussgrößen geringerer Bedeutung 57
4.5.1 Energiespeicher 57
4.5.2 Neigungswiderstand 57
4.5.3 Bogenwiderstand 58
4.5.4 Rollwiderstand 58
4.5.5 Rotierende Massen 58
4.5.6 Haltezeiten 58

5 Bewertung 59
5.1 Verfahren 59
5.2 Erläuterungen zu den Bewertungskriterien 61
5.2.1 Realisierungszeitraum 61
5.2.2 Investitionsbedarf 61
5.2.3 Energieeinsparpotenzial 62
5.2.4 Technologisches Potenzial 62
5.3 Nutzwertanalyse 63
5.3.1 Fernverkehr 63
5.3.2 Güterverkehr 65
5.3.3 Regionalverkehr 67
5.3.4 S-Bahn / U-Bahn 70
5.3.5 Straßenbahn 72

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 75

Literaturverzeichnis 83

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des Verkehrsanteils am Weltenergiebedarf [6] 20
Abbildung 2: Potenziale möglicher Primärenergieträger [6] 20
Abbildung 3: Energiedichten gespeicherter chemischer Brennstoffe [6] 21
Abbildung 4: Energiedichten elektrischer Speichermedien [6] 22
Abbildung 5: Primärenergiebedarf von elektrischen Bahnen für ein typisches Fahrprofil 25
Abbildung 6: Umweltbilanz einer beispielhaften Güterverkehrsleistung 27
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Energiebedarfe im elektrischen Bahnsystem 31
Abbildung 8: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Fernverkehrs [5] 33
Abbildung 9: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Güterverkehrs [5] 34
Abbildung 10: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Regionalverkehrs [5] 35
Abbildung 11: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des U-Bahn-Verkehrs [5] 36
Abbildung 12: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Straßenbahnverkehrs [5] 38
Abbildung 13: Klassifizierung der Einflussgrößen auf den Gesamtenergiebedarf 39
Abbildung 14: Einfluss der Verringerung der Wagenleermassse auf den spezifischen Nettoenergiebedarf im Güterverkehrssystem [5] 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteine des elektrischen Bahnbetriebs in Deutschland 8
Tabelle 2: Spezifischer Fahrwiderstand von Bahn und Automobil im Vergleich 24
Tabelle 3: Übersicht der zu simulierenden Einflussgrößen je Verkehrsart 40
Tabelle 4: Angenommene Oberleitungsbauarten für die verschiedenen Verkehrsarten 55
Tabelle 5: Bewertungssystem der Nutzwertanalyse 60
Tabelle 6: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Fernverkehr 63
Tabelle 7: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Güterverkehr 65
Tabelle 8: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Regionalverkehr 67
Tabelle 9: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im U-Bahn-System 70
Tabelle 10: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Straßenbahnsystem 72

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Zum Titelbild

Das Titelbild der Studie zeigt einen InterCityExpress (ICE) der 1.Generation auf einer Schnellfahrstrecke der Deutschen Bahn AG. Die Oberleitungsmasten der elektrischen Energieversorgung, ohne die ein energieeffizienter Hochgeschwindigkeitsverkehr nicht denkbar wäre, bilden zugleich den visuellen Rahmen für Meilensteine ihrer Entwicklung (Tabelle 1) seit dem Ende des 19. Jahrhunderts, und auch für die Zukunft gibt es ehrgeizige Ziele.

So hat die Deutsche Bahn in ihrer „Strategie 2020“ als Hauptziel die Ausweitung des erneuerbaren Energieanteils verankert. Bis 2020 soll der Anteil erneuerbarer Energie im Bahnstrom, d.h. für die elektrische Traktion in Deutschland, auf mindestens 35% erhöht werden[1]. Heute liegt dieser bei ca. 22%.

Tabelle 1: Meilensteine des elektrischen Bahnbetriebs in Deutschland

1879	Erster elektrisch angetriebener Zug auf der Berliner Gewerbeausstellung
1890er	Flächendeckender Aufbau von elektrisch betriebenen Straßenbahnnetzen
um 1900	Erster elektrischer Zugbetrieb Murnau-Oberammergau, mit 100% Wasserkraft; Überschreitung von 200 km/h durch einen Drehstrom-Versuchstriebwagen
1930er	Aufbau eines Bahnstromverbundnetzes in Mittel- und Süddeutschland
1960er	Einzug der elektrischen Traktion in den schnellen Fernverkehr, einhergehend mit einer Ablösung des Dampfbetriebes
1980er	Beginn der Serienfertigung von Drehstromantriebstechnik mit Rückspeisung
1990er	Aufnahme des ICE-Verkehrs auf Hochgeschwindigkeitsstrecken
ab 2000	Erste moderne Energiesparprogramme für das Bahnsystem
2011	Beginn der Ablösung von fossilen und Kernkraftwerken durch Windparks und Wasserkraft
2020	Ziel: 35% regenerative Energie in der Bahnstromversorgung

[1] Der Anteil von 35% bezieht sich dabei auf den sogenannten "Basis- oder Residualmix". Das heißt, soweit einzelne Geschäftskunden des Fernverkehrs oder Verlader im Güterverkehr eine darüber hinausgehende Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie für ihre Traktion wünschen, können sie diese über spezielle Produkte ("Umwelt Plus" und "Eco Plus") kaufen. Für diese Produkte wird zusätzlich entsprechende Energie beschafft. Diese Produkte werden also zusätzlich, zu den 35% im "Basis- oder Residualmix" in die deutsche Bahnstromversorgung einfließen.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Vorwort

Der Fachbereich A2 der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) im VDE beschäftigt sich mit dem Thema „Bahnen mit elektrischen Antrieben“. In diesem Fachbereich arbeiten Mitarbeiter verschiedener Hersteller von Bahnfahrzeugen und den stationären Anlagen, den Betreibern von Bahnverkehr und Hochschulen zusammen. Es eint sie das Interesse, die Technologie rund um den elektrischen Bahnverkehr voranzubringen und zu verbreiten. Durch den breiten Querschnitt an Mitarbeitern im Fachbereich ist fundiertes Wissen und langjährige Erfahrung über die verschiedensten Themen der unterschiedlichen Bahnsysteme vorhanden:

- Vollbahnfahrzeuge (Fahrzeuge der „klassischen“ Eisenbahn)
- Nahverkehrsfahrzeuge (Straßenbahnen und Trolleybusse)
- Leit- und Steuerungstechnik der Fahrzeuge
- Bahnstromversorgung (Wechselstrom und Gleichstrom)
- Leit- und Sicherungstechnik für die Verkehrswege
- Neue Technologien, wie z.B. Magnetschwebetechnik, Brennstoffzellen, Energiespeicher

Schon immer war das Thema Energie auch ein wichtiges Thema für die Bahningenieure, denn die Kosten für Energie sind ein wesentlicher Bestandteil der Gesamtkosten (der sogenannten Life Cycle Cost, LCC) des Bahnsystems. In der jüngeren Vergangenheit hat die Reduzierung des Energieverbrauchs durch den fast immer damit verbundenen Ausstoß an klimarelevantem CO_2 an Wichtigkeit zugenommen und wird auch durch die Politik vorangetrieben. Zuletzt erhielt die Diskussion um die Reduktion des Energieverbrauchs Anschub durch die katastrophalen Ereignisse in Japan.

Der Fachbereich A2 der Energietechnischen Gesellschaft im VDE hat sich vor einiger Zeit die Aufgabe gesetzt, die Reduktion des Energieverbrauchs von elektrischen Bahnen zu untersuchen und Verbesserungspotenziale zu erarbeiten. Der vorliegende Bericht beschreibt die Resultate, Möglichkeiten der Reduktion des Energiebedarfs werden aufgezeigt und er gibt dadurch Handlungsempfehlungen an die verschiedenen Entscheider im Bahnsystem. Indirekt gibt es dadurch auch Empfehlungen an die Politik, bestimmte Trends zu unterstützen. Durch die breit gefächerte Zusammensetzung des Fachbereiches ist seine Unabhängigkeit gewährleistet, so dass diese Empfehlungen frei von partikulären wirtschaftlichen oder sonstigen Interessen sind. Der Eisenbahnverkehr auf nicht elektrifizierten Strecken wird hier nicht betrachtet, da sein Anteil an der Transportleistung in Europa untergeordnet ist.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Im Einzelnen untergliedert sich die Studie in die Beantwortung folgender Fragestellungen:

- Woher kommt die Bahn und wohin fährt sie?
  einleitende Darstellung der Entwicklung elektrischer Bahnen, sowie ihrer gesellschaftlichen Bedeutung als Verkehrsmittel
- Welches sind die systembedingten Vor- und Nachteile des elektrischen Bahnsystems?
  Randbedingungen des Bahnverkehrs in Gegenwart und Zukunft, Vergleich mit anderen Verkehrsträgern, Stichwort „Elektromobilität“
- Wie kann die komplexe Thematik „Energieoptimaler Eisenbahnverkehr“ objektiv und fundiert bearbeitet werden?
  Ermittlung von relevanten Einflussgrößen[2], Vorgehensweise zur Ermittlung von Einsparpotenzialen[3]
- Wie hoch ist das Energiesparpotenzial einzelner Maßnahmen unter festen, realistischen Randbedingungen?
  Modellbildung (Unterscheidung der Verkehrsarten), Aufarbeitung und Darstellung der Simulationsergebnisse
- Welcher technische und/oder wirtschaftliche Aufwand ist für die Umsetzung einzelner Maßnahmen erforderlich?
  Benennung, Bewertung und gesamthafte Priorisierung von konkreten Lösungsansätzen zur Energieeinsparung.

Die vorliegende Studie soll Aussagen zur energetischen Optimierung des Bahnverkehrs liefern, Kausalitäten benennen und richtige Verhältnisse zwischen den verschiedenen Einflussgrößen herstellen. Aufgrund der Vielfalt von technischen Lösungen und betrieblichen Szenarien im Eisenbahnwesen hat sie hingegen nicht den Anspruch auf wissenschaftliche Exaktheit in allen Details.

Sie ermöglicht eine qualitative Abschätzung der Konsequenzen eigenen Handelns, aber durchaus basiert auf physikalischen Zusammenhängen und realen Daten, und damit auch eine gezielte Prioritätensetzung im Zusammenhang mit dem komplexen Thema Energiebedarf.

---

[2] Hierunter werden diejenigen physikalischen oder technisch-betrieblichen Größen verstanden, die Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf des Bahnsystems haben.

[3] Das Einsparpotenzial wird im einfachsten Fall prozentual gegenüber einem Referenzwert angegeben, wenn man eine bestimmte Einflussgröße diskret variiert. Kann diese Größe jedoch auch kontinuierlich variiert werden, so gibt der „Einsparfaktor“ an, inwieweit damit der Gesamtenergiebedarf beeinflusst wird – im besten Fall sogar überproportional; dagegen kann der Einfluss in ungünstigen Fällen vernachlässigbar sein.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Im abschließenden Kapitel werden die drei wesentlichen Kategorien von Handlungsempfehlungen herausgearbeitet:

- Energieverluste reduzieren
  (jenseits der heutigen Grenzen der eingesetzten Technologien)
- Energieverschwendung vermeiden
  (durch Aufhebung bestehender Unzulänglichkeiten)
- Energieoptimierung vorantreiben
  (mit Blick auf das gesamte Bahnsystem als Einheit von Infrastruktur, Fahrzeugen und Betrieb)

Allen Lesern wünschen wir eine Menge Denkanstöße beim Durcharbeiten dieses Berichtes. Weitere Techniken und Herangehensweisen zur Reduktion des Energiebedarfs der Bahnen wird es sicherlich geben, auch jenseits der im vorliegenden Bericht geschilderten. Finden und nutzen Sie auch diese.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

1 Einleitung

1.1 Woher kommt die Bahn und wo ist sie heute?

Von Beginn an entfaltete die Eisenbahn als Verkehrssystem eine starke Raumwirkung. Entlang der schnell wachsenden Eisenbahnnetze des 19. Jahrhunderts entwickelten sich die bis heute wichtigsten Industriestandorte und Siedlungsräume. Eine ähnliche Wirkung ging auch von den Bahnsystemen innerhalb der Städte aus. Sie ermöglichten eine zuvor nicht gekannte urbane Mobilität und führten zu einer großflächigen Ausbreitung der Siedlungsstrukturen. Auf dem ersten Höhepunkt ihrer Entwicklung in den 1920er bis 1930er Jahren war die Bahn das leistungsfähigste und damit attraktivste Verkehrsmittel überhaupt.

Mit dem Siegeszug des Automobils im Individual- und Güterverkehr nach 1960 änderte sich ihre Rolle: die Aufgabe unwirtschaftlicher Strecken und Verkehre sowie viele vergleichsweise ineffiziente Produktionstechnologien führten zu einem immer geringer werdenden Anteil der Bahn am stetig wachsenden Gesamtverkehrsmarkt, und insbesondere im Güterverkehr auch zu einem Rückgang der absoluten Verkehrsleistung. Verbunden damit waren auch ein starker Imageverlust der Bahnen sowie eine durch ihre wirtschaftlichen Defizite getriebene zunehmende Belastung der öffentlichen Haushalte.

Diese Entwicklung änderte sich in Deutschland grundlegend erst ab Mitte der 1990er Jahre durch die damals eingeleiteten Reformen zur Liberalisierung des Eisenbahnverkehrs mit entsprechenden starken Impulsen zu umfangreichen Fahrzeugneubeschaffungen mit verbesserten Technologien und höherem Komfort für Fahrgäste, verstärkte Investition in Neu- und Ausbaustrecken zur Entmischung des Bahnverkehrs sowie zunehmende Automatisierung. Verstärkt wurden diese Effekte durch die vor allem in Spitzenzeiten zunehmende Überlastung der Straßen- und Luftverkehrskapazitäten. Insgesamt konnten in den zurückliegenden Jahren dadurch deutlich mehr Fahrgäste gewonnen werden. Im Güterverkehr hat der in standardisierten Containern abgewickelte Warentransport sowie die massiv steigende Internationalisierung des Handels zur stetigen Leistungssteigerung mit immer mehr und weiteren Transportwegen beigetragen. Nicht zuletzt spielte das geänderte Umweltbewusstsein eine große Rolle, mehr Transportkapazität von der Straße auf die als umweltfreundlicher geltende Schiene zu verlagern.

Heute sind es vor allem die nachfolgenden drei Segmente, in denen der Bahnverkehr hochattraktiv und insgesamt auch konkurrenzfähig ist:

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

- Hochleistungs-Güterbahnen als Bestandteil einer intermodalen Logistikkette.
- Schnelle, attraktive Personenfernverkehrsbahnen, meist auf Hochgeschwindigkeitstrassen.
- Leistungsfähige, komfortable innerstädtische Nahverkehrsbahnen.

Nicht nur in Deutschland, sondern vor allem international hat eine Renaissance des Bahnverkehrs eingesetzt. Weltweit entstehen derzeit in großen Agglomerationen zahlreiche neue Nahverkehrsbahnen, denn nur mit ihnen kann das Verkehrsaufkommen überhaupt bewältigt werden. Die Anzahl der Neu- und Ausbauprojekte weltweit ist deutlich dreistellig; dabei wird in vielen Städten wieder, in einigen sogar erstmalig ein bahnbasiertes Nahverkehrssystem aufgebaut. In mehreren Schwellenländern mit hohem Wirtschaftswachstum werden ehrgeizige Eisenbahn-Neubauprojekte sowohl im Güter- als auch im Hochgeschwindigkeits-Personenverkehr realisiert.

1.2 Wohin fährt die Bahn?

Der Güteverkehr ist – bedingt durch die zunehmende Internationalisierung – gekennzeichnet durch das weitere Wachstum der Rohstoff- und Warenströme. Logistisch und wirtschaftlich vorteilhaft ist die Verlagerung von Gütern auf die Bahn bei langen Transportwegen und bei Massengütern. Die Verlagerung von Gütern auf die Bahn wird begünstigt durch die steigenden Energiekosten, die beim Straßen- und Luftverkehr einen größeren Einfluß auf die spezifischen Transportkosten haben als beim Bahnverkehr. Zur qualitativen Verbesserung des Schienengüterverkehrs, vor allem in den klassischen Eisenbahnländern, ist insbesondere die Transportdauer zu reduzieren. Dazu muss die Leistungsfähigkeit bzw. Durchlässigkeit der Knoten des Eisenbahnnetzes deutlich erhöht werden. Hemmend auf einen internationalen bahngebundenen Warenfluss wirkt die unzureichende betriebliche und technische Interoperabilität der historisch gewachsenen länderspezifischen Bahnnetze. Dies muss erheblich verbessert werden.

Trotz immer besser werdender Kommunikationsmittel (e-mail, Telefonkonferenz, Video-Konferenz, usw.) besteht ein immer weiter steigender Bedarf an Personenreisen, sei es aus geschäftlicher Notwendigkeit oder aus individuellem Interesse, andere Gegenden zu besuchen. Die Mobilität der Menschen wird immer größer. Als Randbedingungen sind hierbei wiederum die Wachstumsgrenzen im Straßen- und Luftverkehr einschließlich der Kraftstoffverteuerung zu nennen. So kann die Bahn einen großen Teil des steigenden Mobilitätsbedarfs gut decken. Wie viele internationale Beispiele zeigen, sind Hochgeschwindigkeitsbahnen im Entfernungsbereich ab etwa 200 km bis weit über 500 km hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Komfort nahezu konkurrenzlos.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Bedingt durch die europäische Bahnreform gibt es, zunehmend auch international, Wettbewerb auf der Schiene. Es hat sich bestätigt, dass die Konkurrenz unter den Bahnbetreibern tatsächlich das Geschäft stark beleben kann. Einerseits bringen die bestehenden Unternehmen mehr Verkehr auf die Schiene, andererseits sind viele neue Transportunternehmen entstanden. Deren Bestand wird – wie es auch beim Luftverkehr zu sehen war und ist – vor allem von ihrer Entwicklungsfähigkeit abhängen (Deutsche Bahn, 2009). Erfolgreiche Bahnunternehmen gehen sehr ähnliche Wege: international werden, Allianzen bilden, Geschäftsfelder und -modelle erweitern, Mobilitäts- bzw. Logistikketten anbieten, Tarife flexibilisieren, Zugang zum System und Ticketing erleichtern, Komfort und Information verbessern. All dies wird die Attraktivität für Fahrgäste und Güterverkehrskunden steigern, bei gleichzeitig sinkenden Preisen, wodurch der Schienenverkehr weiter zunehmen wird.

Es soll an dieser Stelle jedoch erwähnt werden, dass der Personenfernverkehr nur erfolgreich sein wird, wenn auch ein guter Personennah- und -regionalverkehr existiert. Nur wenn die Reise sozusagen „von Tür zu Tür“ schnell, komfortabel, preisgünstig, zuverlässig und sicher erfolgt, kann auch der Fernverkehr Erfolg haben.

Der Ausbau des schienengebundenen Stadt- und Regionalverkehrs wird weltweit durch die Entstehung von großen Siedlungskonzentrationen (bis hin zu Mega-Cities mit mehr als 10 Mio. Einwohnern) und der damit verbundenen notwendigen Mobilität innerhalb dieser Agglomerationen, die nur durch schienengebundene Verkehre gewährleistet werden kann, begünstigt. Die begrenzt vorhandenen Verkehrsflächen, wobei hier der ruhende Verkehr nicht außer Acht gelassen werden darf, lassen in den Innenstädten fast nur noch den öffentlichen Personennahverkehr zu.

Zumindest in der westlichen Industriegesellschaft entwickelt sich das Verhältnis zum Automobil zu einem immer weniger emotionalen. Da zudem die Erkenntnis wächst, dass aufgrund der begrenzten Kapazität der städtischen Straßen das Auto nur noch sehr wenige Vorteile bietet, wird der öffentliche Personennahverkehr in seiner Bedeutung und seinem Verkehrsaufkommen zunehmen.

Die vielfach gelobte, und meist auf den motorisierten Individualverkehr beschränkte, E-Mobility schafft wenig Abhilfe. Für den Personenfernverkehr ist aufgrund der sehr begrenzten Kapazität der elektrischen Energiespeicher keine technisch machbare Lösung in Sicht. Für den innerstädtischen Verkehr scheinen die derzeit bekannten Technologien einen Ansatz zu bieten. Allerdings werden hier lediglich die Schadstoffemissionen aus dem innerstädtischen Bereich herausgehalten; die Verkehrsbelastung bleibt wie bei den bisherigen Konzepten bestehen.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

2 Varianten der Elektromobilität

2.1 „Zeitalter der Elektromobilität“: Mode-Erscheinung oder unausweichliche Zukunft?

Der Bahnverkehr blickt auf eine 130-jährige Erfahrung der real funktionierenden Elektromobilität auf der Schiene zurück. Lange Zeit war die Bahn der wichtigste Verkehrsträger und gleichzeitig das wichtigste Infrastrukturmittel. In diesem Kapitel werden die Randbedingungen des Bahnverkehrs, insbesondere im Vergleich zum Automobil, kurz beleuchtet. Besonders die energetischen Aspekte werden dabei berücksichtigt.

Nicht nur in Deutschland, sondern weltweit hat in den letzten Jahren das Stichwort „Elektromobilität“ bedeutende Forschungsanstrengungen ausgelöst und zu hohen öffentlichen Forschungsförderungen geführt. Bemerkenswert dabei ist insbesondere, dass sich erstens der Begriff in der öffentlichen Wahrnehmung fast exklusiv auf den Antriebsstrang des Automobils bezieht und zweitens häufig bereits durch gelegentliche Prototypen ein technologischer Fortschritt antizipiert wird, der eine verkehrstechnische Fortführung heutiger Mobilitätskonzepte nahe zu legen scheint, nur eben mit neuen Energiesystemen.

Schon wegen des hohen, wenn auch kontinuierlich schwindenden, persönlichen Stellenwerts, den das Automobil in der Bevölkerung (und am Modal Split) einnimmt, aber auch durch das konservative Image des erprobten Verkehrsträgers Bahn spielt letztere in dieser Debatte eine vergleichsweise wenig aufregende Rolle. Im Gegenteil wird gelegentlich sogar vermutet, dass die Bahn ihren unbestreitbaren „Umweltbonus“ im Zeitalter der Elektromobilität einbüßen könnte. Zur objektiveren Einschätzung der Situation lohnt es sich, die systemtechnischen Grundlagen der jeweiligen Verkehrsträger und den Stand der jeweiligen Entwicklungen in Erinnerung zu rufen und mögliche Anregungen daraus abzuleiten.

2.2 Entwicklung des Transportenergiebedarfs

Die Diskussion um die Elektromobilität (im Individualverkehr) wird durch zwei wesentliche Langzeitentwicklungen geprägt: die Klimaveränderung (in erster Linie durch den Eintrag des Verbrennungsproduktes Kohlendioxid in die Atmosphäre) und die vermutete Verteuerung der endlichen fossilen Energieträger .

Der globale Gesamtenergiebedarf von heute, etwa 400 EJ ($400 \cdot 10^{18}$J) pro Jahr wird in den nächsten zwei Dekaden auf etwa 600 EJ steigen, wobei grob vereinfacht geschätzt werden kann, dass in den industrialisierten Ländern etwa 1/3 des Energiebedarfs zur Mobilitätserhaltung verwendet wird. Bei einem Modal Split von typischerweise 85% Straßenverkehr wird der verkehrliche Energiebedarf entsprechend auch zu etwa 85% aus Erdölprodukten gespeist (siehe Abbildung 1).

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

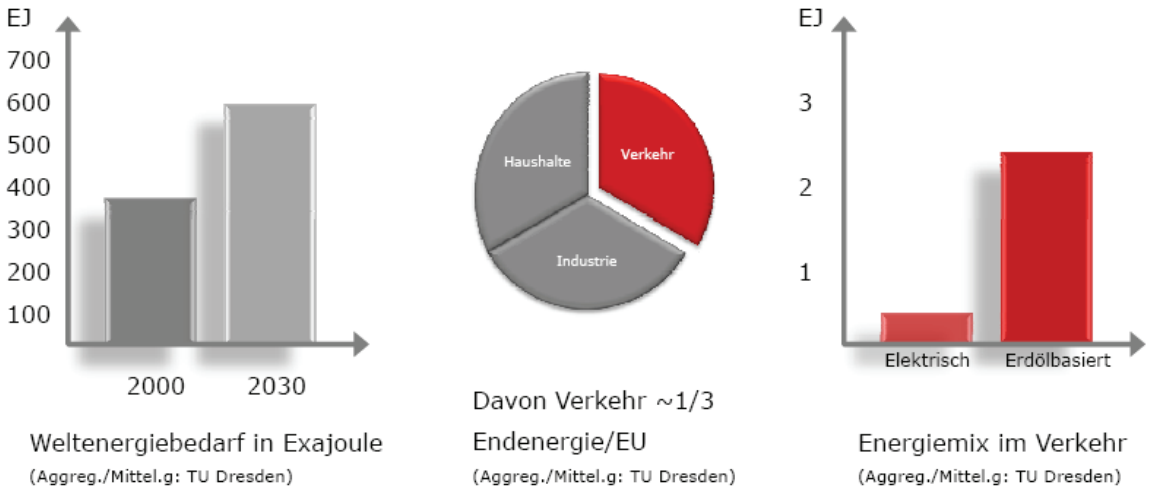


Abbildung 1: Entwicklung des Verkehrsanteils am Weltenergiebedarf [6]

Die Brisanz dieser Relation im Verkehrswesen liegt in den verschiedenen Öl-Reserven- und -Ressourcenschätzungen der Mineralölindustrie und Forschungseinrichtungen, die mehrheitlich einen Peak-Point in der möglichen Förderung entweder gerade aktuell oder in der näheren Zukunft sehen. Sollten sich die Einschätzungen bestätigen, wäre ab 2030 bis 2040 mit spürbaren Einschränkungen in der Mineralölversorgung des Mobilitätssektors zu rechnen. Die fast synchron verlaufenden Verbrauchs- bzw. Ressourcenkurven für Erdgase verschärfen dieses Bild eher. Mögliche Szenarien durch „neue“ Energieträger zeigen dabei (siehe Abbildung 2), dass diese nicht länger vom Verkehrsträger mitgeführt werden können. Es werden stationäre Anlagen zur Energiewandlung benötigt, die praktisch durchweg elektrische Energie liefern. „Neu“ bedeutet in diesem Kontext nicht, dass diese Energieressourcen nicht heute schon genutzt würden, sondern dass ihr massiver Ausbau einen Paradigmenwechsel in der Energieversorgung begleiten könnte.

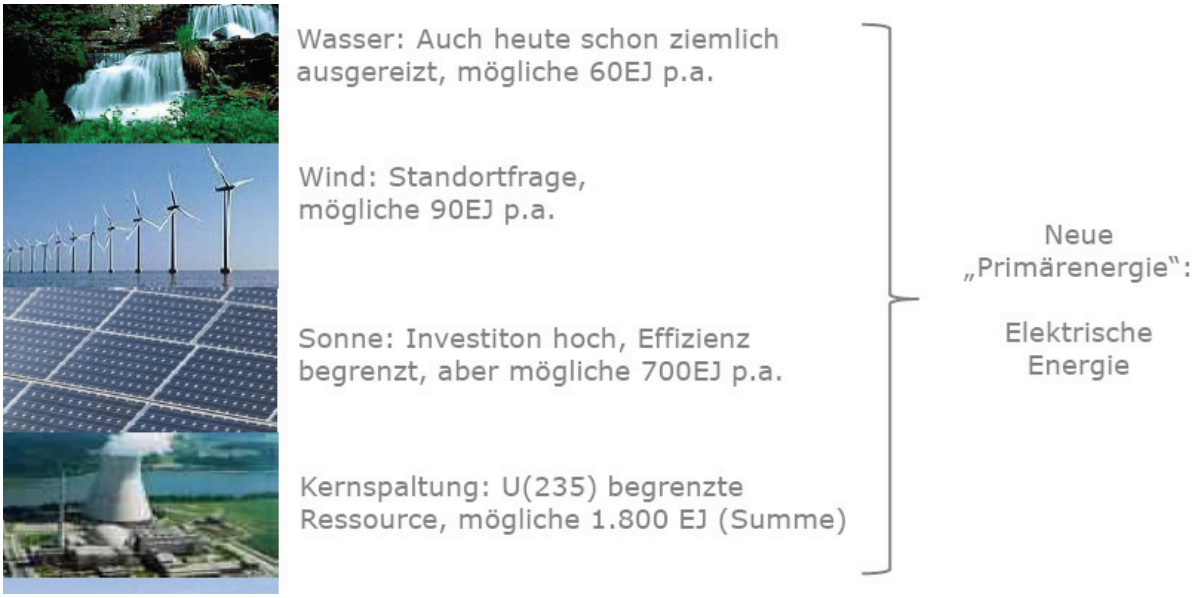


Abbildung 2: Potenziale möglicher Primärenergieträger [6]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Die obige Darstellung grober Schätzwerte für einen zukünftig möglichen globalen Energiemix deutet zudem einige weitere Charakteristiken an. So zeigt sich beispielsweise, dass mit der in Deutschland heute bereits extensiv betriebenen Nutzung der Wasserkraft die zukünftigen Potenziale begrenzt sind. Größter Einzelbeitrag kann die Solarenergie werden, die allerdings bedeutende Investitionskosten nach sich ziehen würde. Die konventionellen Kernspaltungsreaktoren basieren auf dem in der Erdkruste äußerst selten vorkommenden Isotopengemisch Uran, bei dem wiederum nur das mit 0,7% noch geringer vorhandene Isotop U(235) genutzt wird. Ohne den Wiedereinstieg in technologisch problematische Brütertechnologien stellt die Kernkraft somit nur einen relativ geringen möglichen Summenanteil zur Verfügung. Kohlenlager stellen zwar das mit Abstand größte Einzelpotenzial dar, es bedürfte aber neuer Vergasungs- oder Verflüssigungsverfahren und einer (deutlichen) Kehrtwende in der Klimadebatte zu ihrer (massiven) Renaissance.

Szenarien dieser Art in Verbindung mit der gewünschten Schadstoffbegrenzung legen tatsächlich nahe, die zunächst elektrisch gewandelte Energie auch in dieser Form in der Verkehrstechnik zu nutzen, da angesichts der Knappheit der Potenziale jede weitere Rück- oder Umwandlung (beispielsweise in chemische Energieträger wie Wasserstoff) aus Effizienzgründen vermieden werden soll.

Die eigentlichen Kernprobleme dieser Energieversorgungskonzepte sind jedoch auch seit längerem bekannt: Mit dem aus Erdlagern sprudelnden Mineralölen steht nicht nur eine kostengünstige Energiequelle bereit, sondern sie liefert diese Energie auch in einer robusten (chemisch trägen) und kaum zu schlagenden Energie-Speicherdichte von typischerweise 12 kWh/kg (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Energiedichten gespeicherter chemischer Brennstoffe [6]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

„Neue“ Energieressourcen wie Wind- oder Sonnenstrom bedürfen aus zwei Gründen neuer Speicherverfahren: Erstens wird die Energie nicht zeitsynchronisiert mit dem Verbrauch generiert und muss deshalb „zwischengespeichert“ werden, und zweitens müssen auch die „Elektro“-Straßenfahrzeuge ihre Energie bordautonom speichern. Dabei ergibt sich jedoch das bisher nur unzureichend gelöste Problem, elektrische Energie mit hoher Dichte zu speichern. Abbildung 4 skizziert den Stand der Technik (Vergleich zur Referenz in logarithmischer Darstellung).

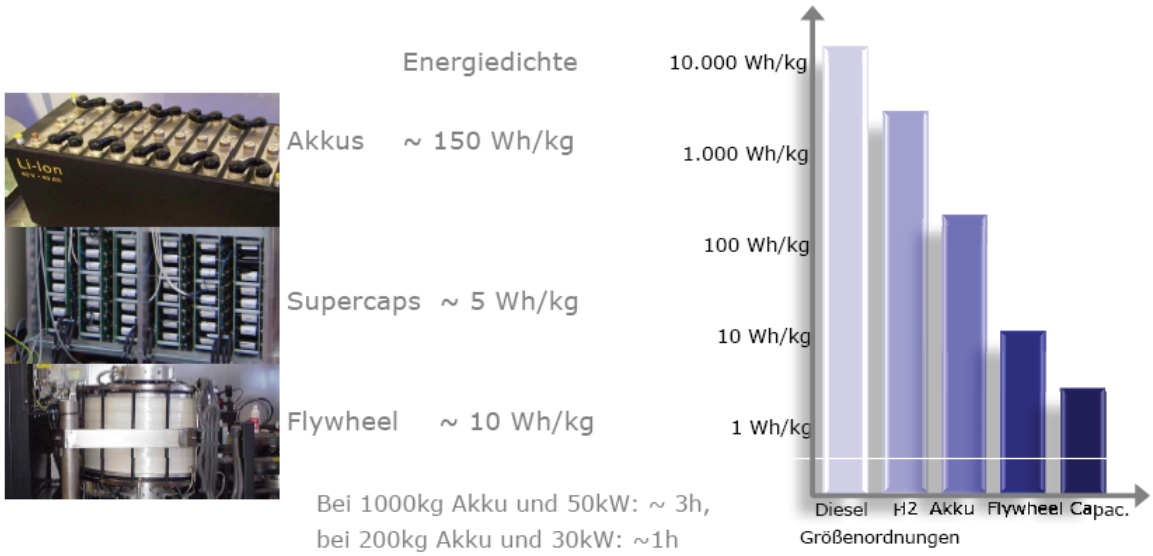


Abbildung 4: Energiedichten elektrischer Speichermedien [6]

Sollte kein grundlegend neues Verfahren für Elektrospeicher deutlich höherer Speicherdichte gefunden werden, liegt folgendes Szenario nahe:

- Angesichts der Verhältnisse bei der gravimetrischen, aber auch volumetrischen Speicherdichte ist es unwahrscheinlich, dass „Mobilität mittels Verbrennungsmaschinen“ kurzfristig durch reine „Elektromobilität“ abgelöst wird.
- Eine effiziente Beherrschung der Distributionslogistik und der Umwandlungsprozesse der chemischen Speicherkette (Wasserstoff-Drucktanks und „kalte“ Verbrennung über Brennstoffzellen oder heiße Verbrennung im Gasmotor) würde diese Form der Energiespeicherung noch stärken.
- Während Individualverkehr in Ballungsgebieten schon heute mit kleineren Elektrofahrzeugen relativ problemlos vorstellbar ist, ist dies für Fernreisen bei den heute üblichen Distanzen und Komfortansprüchen nur mit gravierenden technischen Neuerungen und einer adäquaten Energieverteilungslogistik zu realisieren. Schwerer Güterverkehr mit Straßenfahrzeugen von mehreren hundert Kilowatt Leistung ist im Überlandverkehr mit heutiger Speichertechnik bisher überhaupt nicht vorstellbar. Verkehrliche Neuordnungseffekte werden damit wahrscheinlich.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

2.3 Vergleich Automobilität und Schienenbahnen

Bei der bisherigen Betrachtung wurde die „Eisen“-Bahn praktisch noch nicht betrachtet, obwohl sie doch bereits heute zum Großteil „elektrisch“ fährt und die skizzierten Speicherprobleme nicht kennt, da die elektrische Energie über Oberleitungen oder dritte Schiene kontinuierlich zugeführt wird. Die Debatte, ob auch im Zeitalter der „Individual-Elektromobilität“ die Bahn ihre verkehrliche Bedeutung und insbesondere ihren „Umweltbonus“ aufrechterhalten kann, rührt von einer vermuteten zunehmenden Konvergenz der beiden Verkehrsträger in diesem Szenario her:

- Die Energieversorgung stammt aus derselben (elektrischen) Quelle.
- Sie liefert vergleichbare Schadstoffsummen.
- Beide Verkehrsträger haben eine vergleichbare Auslastung (häufig sind drei von vier Plätzen im Nahverkehr und zwei von vier im Fernverkehr leer).

Das gelegentliche „Umweltmarketing“ des Schienenverkehrs selbst stützt diese Vergleiche zusätzlich durch die Vorstellung, die Bahn könne umso „grüner“ fahren, umso ökologisch verträglicher der Strom produziert werde, den man ihr liefert. Dennoch ist die zentrale Energieerzeugung sehr effizient, zusätzlich ist die Nutzung regenerativer Quellen vergleichsweise einfach möglich.

In der Folge soll daran erinnert werden, dass andere Betrachtungselemente zukünftig möglicherweise die größere Differenzierung zwischen den Verkehrsträgern gestatten. Vergleicht man nämlich die Fahrt schwerer Stahlradfahrzeuge auf Stahlschienen mit gummibereiften Straßenfahrzeugen, so lässt die prinzipielle systemtechnische Betrachtung zunächst folgenden Unterschied erkennen: Zwar unterliegen beide (Rad-) Fahrzeuge sowohl der Rollreibung als auch dem geschwindigkeitsabhängigen Windwiderstand. Allerdings liegt die Summe beider „Verlustgrößen“ beim Stahlrad-Stahlschienesystem um ein bis zwei Größenordnungen unter denen des Gummireifenfahrzeugs. Neben der „Härte“ des Stahlrads liegt dies auch an der günstigeren Windwiderstandsbilanz des langen Zuges (bei aerodynamisch gestalteten übergängen), während beim kurzen Automobil praktisch jede „Viererplatzgruppe“ ihren eigenen Windwiderstand erfährt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Für die (massen-)spezifische Fahrwiderstandskraft F/m gilt:

$$\frac{F}{m} = A + \frac{B}{m} \cdot v + c_w \cdot \rho \cdot \frac{A_{Stirn}}{m} \cdot v^2$$

Der spez. Rollwiderstand A liegt beim Auto um eine Größenordnung höher als beim Zug, und der Term A_{Stirn}/m sogar um zwei Größenordnungen. Der spez. Impulswiderstand B/m ist in beiden Fällen gering und der Luftwiderstandsbeiwert c_w (der beim Zug auch die Mittelwagen berücksichtigt) liegt jeweils in der gleichen Größenordnung.

Damit ergeben sich im spez. Fahrwiderstand deutliche Unterschiede zwischen einem Mittelklasse-PKW und einem Hochgeschwindigkeits-Triebzug (Tabelle 2).

Tabelle 2: Spezifischer Fahrwiderstand von Bahn und Automobil im Vergleich

	A	*c_w*	*A_{Stirn}/m*	*F/m bei 50 km/h*	*F/m bei 100 km/h*	*F/m bei 150 km/h*	*F/m bei 250 km/h*
PKW (1,5t)	*80 N/t*	*0,27*	*1,8 m²/t*	*0,215 N/kg*	*0,62 N/kg*	*1,29 N/kg*	*3,45 N/kg*
Bahn (ICE3)	*7,5 N/t*	*0,59*	*0,02 m²/t*	*0,013 N/kg*	*0,025 N/kg*	*0,044 N/kg*	*0,099 N/kg*

Diese Verhältnisse sind selbstverständlich bereits seit langem bekannt, es stellt sich aber dennoch die Frage, warum die Bahn dann nicht die Bilanz eines „0,3-Liter-Fahrzeugäquivalents“ liefert.

Die Antwort liegt einerseits in einer weiteren prinzipiellen Einflussgröße, nämlich dem relativ hohen Gewicht des rollenden Materials, was bei der Beschleunigung zur Aufnahme vergleichsweise hoher Energien führt, welche jedoch in der Beharrungsfahrt („Rollen“) wegen des geringen Rollwiderstands vergleichsweise gut erhalten bleibt; die Bahn verhält sich annähernd wie ein großer kinetischer Energiespeicher.

Bei der Verzögerungsfahrt (Bremsen) wirkt der Antriebsstrang generatorisch, d.h. die kinetische Energie wird zunächst wieder –mit Verlusten behaftet- in elektrische Energie gewandelt. Der resultierende elektrische Strom wird auf verschiedene Weisen abgeführt, größtenteils durch Rückspeisung in die Oberleitungsanlagen bzw. Stromschienen und die Fahrzeugbordnetze, teilweise durch Bremswiderstände (Umwandlung der kinetischen Energie in an die Umgebung abgeführte Wärme). Andere „Verlustbeiträge“ in der Gesamtbilanz kommen aus den Leitungsverlusten vom Kraftwerk bis zum Fahrzeug (bis zu 15%), die bei der „Netzrückspeisung“ anteilig ebenfalls auftreten und somit systemweit die Wiedernutzungseffizienzen verringern. Während bei Wechselstrombahnen heute nahezu die gesamte

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

rückgespeiste Energie anderen Verbrauchern zugeführt werden kann, sind die Rückspeisegrade bei Gleichstrombahnen mit niedrigen Fahrleitungsspannungen strukturbedingt geringer. Der Bremsenergieanteil liegt bei typischen Nahverkehrsbahnen betriebsabhängig zwischen minimal 5 und maximal 30%. Vermaschte und leistungsfähige Energieverteilungssysteme gewährleisten einen Energieaustausch zwischen den jeweiligen momentanen Erzeugern, z.B. ein bremsendes Fahrzeug, und Verbrauchern, sowohl im überlagerten Energieverteilnetz als auch im Streckennetz des jeweiligen Verkehrsbetriebes.

Weitere Effekte wie der stetig ansteigende Anteil an Nebenbetrieben wie etwa Lüftung oder Klimaanlage sind ebenfalls nur schwer wegzudenken. Wege zur Verbesserung der Gesamtbilanz werden deshalb bisher durch Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge, optimierte Netzschaltung oder beispielsweise energieoptimierter Fahrweise gesucht. Den größten Einfluss auf die Energieeffizienz elektrischer Bahnen hat – wie nachfolgende Beispiele aus dem Hochgeschwindigkeits- und Stadtbahnverkehr zeigen (Abbildung 5) – allerdings die Art der Elektroenergieerzeugung.

Beispiel 1: Hochgeschwindigkeitszug Velaro (ICE 3)



Masse besetzt	442 t
Plätze (nur Sitzplätze)	445
Besetzung	100 %
Übertragungswirkungsgrad Bahnstrom (D)	90,7 %
Erzeugungswirkungsgrad Bahnstrom (D)	38,5 %

Primärenergiebedarf (D)

v_max km/h	spezifisch elektrisch Wh/t/km	Wh/P/km	spezifisch Diesel l/P/100 km
200	85,88	85,30	0,87
350	200,39	199,04	2,02

Beispiel 2: S-Bahn / Metro



Leermasse	59 t
Sitzplätze	94
Stehplätze	200
Übertragungswirkungsgrad Bahnstrom (D)	83,0 %
Erzeugungswirkungsgrad Bahnstrom (D)	38,5 %

Primärenergiebedarf (D)

Besetzung	spezifisch elektrisch Wh/t/km	Wh/P/km	spezifisch Diesel l/P/100 km
32%	156,43	110,62	1,12
100%	156,43	43,91	0,45

Abbildung 5: Primärenergiebedarf von elektrischen Bahnen für ein typisches Fahrprofil

Sehr verkürzt dargestellt bedeuten obige Überlegungen: Im Nahverkehr hat die Bahn insbesondere dadurch Vorteile, dass sie gegenüber dem Individualverkehr eine geringe Rollreibung hat, das Automobil „verwalkt“ seine Energie im Gummireifen. Im

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Fernverkehr, wo der Luftwiderstand den Energiebedarf dominiert, hat die Bahn durch die Zugbildung einen aerodynamischen Vorteil. Die hohe kinetische Energie der schweren Bahn wird zwar durch Umwandlungs- und Leitungsverluste verringert, aber nur bei ungenügender Rückspeisung im Bremssystem „verheizt“. Entscheidend für die primärenergetische Bewertung des elektrischen Schienenverkehrs und der „E-Mobilität“ im allgemeinen ist die Effizienz der Energieerzeugung.

2.4 Vollbahn

Ein möglichst geringer Energieverbrauch bei der Beförderung von Personen und Gütern spart nicht nur Kosten, sondern ist auch angesichts steigender Emissionen von Kohlendioxid (CO2) im Verkehrsbereich und eines weiterhin prognostizierten Verkehrswachstums in Europa ein wesentlicher Indikator für die Zukunftsfähigkeit eines Verkehrssystems. Bahnen können Dank energetischer Systemvorteile in einem Verkehrsmittel-Vergleich mit Flugzeug, Automobil und Schiff eine sehr gute Bilanz vorweisen.

Neben einer Vielzahl von Innovationen im schienengebundenen Verkehrssystem, angefangen von der im Wortsinne „bahnbrechenden“ Idee der Dampflok, dem technisch-physikalischen Zusammenspiel von Rad und Schiene und dem gekuppelten Wagenzug, sind der elektrische Antrieb und die zentrale Zuführung elektrischer Energie hier besonderes zu nennen. Werner von Siemens legte vor 130 Jahren mit dem ersten einsatzfähigen Triebfahrzeug den Grundstein für heutige elektrische Bahnsysteme, die weltweit in den unterschiedlichsten Stromsystemen Anwendung finden. Gerade durch den elektrischen Antrieb, einen intelligenten Energiemix mit möglichst hohen Anteilen von regenerativer Stromerzeugung, können Mobilität von Personen und Transport von Gütern und die weitgehende Vermeidung von klimaschädlichen Emissionen sinnvoll kombiniert werden. Trotz erheblicher Anstrengungen anderer Verkehrsträger ist der Schienenverkehr damit der einzige Verkehrsträger, der diese klimaverträgliche, lokal emissionsfreie Antriebsenergie in nennenswertem Umfang anwenden kann.

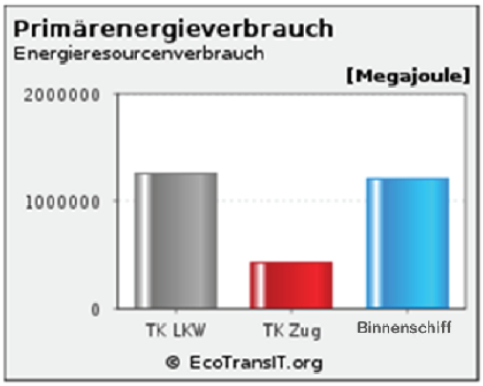
In Deutschland werden rund 90 Prozent der Verkehrsleistung auf der Schiene mit elektrischem Strom erbracht (DB, Mobilität sichern - Klima schützen - Klimabroschüre, 2012) und weitere Streckenelektrifizierungen werden diesen Anteil tendenziell erhöhen.

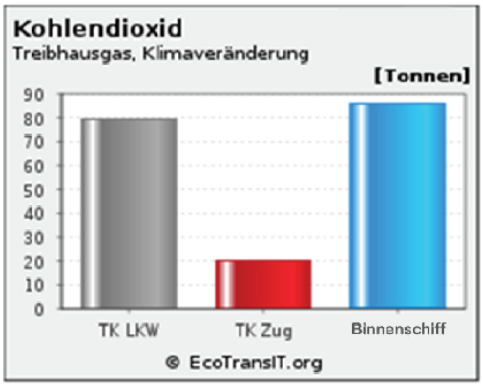
© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Bei der Umsetzung der ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung kommt dem Verkehrssektor im Transitland Deutschland und der intelligenten Vernetzung der Transportsysteme eine besondere Rolle zu. Um steigenden CO_2-Emissionen entgegenzuwirken, bedarf es des weiteren Ausbaus der elektrischen Schieneninfrastruktur.

Verkehrsmittelvergleich:

Durchschnittsgut 2000 t von Hamburg Hafen– Mannheim Neuhermsheim





Primärenergieverbrauch
Energieresourcenverbrauch
[Megajoule]

	TK LKW	TK Zug	TK Binnenschiff
LKW	1.257.203	0	7.432
Zug	0	425.621	0
Binnenschiff	0	0	1.197.086
Summe:	**1.257.203**	**425.621**	**1.204.518**

© EcoTransIT.org

Kohlendioxid
Treibhausgas, Klimaveränderung
[Tonnen]

	TK LKW	TK Zug	TK Binnenschiff
LKW	79,43	0	0,47
Zug	0	20,18	0
Binnenschiff	0	0	85,22
Summe:	**79,43**	**20,18**	**85,69**

© EcoTransIT.org

Abbildung 6: Umweltbilanz einer beispielhaften Güterverkehrsleistung

Die Grundlage für die Versorgung der Traktion auf rd. 19.500 km elektrifizierter Strecke in Deutschland bildet heute die vorwiegend zentrale Einphasen-Wechselstrom Bahnenergieversorgung mit den Kraftwerken, den Bahnumformer- und Bahnumrichterwerken, dem 110 kV Freileitungsnetz, den Bahnumspannwerken und den 15 kV Fahrleitungsanlagen. Eine Besonderheit ist dabei die Frequenz von 16 2/3 bzw. 16,7 Hertz, die 1912/1913 in den deutschen Bahnverwaltungen eingeführt wurde, um die Vorzüge des transformierbaren Wechselstroms mit den seinerzeit in Einsatz gebrachten Fahrmotoren elektrischer Lokomotiven zu kombinieren. Mit Einführung der Leistungselektronik in den Triebfahrzeugen in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts verlor der physikalische Nutzen der Sonderfrequenz 16,7 Hz an Bedeutung. Für neue strombetriebene Eisenbahnsysteme wurde ab dieser Zeit meist die Frequenz 50 Hz für Bahnstromsysteme verwendet. Ein weiterer Meilenstein der Eisenbahnentwicklung war die Bremsenergierückgewinnung: mit Hilfe leistungselektronischer Umrichter war es möglich, die Energie der generatorischen Bremse in elektrischen Lokomotiven zur Rückspeisung in die Oberleitung aufzubereiten, um sie anderen Fahrzeugen im Netz

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

nutzbar zu machen. In Deutschland sind gegenwärtig bereits über 2000 rückspeisefähige Lokomotiven und Triebzugeinheiten im Einsatz, die jährlich mit knapp 1 TWh ($1 \cdot 10^{12}$ Wh) rückgespeister elektrischer Energie das Klima mit 600 kt ($600 \cdot 10^{6}$ kg) vermiedenen CO_2-Emissionen schonen (Deutsche Bahn, 2009). Dies entspricht dem jährlichen Strombedarf von einer viertel Million Haushalte in der Bundesrepublik.

Neben der Energieeinsparung durch rückspeisende Bremssysteme in Fahrzeugen wurden im Rahmen der fahrzeugtechnischen Entwicklung weitere Potenziale im Fahrzeugleichtbau, in energiesparenden Fahr- und Fahrzeugkonzepten, in der Verbesserung der Antriebstechnik und der damit verbundenen Erhöhung der Triebfahrzeugwirkungsgrade gehoben. So können Triebzugeinheiten im Nahverkehr nach dem heutigen Stand der Technik im Vergleich zu den 30 bis 35 Jahre älteren Vorgängern eine doppelt so gute Klimabilanz vorweisen. Bei Lokomotiven im Regionalzugverkehr sind beim Austausch älterer Baureihen immerhin 20 % zu erwarten.

Die Optimierung von Fahrzeugen und Betriebsverfahren von Bahnsystemen geht weiter voran. So können neben fahrzeugseitigen Verringerungen des Energiebedarfs auch Informationssysteme beim Energiesparen helfen, denn z.B. machen es die physikalischen Eigenschaften des Rad- Schiene Systems möglich, schon frühzeitig vor einem planmäßigen Halt den Zug ausrollen zu lassen. Je nach Ausgangsgeschwindigkeit sind bei entsprechenden Fahrzeitreserven nennenswerte Fahrstrecken ohne Zugkraft möglich.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

2.5 Stadtverkehr

Der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) hat für die Agglomerationen eines Landes eine ganz erhebliche Bedeutung, er ist als wichtige Infrastruktur ein wesentlicher Standortfaktor. In Deutschland beispielsweise werden im ÖPNV von den verschiedenen Verkehrsträgern mehr als 9 Milliarden Fahrgäste pro Jahr befördert. Im innerdeutschen Flugverkehr dagegen waren es im Vergleichszeitraum 15 Millionen Fahrgäste pro Jahr [7].

Im Bereich der Stadt- und U-Bahnen wurde in den vergangenen Jahrzehnten bereits eine Vielzahl von betrieblichen, infrastrukturellen und auch fahrzeugtechnischen Maßnahmen umgesetzt bzw. eingeleitet. Diese haben zu einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz beigetragen, Beispiele sind der Fahrzeugleichtbau und Fahrerassistenzsysteme für energieoptimalen Fahrbetrieb. Derzeit wird der Einsatz von Energiespeichern zur kurzzeitigen Aufnahme der Bremsenergie in Unterwerken und auf Fahrzeugen im betrieblichen Einsatz erprobt oder sogar schon serienmäßig eingesetzt. Bei der Auswertung von Messungen bei verschiedenen Verkehrsbetrieben wurde auch deutlich, dass dort, wo eine sehr gute Vermaschung des Gleichstromnetzes gewährleistet ist, bereits heute ein sehr hoher Rückspeisegrad vorhanden ist und somit kaum Bremsenergie verloren geht.

Durch fortlaufende Entwicklungen und Forschungsvorhaben von Betreibern und Lieferanten sowohl im Bereich der Fahrzeugtechnik, Infrastruktur, als auch bei Speichertechnologien und Betriebsassistenzsystemen wurde und wird die Energieeffizienz fortlaufend gesteigert.

In der vorliegenden Studie wird eine Vielzahl von möglichen Einzelmaßnahmen in Bezug auf die weitere Steigerung der ohnehin schon guten Energieeffizienz hin untersucht. Die Einzelmaßnahmen umfassen alle Bereiche, sie werden sowohl auf die alleinige Umsetzung hin untersucht als auch auf die Umsetzung von Kombinationen von Maßnahmen.

2.6 Verkehrskonzepte für die Zukunft

Mit welchen Wahrscheinlichkeiten bleibt uns eigentlich das heute bekannte Mobilitätssystem auch in seiner Detailstruktur unverändert erhalten? Nachstehend dazu einige Einflüsse:

- Die Bruttomineralölpreise (beispielsweise als Diesel) inklusive Distributionskosten und ohne zusätzliche Speicherkosten (Tank) liegen heute für den Endverbraucher bei etwa 0,15 €/ kWh Heizwert, ohne Besteuerung sogar deutlich günstiger. Angesichts beispielsweise der Bruttokosten des elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energien und den zusätzlichen Elektro-Speicherkosten ist diese Kostenposition kaum zu halten, d.h. Verkehr wird vermutlich insgesamt teurer werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

- Die bisherigen Speicherdichten sind für Fernreisen und vor allem für den Schwerlastverkehr unzureichend.
- Der Anteil der Energien aus „neuen“ Energiequellen liegt derzeit selbst in hochindustrialisierten Ländern bei etwa 10%. Je nach den Zeitskalen der Ablösebedingungen und Umstellungsszenarien kann es insgesamt zu unzureichendem Energieangebot kommen, was die Kosten der Mobilität weiter treiben dürfte.

Die Verkehrspolitik Deutschlands verfolgt bereits seit vielen Jahren das Ziel, vor allem Güterverkehrsströme von der Straße auf die Schiene zu verlegen, mit allen bekannten Problemen (wie etwa die Logistik der „letzten Meile“). Unter obigen Aspekten könnte diese Zielvorstellung zusätzlichen Auftrieb erhalten, da kostenmäßige und physikalische Einschränkungen des Schwerverkehrs auf der Straße im Zeitalter der Elektromobilität bisher nur durch zusätzlichen Schienenverkehr zu kompensieren wären. Ähnliches gilt für den Personenfernreiseverkehr, bei dem ebenso vor allem auf die Schiene ausgewichen werden dürfte, zumal die Preisrückgänge im kerosinbasierten Flugverkehr der letzten Jahre im obigen Szenario ebenfalls ein Ende finden – oder sich sogar umkehren – könnten.

Diese Aussichten wären kaum kompatibel mit aktuellen Randbedingungen. Während das Investitionsverhalten des europäisch „liberalisierten“ Schienenverkehrs sich bereits heute folgerichtig und zukunftsweisend auf Schnellfahrstrecken des Personenverkehrs konzentriert, geht die Länge des Gesamtnetzes stetig zurück. Die Hauptabfuhrstrecken operieren heute andererseits trotz Erneuerung schon an der technischen Leistungsgrenze. „Jahrhundertinvestitionen“ wie beispielsweise separate Schienengüterverkehrstrassen liegen auf Eis. Bedenkt man die mit gelegentlich bis zu 15 oder 20 Jahren verhältnismäßig langen Planungs- und Bauzeiten im Schienenverkehr, müssten schon heute die ersten Konzepte vorgelegt werden, um im Jahre 2030 erstmalig davon profitieren zu können. So gebietet bereits die Vorsorgepflicht, entsprechende verkehrsplanerische Forschungsprojekte zu intensivieren, bzw. zu beginnen.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3 Ermittlung von relevanten Einflussgrößen

3.1 Energieflüsse im elektrischen Bahnsystem

Abbildung 7 zeigt schematisch die Erzeugung und Verteilung der elektrischen Traktionsenergie, die nach landes- und anwenderspezifisch ausgeprägten Systemen erfolgt und immer verlustbehaftet ist. Diese Verluste sind in thermischen Kraftwerken besonders ausgeprägt. Ein weiterer Nebenverbraucher sind die stationären Bahnanlagen für den Betrieb. Den Fahrstrom beziehen die Fahrzeuge durch Stromabnehmer über Fahrleitungen. Im Bahnfahrzeug wird die Energie - gegebenenfalls über einen Transformator - in die notwendigen Spannungsebenen für das Antriebssystem, deren Hilfsbetriebe (z.B. Lüfter, Pumpen, Kompressoren) und die Komfortsysteme (z.B. Klimaanlage, Fahrgastinformation, sanitäre Anlagen) umgeformt. Dieser Energiefluss bestimmt fahrzeugseitig die aufgenommene Energie. Aber auch die Fahrdynamik (z.B. Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs, Höchstgeschwindigkeit, Streckenführung) sowie die betriebliche Abwicklung haben signifikanten Einfluss auf die insgesamt verbrauchte Energie.

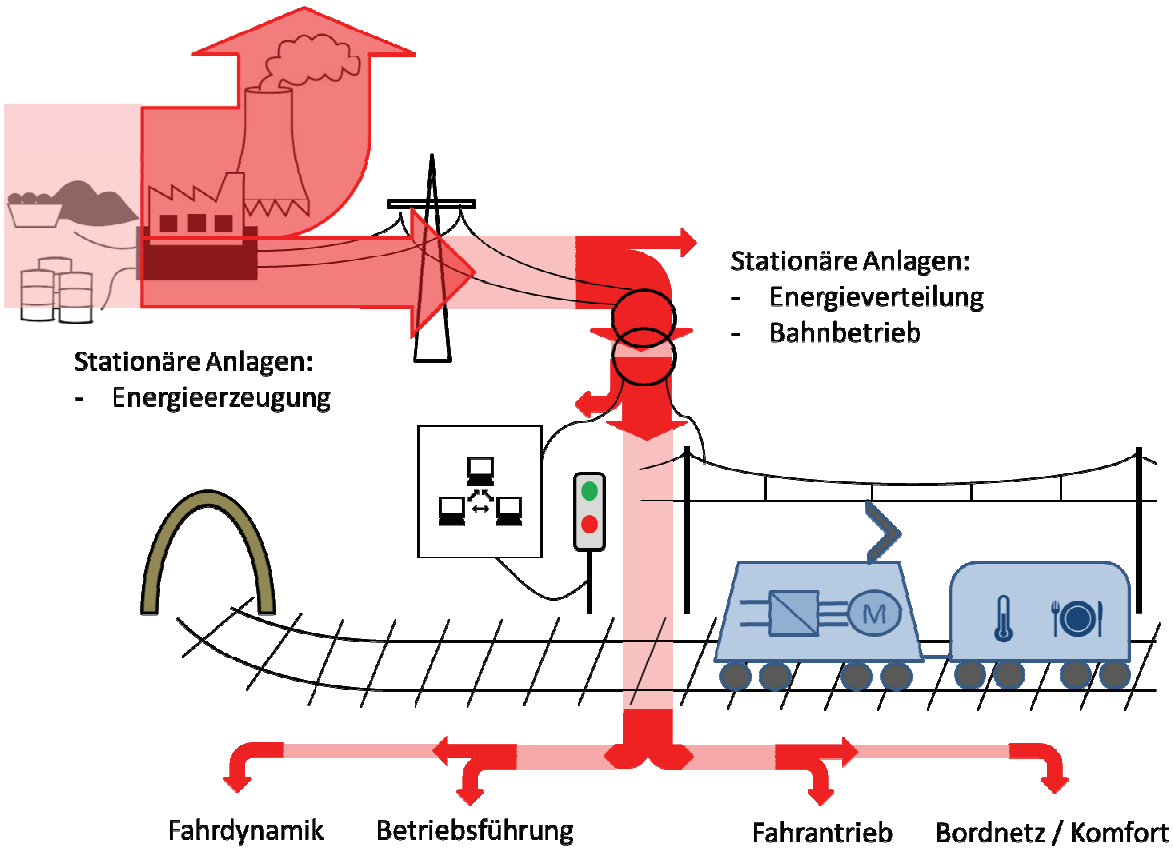


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Energiebedarfe im elektrischen Bahnsystem

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Aus vergleichbaren Untersuchungen ist hinlänglich bekannt, dass die verschiedenen Verkehrsarten des Eisenbahnwesens bei der Bewertung von Energiesparpotenzialen grundsätzliche Unterschiede aufweisen. Deshalb wurden alle künftigen Betrachtungen auf folgende Weise unterschieden:

- (Personen-)Fernverkehr
- Güterverkehr
- Regionalverkehr (AC)
- U-Bahn (DC)

  Hinweis: S-Bahnen können je nach Bauart entweder eher dem Regionalverkehr oder der U-Bahn zugeordnet werden.
- Straßenbahn

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3.2 Fernverkehr

Das Modell für den Fernverkehr besteht aus einer 400 km langen zweigleisigen Strecke, deren Energieversorgung über 17 Unterwerke alle 25 Kilometer sichergestellt wird. Die Strecke hat fünf Haltemöglichkeiten. Die Fahrleitungsanlage wird durch die Regelbauart Re330 mit Verstärkungsleitungen, Rückleitungsseilen und Banderdern des Spannungssystems 15 kV und 16,7 Hz dargestellt. Das verkehrende Fahrzeug ist ein Triebzug in Anlehnung an den ICE 3 der DB AG. Er besteht aus acht Wagen mit einer Gesamtlänge von 200 m, einer Leermasse von 410 t und einer Antriebsleistung von 8000 kW, die auf die Hälfte der 32 Achsen verteilt ist. Die Bremsleistung beträgt 8200 kW. Im Modell wird für die Hilfsbetriebe- und Komfortleistung ein Wert von 350 kW angesetzt. Dies entspricht pro Wagen im Mittel einer Leistung von 43,75 kW. Die wesentlichen Prozessgrößen der Basissimulation sind in Abbildung 8 dargestellt:

- Angeforderte Zugkraft (schwarz)
- Elektromotorische Zug- bzw. Bremskraft (gelb)
- Resultierende Zuggeschwindigkeit (hellgrün)
- Stromaufnahme aus der Fahrleitung (rot)
- Spannungsverlauf am Stromabnehmer (dunkelgrün)

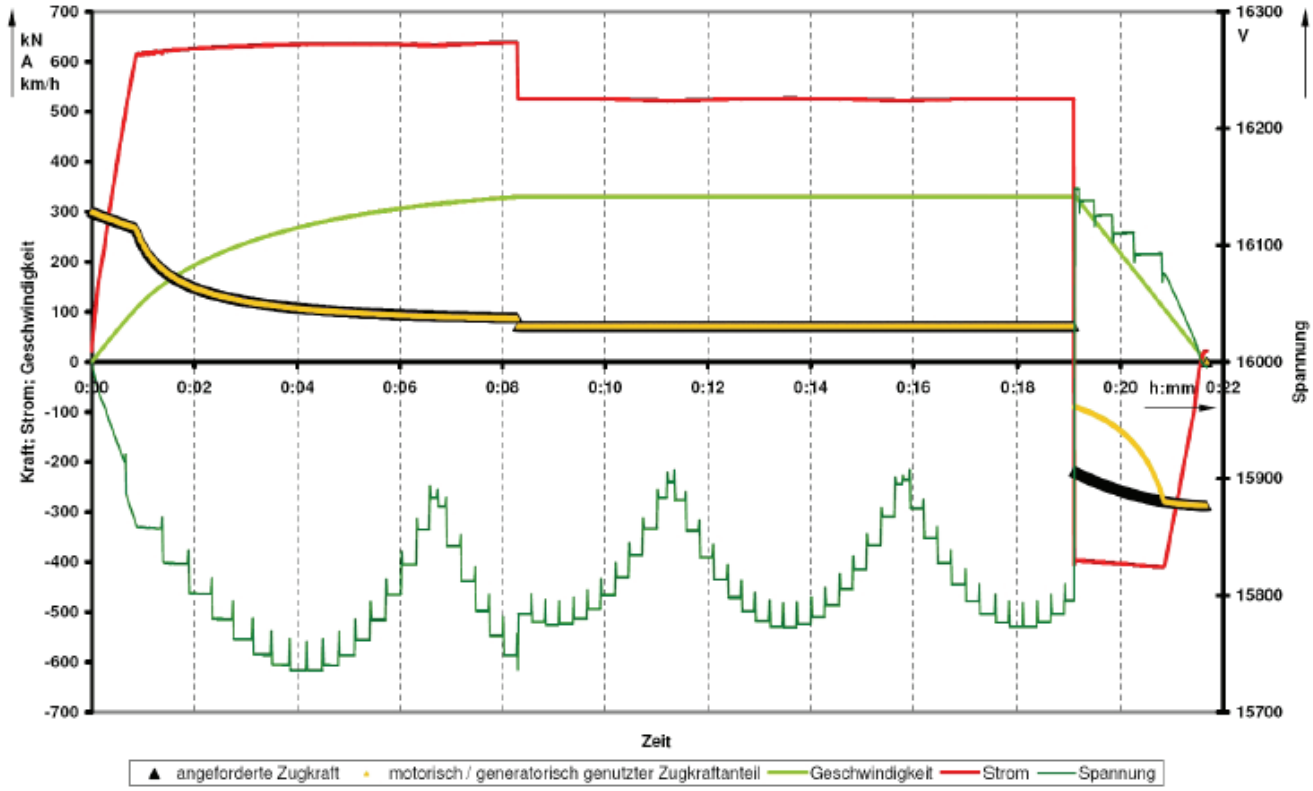


Abbildung 8: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Fernverkehrs [5]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3.3 Güterverkehr

Das Modell für den Güterverkehr ist als 400 km lange zweigleisige Strecke aufgebaut. Der Zug hat im Bereich 100 – 340 km alle 40 km einen Zwischenhalt und im Bereich 340 – 500 km alle 80 km einen Zwischenhalt. Die gesamte Strecke wird von neun Unterwerken des Spannungssystems 15 kV und 16,7 Hz über eine Kettenwerksfahrleitung der Regelbauart Re200 der DB AG versorgt und verfügt für verbesserte Rückleitungsverhältnisse und zur Potenzialsteuerung über Rückleitungsseile. Die Fahrleitungen beider Gleise werden alle zwei Kilometer quergekuppelt.

Der verkehrende Güterzug besteht aus einer vierachsigen Güterzuglokomotive in Anlehnung an die Baureihe 152 der DB AG sowie einem aus zwölf beladenen Wagen.

Die Lokomotive in Drehstromantriebstechnik ist 20m lang bei einer Masse von 88 t sowie einer Antriebs- und Bremsleistung von 6400 kW. Die Hilfsbetriebeleistung der Lokomotive beträgt in der Simulation 100 kW. Die Anschlussleistung der Hilfsbetriebeumrichter der Baureihe 152 beträgt viermal 80 kVA. Bei einem Leistungsfaktor von eins entsprechen die 100 kW rund 31% der Anschlussleistung. Der Wagenzug hat eine Masse von 1000 t und ist 240 m lang.

Die wesentlichen Prozessgrößen der Basissimulation sind in Abbildung 9 dargestellt.

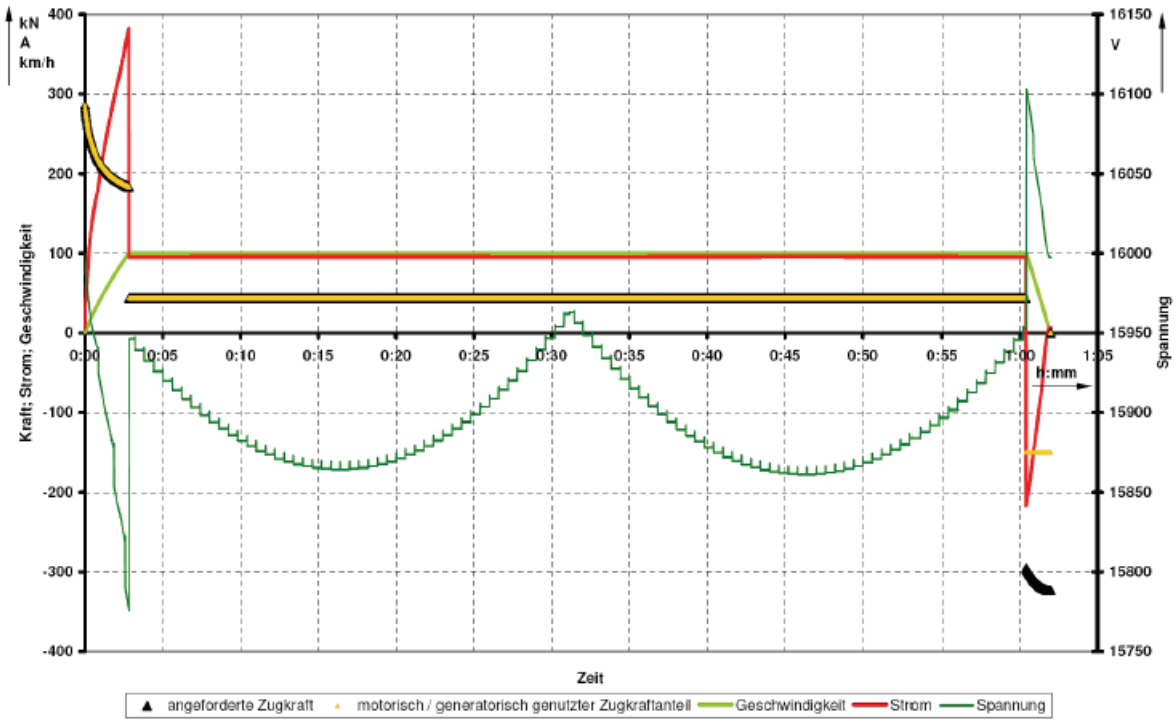


Abbildung 9: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Güterverkehrs [5]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3.4 Regionalverkehr

Das Regionalverkehrsmodell besteht aus einer 51 Kilometer langen zweigleisigen Strecke, auf der acht Bahnhöfe verteilt sind. Die Energieversorgung entspricht der des Güterverkehrs, sodass zwei Unterwerke die Strecke speisen. Das Fahrzeug ist ein vierteiliger Regionaltriebzug in Anlehnung an die Baureihe 440 der DB AG mit einer Gesamtlänge von 71m und einer Leermasse von 136,5 t. Acht der zehn Achsen in vier Drehgestellen sind einzeln von Asynchronfahrmotoren angetrieben und erzeugen in Summe eine Traktionsleistung von 2000 kW. Die Bremsleistung beträgt mit 3000 kW das 1,5-fache der Traktionsleistung.

Die Maximalgeschwindigkeit beträgt 160 km/h bei einer maximalen Beschleunigung von 1,0 ms² und einer konstanten Verzögerung von 0,7 ms².

Die Hilfsbetriebe- und Komfortleistung wird auf eine Gesamtleistung von 55 kW festgelegt.

Die wesentlichen Prozessgrößen der Basissimulation sind in Abbildung 10 dargestellt.

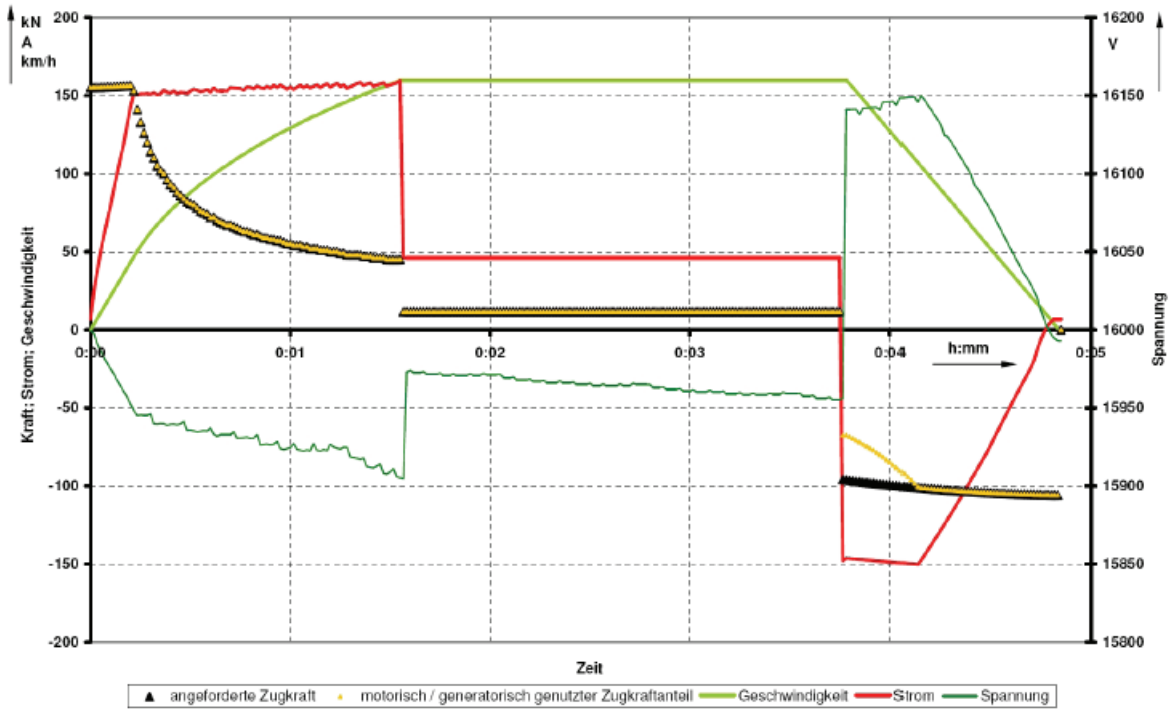


Abbildung 10: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Regionalverkehrs [5]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3.5 U-Bahn

Die U-Bahn-Linie operiert auf einer 30,15 km langen zweigleisigen Strecke mit 30 Haltestellen und mit einer Zugfolgezeit von drei Minuten. Die gesamte Strecke befindet sich in einem Tunnel, der dazu beiträgt, dass sich der Fahrwiderstand des Fahrzeuges vergrößert.

Die Energieversorgung wird über eine Seitenstromschiene mit Gleichstrom des Spannungssystems von 750 V sichergestellt. Wie im Straßenbahnsystem speisen jeweils zwei benachbarte der 15 Unterwerke zweiseitig einen Speisebereich. Die Stromschienen aus Aluminiumverbundwerkstoff der zwei Gleise sind nicht querverbunden.

Die U-Bahn-Fahrzeuge sind - in Anlehnung an MVG Baureihe C - 110 Meter lang, bestehen aus sechs Sektionen und sind 160 t schwer. Jede der 24 Achsen ist von einem Asynchronfahrmotor mit einer Traktionsleistung von je 100 kW angetrieben und hat eine maximale Bremsleistung von je 200 kW, die nur kurzzeitig abrufbar ist. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h und es werden Beschleunigungs- und Verzögerungswerte wie bei der Straßenbahn von 1,1 m/s² erreicht.

Während der Beschleunigungsphase kann dieser Wert bis 40 km/h aufrecht gehalten werden. Die Hilfsbetriebe- und Komfortleistung für den Gesamtzug wird mit 80 kW festgelegt.

Die wesentlichen Prozessgrößen der Basissimulation sind in Abbildung 11 dargestellt.

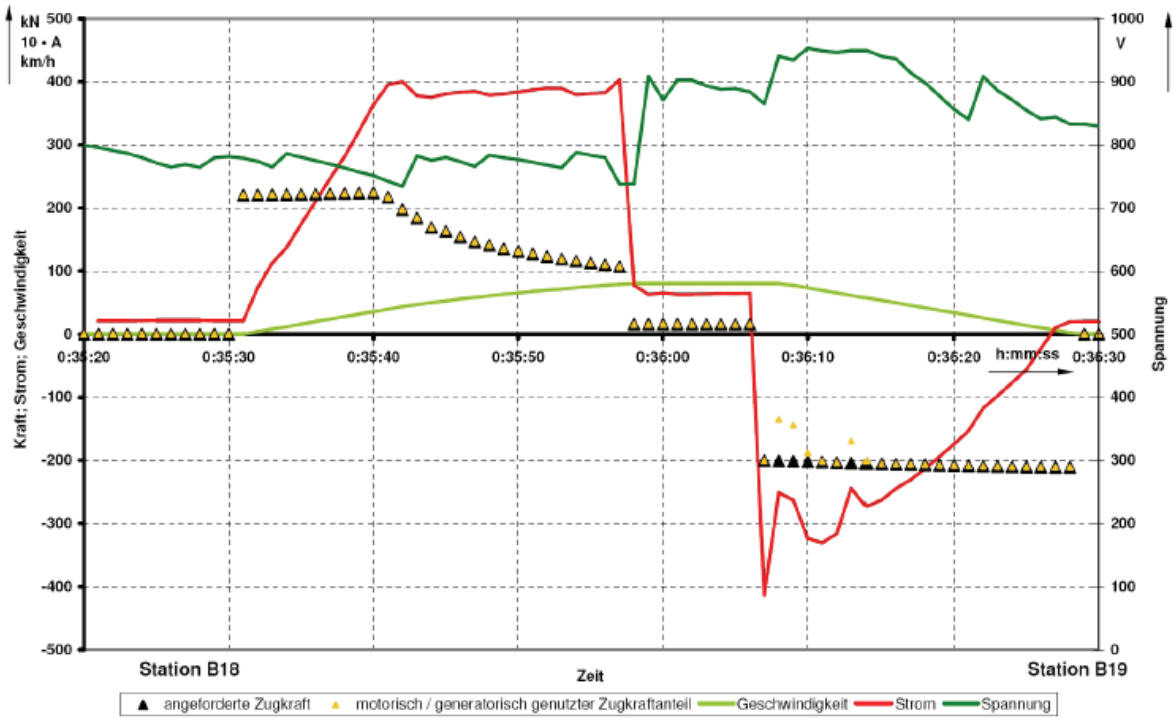


Abbildung 11: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des U-Bahn-Verkehrs [5]

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

3.6 Straßenbahn

Im Modellsystem der Straßenbahn besitzt die Strecke eine Länge von 13,65 km mit insgesamt 18 Haltestellen. Sie verläuft modellhaft als Durchmesserlinie von einem Randgebiet über das Stadtzentrum zu einem anderen Randgebiet der Stadt. In diesen Randgebieten beträgt der Halteabstand bis zu 1500 m. In der Streckenmitte, die den Kern der Stadt repräsentiert, sind die Haltestellen minimal 400m voneinander entfernt. Weil das Straßenbahnnetz lediglich aus einer Strecke besteht, nimmt der mittlere Halteabstand mit 800m einen vergleichsweise hohen Wert an. Auf einem mittleren Streckenabschnitt bündeln sich drei Linien, sodass die Zugfolgezeit von 600 s auf 200 s reduziert wird. Die Versorgung der Fahrzeuge erfolgt in Form einer Kettenwerksfahrleitung mit Gleichstrom des Spannungssystems von 750 V über sieben nicht rückspeisefähige Unterwerke. In der Basisvariante speisen jeweils zwei benachbarte Unterwerke zweiseitig einen Speisebereich. Die Kettenwerke der benachbarten Gleise sind alle 100m mit Querverbindern ausgestattet.

In Anlehnung an das Fahrzeug NGT D8 DD der Dresdner Verkehrsbetriebe AG wird die Modellstrecke von Straßenbahnen mit Drehstromantriebstechnik betrieben, deren Antrieb auf sechs von acht Achsen verteilt ist. Das 30 m lange und 40 t schwere Fahrzeug besitzt eine Traktionsleistung von 6 x 85 kW sowie eine maximale Bremsleistung von 1020 kW. Diese Bremsleistung ist nur kurzzeitig abrufbar. Die Höchstgeschwindigkeit ist auf 60 km/h begrenzt. Aufgrund der geringen Halteabstände des Straßenbahnsystems und den damit einhergehenden häufigen Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen, beträgt die maximale Beschleunigung 1,1 m/s², die bis zu einer Geschwindigkeit von 36 km/h aufrechterhalten werden kann. Die Verzögerung beträgt ebenso 1,1 m/s². Die Nebenverbraucher teilen sich in Hilfsbetriebe- und in Komfortleistung auf. Der Bedarf während dem Betrieb schwankt in Abhängigkeit der Witterung und wird in der Simulation mit einem mittleren Wert von 20 kW angesetzt.

Die wesentlichen Prozessgrößen der Basissimulation sind in Abbildung 12 dargestellt.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

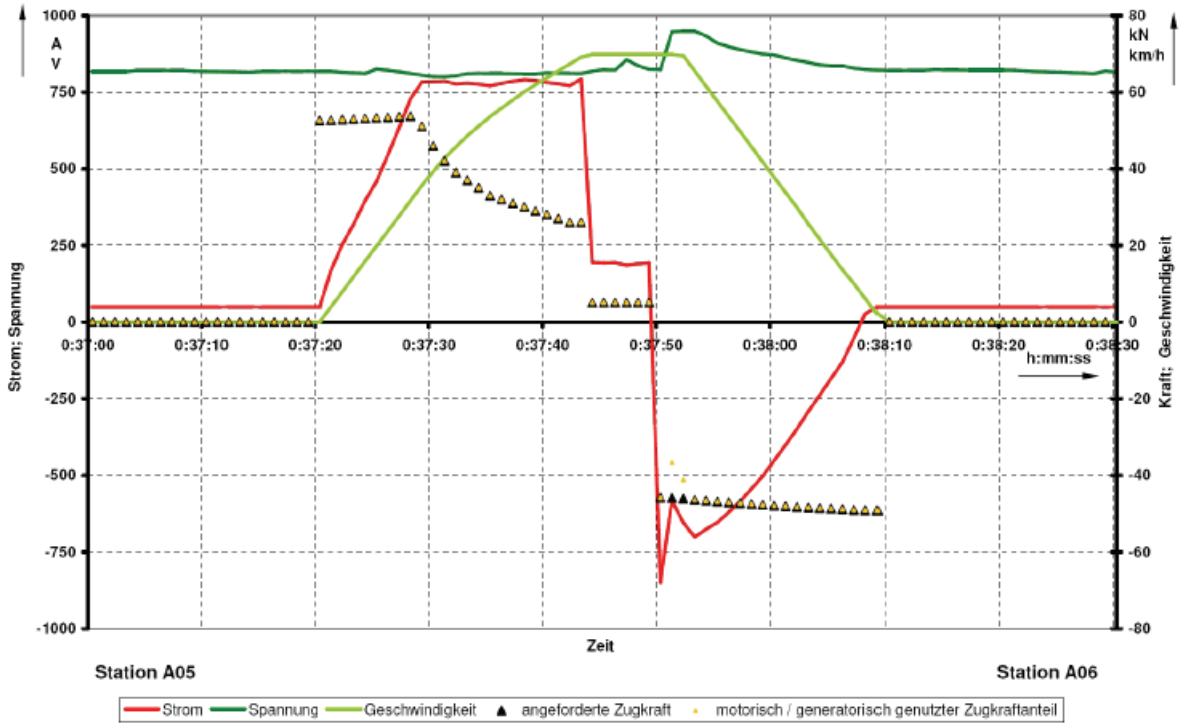


Abbildung 12: Kenngrößen eines Fahrzyklus der Basissimulation des Straßenbahnverkehrs [5]

3.7 Ermittlung von relevanten Einflussgrößen

Innerhalb der oben definierten fünf Hauptgruppen

- Fahrantrieb
- Bordnetz/Komfort
- Fahrdynamik
- Betriebsführung
- Stationäre Anlagen

ist eine detaillierte Betrachtung von insgesamt 33 Einflussgrößen auf den Gesamtenergiebedarf vorgenommen worden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Diese wurden von Fachleuten aus Hochschule, Betrieb und Bahnindustrie nach ihrer Relevanz und ihrem (realistischen Verbesserungs-) Potenzial auf einer Skala von 1 bis 3 klassifiziert. Anschließend wurde eine Gewichtung vorgenommen, die Faktoren mit geringer Relevanz oder geringem Potenzial abwertet und solche mit hohen Werten in beiden Kategorien aufwertet (durch Multiplikation mit anschließender Normierung auf 3 als maximalen Wert). Somit reduziert sich die Komplexität der Betrachtung auf folgende Frage:

In welcher Verkehrsart hat die Einflussgröße viel bzw. wenig Bedeutung?

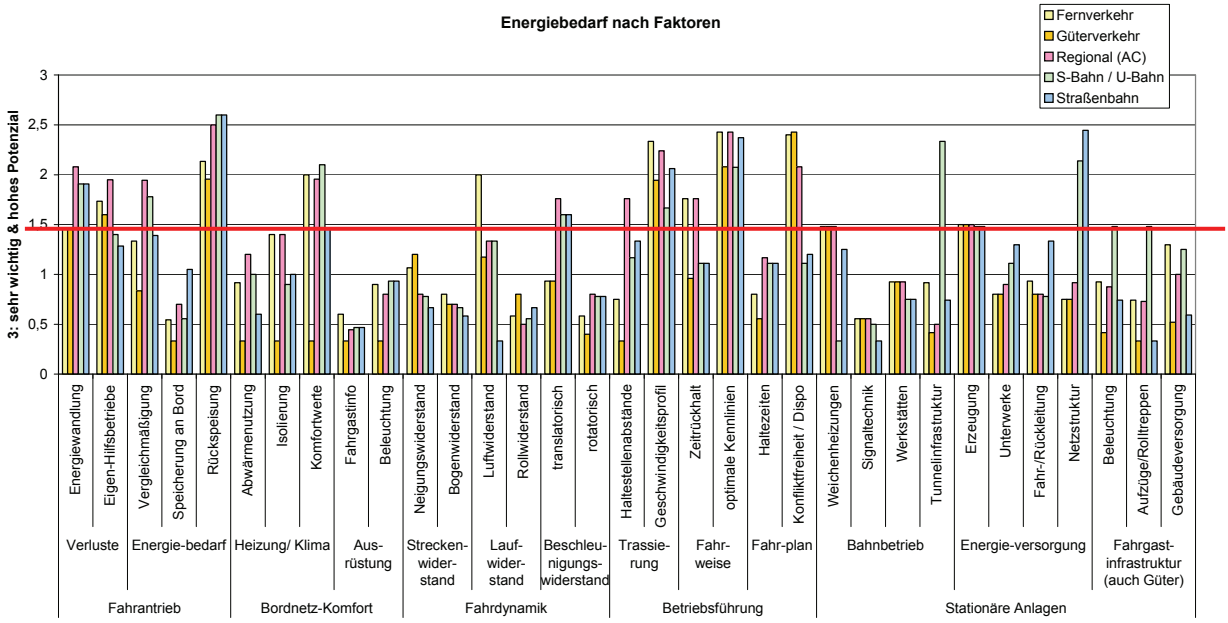


Abbildung 13: Klassifizierung der Einflussgrößen auf den Gesamtenergiebedarf

Diese Übersicht wurde nun für die Erstellung geeigneter Simulationsmodelle herangezogen:

Einflussgrößen, die im Wesentlichen unter 1,5 liegen, brauchen nicht modelliert bzw. nicht variiert zu werden. Sie werden in der abschließenden Bewertung jedoch qualitativ oder anhand von Beispielen erwähnt (Kapitel 4.5).

Die übrigen Einflussgrößen höherer Bedeutung sind für die Simulation geeignet gruppiert worden, siehe nachfolgende Tabelle 3. Die Farbcodierung ist rein willkürlich und wird bei der Nutzwertanalyse in Kapitel 5.3 wieder aufgegriffen, um deren Übersichtlichkeit zu verbessern.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Tabelle 3: Übersicht der zu simulierenden Einflussgrößen je Verkehrsart

AUSWAHL RELEVANTER EINFLUSSGRÖßEN	Unterpunkte nach Abbildung 13	Straßenbahn	S- / U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Antriebswirkungsgrad bzw. -Verluste	Energiewandlung, Eigen-Hilfsbetriebe	x	x	x	x	x
Rückspeisefähige Triebfahrzeuge	Vergleichmäßigung, Rückspeisung	x	x	x	x	x
Leistungsbedarf für Hilfsbetriebe	Bordnetz-Komfort: alle Kategorien	x	x	x	x	x
Aerodynamischer Widerstand	Fahrdynamik: Laufwiderstand (anteilig)	x	x	x	x	x
Leermasse des Zuges	Fahrdynamik: Beschl'widerst. (anteilig)	x	x	x	x	x
Fahrzeitverlängerung	Zeitrückhalt, optimale Kennlinien	x	x	x	x	x
Verzicht auf Halte	Haltstellenabstände Konfliktfreiheit/Dispo	x	x	x	x	x
Beseitigung von Störstellen	Geschwindigkeitsprofil	x		x	x	x
Energieerzeugung	Zusätzlich alle Verbraucher der Infrastruktur.	x	x	x	x	x
Energieverteilung	Unterwerke, Netzstruktur, Fahr-/Rückleitung	x	x			
Tunnelbauart			x	x	x	x

Die nachfolgenden Betrachtungen können nun zweistufig erfolgen:

- Zunächst wurde durch Simulation der Verkehrsarten mit Variation einzelner Parameter ermittelt, inwieweit sich der Energiebedarf tatsächlich beeinflussen lässt, und in welchem Verhältnis Ursache und Wirkung zueinander stehen.
- Abschließend erfolgte eine Bewertung mit dem Ziel, Aufwand und Nutzen realistischer Einzelmaßnahmen zu ermitteln.

Daraufhin wird es möglich, durch geeignete Kombination verschiedener Parametervariationen das Ergebnis zu verfeinern, indem gegenseitige Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Manche Maßnahmen bedingen in der Praxis einander, andere sind eher gegenläufig. Beispielsweise lässt sich ein Trafowirkungsgrad recht einfach erhöhen, wenn man eine Erhöhung seiner Masse (und damit der des Zuges) akzeptiert.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4 Simulationsergebnisse

4.1 Methodik

Grundlage für die Modellierung der Bahnsysteme bilden die Programme OpenTrack der Open Track Railway Technology GmbH Zürich als Betriebssimulationsprogramm und OpenPowerNet der IFB Institut für Bahntechnik GmbH als elektrisches Netz- und Lastflussberechnungsprogramm.

Mit Hilfe der beiden Programme lassen sich neben den fahrdynamischen und betrieblichen Eigenschaften ebenso elektrische Eigenschaften des Bahnsystems modellieren und detailliert untersuchen.

Diese beiden Programme arbeiten in Form einer Co - Simulation gleichzeitig miteinander, sodass die Wechselwirkungen der Teilsysteme Bahnenergieversorgung und Fahrzeug berücksichtigt werden.

Im nachfolgenden werden die Modelle für das jeweilige Bahnsystem dargestellt.

Die Basis für alle in diesem Kapitel erläuterten Simulationsergebnisse bilden die repräsentativen Referenzmodelle für die fünf betrachteten Verkehrsarten, deren Parametrierung im vorangegangenen Kapitel näher beschrieben wurde. Mit der gezielten Variation einzelner Einflussgrößen werden die Änderungen des Energiebedarfs durch diese Variation ermittelt. Dazu werden verschiedene Werte der Einflussgröße über einen größeren Bereich um die Basis des Referenzmodells hinweg betrachtet, um einen Trend dieser Einflussgröße zu untersuchen. Falls sich nun eine annähernd lineare Abhängigkeit um das gewählte Referenzmodell herum ergibt, lässt sich daraus der innerhalb dieser Studie so bezeichnete Einsparfaktor berechnen. Damit wird eine Normierung der Ergebnisse ermöglicht, für jede Einflussgröße ergibt sich der individuelle Einsparfaktor

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Einflussgröße}} = \frac{\text{Reduktion des Energiebedarfs in \%}}{\text{Variation der Einflussgröße in \%}}$$

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Wird beispielsweise die Einflussgröße Leermasse des Fahrzeugs betrachtet, so ergibt sich nach Abbildung 14: für einen Wagenzug, der gegenüber dem Referenzmodell um 10% leichter ist, sinkt der Energiebedarf um 3% gegenüber dem Referenzmodell. Der Einsparfaktor wird somit 0,3. Inwieweit eine solche Variation der Einflussgröße technisch überhaupt realisiert werden kann und kommerziell noch sinnvoll ist, wird erst im nachfolgenden Kapitel behandelt.

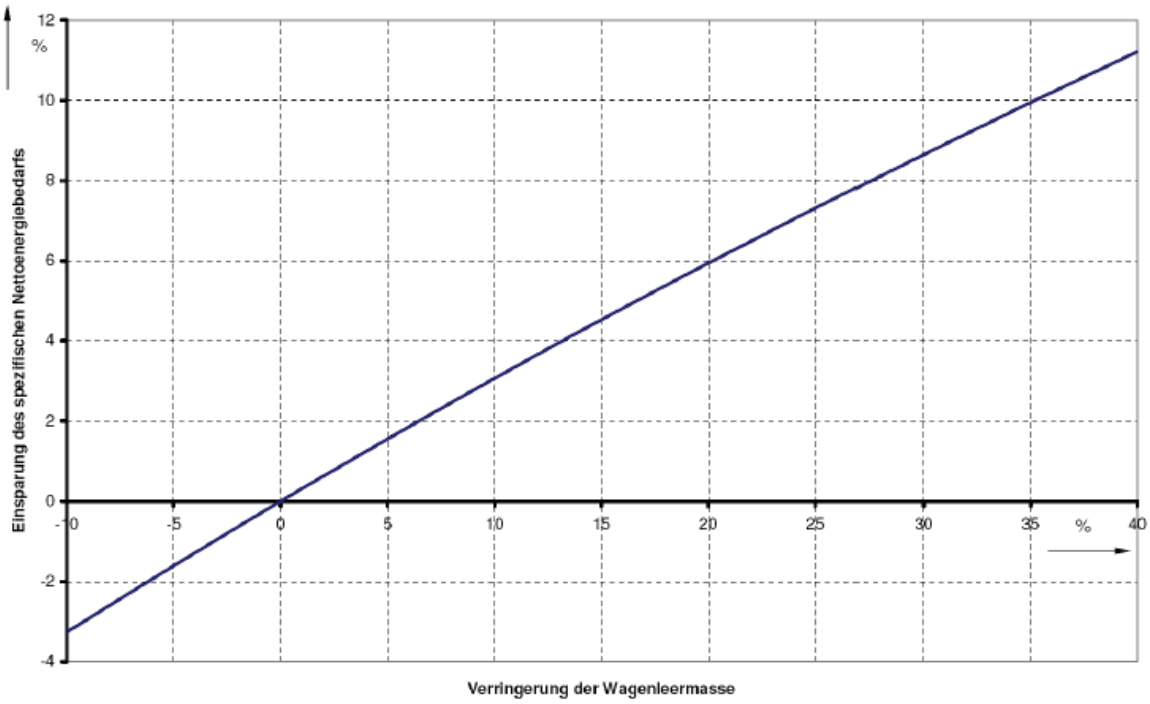


Abbildung 14: Einfluss der Verringerung der Wagenleermassse auf den spezifischen Netto-energiebedarf im Güterverkehrssystem [5]

Schließlich gibt es auch einige relevante Einflussgrößen im Bereich der Energieversorgung, die sich nicht ohne Weiteres variieren lassen, sondern üblicherweise nur einige diskrete Zustände annehmen: Rückspeisefähigkeit, Fahrleitungstypen oder auch Einspeisekonzept. Hierfür beschränkt sich die Aussage auf den Energiebedarf insgesamt.

$$\text{Einsparung}_{\text{Einflussgröße}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs bei geänderter Einflussgröße}}{\text{Energiebedarf im Referenzmodell}}$$

Aus der Mittelung zwischen dem Wert bei geänderter Einflussgröße und dem des Referenzmodells lassen sich bedarfsweise diejenigen Werte abschätzen, die für gemischte Szenarien gelten würden. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn nur Teile eines Netzes eine verstärkte Fahrleitung erhalten würden oder nur ein bestimmter Anteil der Fahrzeuge rückspeisefähig würde.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.2 Verbesserung der Fahrzeugtechnik

Im Folgenden werden die in Kap. 3.7 benannten Einflussgrößen betrachtet, die sich auf die Verbesserung der Fahrzeugtechnik beziehen. Die Einsparfaktoren für die einzelnen Einflussgrößen, die sich aus den Simulationsresultaten ergeben, werden genannt. Es werden einige technische Maßnahmen aufgelistet, mit denen die Einflussgröße modifiziert werden kann.

4.2.1 Verlustleistung im Antriebssystem

Das Antriebssystem stellt in allen Verkehrsarten das Subsystem mit dem höchsten Leistungsbedarf dar und ist auch für alle Verkehrsarten das Subsystem mit einem sehr hohen Energiebedarf. Eine Reduktion der Verluste im Antriebssystem verspricht daher auch, signifikant zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs des Bahnsystems beizutragen.

Werden die Verluste des Antriebssystems reduziert, so reduziert sich auch der Energiebedarf für die Fahrt des Fahrzeugs bei ansonsten gleich bleibenden Größen. Der Einsparfaktor der Antriebsverluste

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Antriebsverluste}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt-Energiebedarfs}}{\text{Reduktion der Antriebsverluste}}$$

ergibt sich für die einzelnen Verkehrsarten zu:

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	0,29	0,31	0,32	0,16	0,2

Am stärksten ist der Einfluss des Traktionswirkungsgrades bei den Verkehrsarten mit relativ vielen Halten, weil sowohl beim Fahren (Beschleunigen, Beharren) als auch beim elektrischen Bremsen (Rekuperation) die Verluste verringert werden. Dennoch bleibt der Einsparfaktor unterproportional, weil der Ausgangspunkt für die Betrachtung bereits ein hoher Wirkungsgrad ist und die absoluten Zahlen sich selbst bei hohen prozentualen Verbesserungen nur wenig ändern.

Im Folgenden sollen die technischen Möglichkeiten zur Reduktion der Antriebsverluste kurz angerissen werden.

Das Steuerverfahren, mit dem die Traktionsmotoren betrieben werden, hat Einfluss auf die in Motor und Antriebswechselrichter entstehenden Verluste. Einfache Möglichkeiten sind beispielsweisedie Senkung des Motorflusses auf das notwendige Maß oder eine belastungsabhängige Absenkung der Zwischenkreisspannung. Komplexere Verfahren sind z.B. die Optimierung der Pulse auf möglichst geringe Motorverluste.

Die Verwendung der permanent erregten Synchronmaschine als Traktionsmotor statt der heute allgemein verwendeten Asynchronmaschine bietet aufgrund der

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

geringeren Verluste eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades. Im Vergleich zur Asynchronmaschine hat die permanent erregte Synchronmaschine nur vernachlässigbare Rotorverluste. Dabei muss die Maschine auf den Anwendungsfall hin optimiert ausgelegt werden. Insbesondere ist zu beachten, dass das Feld der permanent erregten Synchronmaschine im oberen Drehzahlbereich aktiv geschwächt werden muss. Hierdurch können, je nach Betriebsweise, die Vorteile signifikant verkleinert werden.

Die Rückspeisung der Bremsenergie in das Fahrleitungsnetz ist bei modernen Fahrzeugen immer möglich. Daher sollte diese Methode immer so genutzt werden, dass die maximal mögliche Leistung zurückgespeist wird. Eine Rückspeisung der Bremsenergie ist jedoch nur möglich, wenn das Fahrleitungsnetz auch entsprechend aufnahmefähig ist. Dies bedeutet, es müssen zeitgleich zum bremsenden Fahrzeug entsprechende Abnehmer im Netz vorhanden sein, die einen Teil oder besser die gesamte Bremsleistung aufnehmen. Der nicht rückspeisefähige Anteil der Bremsenergie muss in nicht weiter nutzbare Wärme umgewandelt werden. Bei Wechselspannungsbahnen (Nennspannung 15 kV oder 25 kV) sind aufgrund der vermaschten Netze und der vergleichsweise geringen Spannungsabfälle auf der Fahrleitung nahezu immer Verbraucher vorhanden. Bei Bahnen, die mit Gleichspannung (Nennspannung 750 V, 1500 V oder 3000 V) betrieben werden, ist dies nicht immer der Fall. Zur Nutzung der Bremsenergie bietet sich hier die Möglichkeit an, mobile elektrische Energiespeicher, z.B. Doppelschicht-Kondensatoren, auf den Fahrzeugen zu installieren. Diese können dann die gesamte oder einen Teil der Bremsenergie aufnehmen und beim nächsten Anfahrvorgang wieder nutzen.

In der überwiegenden Mehrheit der heute realisierten Fahrzeuge werden zwischen dem elektrischen Traktionsmotor und den Antriebsrädern Getriebe eingefügt, die Drehzahl und Drehmoment zwischen den beiden Einheiten wandeln. Immer mal wieder wird der Vorschlag unterbreitet, die Getriebeverluste zu eliminieren, indem das Getriebe weggelassen wird. Diese Möglichkeit ist heute auch schon bei einigen Fahrzeugen realisiert. Bei diesen sogenannten getriebelosen Antrieben ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass Antriebswechselrichter und Traktionsmotor dann nicht mehr in einem so günstigen Betriebsbereich arbeiten wie mit Getriebe. Ob und unter welchen Bedingungen das Weglassen des Getriebes die Antriebsverluste reduziert, muss von Fall zu Fall eingehend untersucht werden. Getriebelose Antriebe scheinen heute aus energetischer Sicht nur mit permanent erregten Synchronmotoren sinnvoll.

Um Kosten, Platzbedarf und Gewicht klein zu halten, werden Antriebswechselrichter heute im Allgemeinen nur wenig überdimensioniert ausgelegt und häufig gut ausgenutzt betrieben. Weiterentwicklungen beim Antriebswechselrichter können auf alle Fälle zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Antriebs beitragen. Zu nennen ist hier insbesondere die Reduktion der Leit- und Schaltverluste der verwendeten Halbleiterventile. Damit können direkt die Verluste verkleinert werden oder die

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Aufwände für die Kühlung reduziert werden, um auf diese Wiese den Leistungsbedarf der Hilfsbetrieb zu reduzieren. Verringerte Halbleiterverluste können auch die Anwendung einer höheren Schaltfrequenz möglich machen, wodurch sich die Verluste im Traktionsmotor reduzieren. Eine Erhöhung der Sperrspannung der Halbleiter macht die Anwendung einer höheren Spannungsebene möglich, so dass bei gleicher Leistung die Ströme kleiner werden und so die Stromverluste sinken.

Die vor einigen Jahren aus Gründen der damals noch zu geringen Sperrfähigkeit der Halbliterventile eingeführte Dreipunktschaltung erlebt derzeit eine kleine Renaissance. Die Transformatoren und Traktionsmotoren können mit der Dreipunktschaltung mit einer idealeren Stromform gespeist werden und infolgedessen effizienter arbeiten.

Ein nicht unerheblicher Teil der Verluste eines Antriebsstranges entsteht in den notwendigen magnetischen Komponenten. Bei Gleichspannungsfahrzeugen, in der Regel Straßenbahn und U-Bahn, sind diese vor allem die Filterdrosseln und bei Wechselspannungsfahrzeugen (Regional-, Güter- und Fernverkehr) sind diese die Transformatoren. Eine Reduktion der hier entstehenden Verluste verbessert den Wirkungsgrad des gesamten Antriebssystems. Neben der technologisch wenig komplizierten Möglichkeit, den Querschnitt der elektrischen Leiter zu vergrößern, wird immer wieder auch die Anwendung supraleitenden Bauelemente erwähnt. Dabei muss der nicht unerhebliche zusätzliche Aufwand gegenüber der konventionellen Technik erwogen werden.

In eine ähnliche Richtung zielen Entwicklungen zu Mittelspannungs-Eingangsstromstellern, die direkt an der Wechselspannungsfahrleitung betrieben werden, und Mittelfrequenztransformatoren. Zum Teil sind hier schon Geräte zum Einsatz auf Versuchsfahrzeugen gebaut worden, längere Betriebserfahrungen liegen allerdings nicht vor. Aufgrund des hohen finanziellen Aufwandes, verbunden mit dem technischen Risiko, konnten sich diese Schaltungen bisher nicht durchsetzen. Inwieweit tatsächlich die Verluste reduziert werden, bedarf weiterer detaillierter Untersuchungen.

Werden die Antriebe im Teillastbereich betrieben, haben sie im Vergleich zum Volllastbereich generell hohe relative (auf den aktuellen Betriebspunkt bezogene) Verluste. Eine einfache Möglichkeit, die Antriebsverluste zu reduzieren, ist daher, einzelne Antriebsstränge im Teillastbereich abzuschalten. Die verbliebenen Antriebsstränge müssen zur Aufrechterhaltung der Fahrperformance dann selbstverständlich im höheren Lastbereich betrieben werden. Dieses Verfahren wird sich auf die Antriebsverluste günstig auswirken. Allerdings scheint es nur im Verkehr mit längeren Streckeabschnitten (Regionalverkehr, Güterverkehr und Fernverkehr) sinnvoll anwendbar.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Mit zum Antriebsstrang zählen eventuell notwendige Eingangsfilter, um Anforderungen der Netzbetreiber an die Form beziehungsweise den Oberschwingungsgehalt des Netzstromes zu erfüllen. Konventionell werden hierzu Schaltmuster der eingangsseitigen Stromrichter günstig gewählt. Reicht dies nicht aus, müssen zusätzlich passive Filter verwendet werden. Diese erhöhen das Fahrzeuggewicht und erzeugen zusätzliche Verluste. Werden dagegen die Stromrichter der Hilfsbetriebeversorgung entsprechend angesteuert und als aktive Filter betrieben, können die passiven Eingangsfilter kleiner werden oder gar ganz entfallen. Eine separate Verlustbetrachtung muss für den Einzelfall angestellt werden.

Bisweilen haben Transformator beziehungsweise Eingangsfilterdrossel, Stromrichter und Traktionsmotor jeweils eigene Kühlkreisläufe. Durch eine geschickte Zusammenlegung von Kühlkreisläufen kann der Aufwand für traktionsbedingten Hilfsbetriebe reduziert werden. Eine detaillierte Betrachtung im Einzelfall muss die Möglichkeiten und die erzielbaren Effizienzgewinne ermitteln.

4.2.2 Rückspeisefähige Triebfahrzeuge

Moderne Fahrzeuge sind aufgrund der verwendeten Antriebswechselrichter immer ohne Mehraufwand rückspeisefähig. Bei den hier vorgestellten Resultaten wird von einer optimalen Steuerung der Rückspeisung ausgegangen, d.h. es wird immer die maximal mögliche Leistung zurückgespeist.

Werden Altbaufahrzeuge durch solche mit moderner Traktionsanlage ersetzt, so verringert sich bei ansonsten gleich bleibenden Größen der Energiebedarf für die Fahrt. Die Angabe eines Einsparfaktors um einen bestimmten „Arbeitspunkt“ herum ist jedoch nicht sinnvoll, es wird hier die Einsparung des Gesamtenergiebedarfs von Fahrzeugen ohne Rückspeisung gegenüber solchen mit voller Rückspeisefähigkeit angegeben.

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparung	34%	35%	40%	16%	7%

Besonders in den beiden Nahverkehrsmodellen sowie im Regionalverkehrsmodell, bei denen die Haltestellenabstände kurz sind und demnach viele Bremsvorgänge durchgeführt werden, ist der Mehrbedarf an Energie sehr groß, wenn keine Rückspeisefähigkeit vorliegt. Im Güter- und Fernverkehr spielt die Rückspeisung eine untergeordnete Rolle in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf, da die Haltestellenabstände groß und Bremsvorgänge dementsprechend selten vorkommen.

Da die Rückspeisefähigkeit von Triebfahrzeugen heute Standard ist, wird im Folgenden nicht weiter auf diese Einflussgröße eingegangen. Lediglich die Implementierung einer rekuperativen Güterwagenbremse im Güterverkehr wird als technologische Neuerung analysiert.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.2.3 Leistungsbedarf für Hilfsbetriebe

Unter Hilfsbetrieben versteht man die Einrichtungen eines Fahrzeugs, die nicht direkt dem Antrieb dienen. Einige der Hilfsbetriebe werden für den Antrieb, z.B. für dessen Kühlung, benötigt. Die gesamte Steuerung für Antrieb und Fahrzeug bezieht beispielsweise auch ihre notwendige Leistung aus den Hilfsbetriebeumrichtern. Ein großer Teil der Hilfsbetriebeleistung dient dem Komfort für Fahrer und Fahrgäste sowie hin und wieder auch der notwendigen Behandlung der transportierten Güter während des Transportes.

Wird der Leistungsbedarf für die Hilfsbetriebe reduziert, so verringert sich der Energiebedarf für die Fahrt bei ansonsten gleich bleibenden Größen. Folglich ergibt sich für den Einsparfaktor:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Hilfsbetriebe}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs}}{\text{Reduktion der Hilfsbetriebeleistung}}$$

Da in den durchgeführten Simulationen von einer konstanten Hilfsbetriebeleistung ausgegangen wird, entspricht die Hilfsbetriebeleistung der Hilfsbetriebeenergie. Die Hilfsbetriebeleistung meint hier also nicht die installierte Leistung, sondern die durchschnittlich während der Fahrt benötigte Leistung.

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	0,25	0,15	0,18	0,07	0,05

Der Einfluss der Hilfsbetriebe- und Komfortleistung ist in den Nah- und Regionalverkehrssystemen größer als bei Fern- und Güterverkehr, weil ihr Anteil am Gesamtleistungsbedarf deutlich höher ist. Dies liegt nicht nur an den längeren Stillstandszeiten, sondern auch an der vergleichsweise niedrigen Traktionsleistung während der Beharrungsphase, wenn die Endgeschwindigkeiten niedriger sind. Letztlich ist im Fern- und im Güterverkehr der Einfluss der Hilfsbetriebe- und Komfortleistung zu vernachlässigen.

Ein nicht unerheblicher Teil der Hilfsbetriebeleistung wird für die Kühlung der Komponenten im Antriebsstrang verwendet. Es ist daher zu erwarten, dass durch eine an die Erfordernisse angepasste Drehzahl der zur Kühlung gehörigen Motoren ein signifikanter Anteil an Hilfsbetriebeenergie eingespart werden kann. Dies kann durch entsprechende drehzahlverstellbare Antriebe oder durch ein frequenzvariables Bordnetz erfolgen.

Ein weiterer großer Anteil der Hilfsbetriebeleistung wird bei Personentransport für die Temperierung beziehungsweise die Klimatisierung des Innenraumes aufgewendet. In diesem Zusammenhang sind die allgemein bekannten Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

- besser thermisch isolierte Fahrgast- und Fahrerräume
- eine an die Außentemperatur angepasste Innenraumtemperatur (umweltorientierter Temperatursollwert)
- an den Besetzungsgrad angepasste Frischluftzufuhr
- bedarfsgesteuerte Türöffnung

Darüber hinaus kann statt einer Kühlung der Raumluft lediglich eine Entfeuchtung der Luft erfolgen. Dies bietet ebenfalls einen erhöhten Komfort, wobei der Energiebedarf gegenüber der Kühlung deutlich geringer ist. Auf eine Klimatisierung könnte bei moderaten Außentemperaturen ganz verzichtet werden, ein angenehmes Innenraumklima kann über Frischluftzufuhr von außen, bei langsameren Fahrzeugen z.B. über öffenbare Fenster, erfolgen. Bei abgestellten Fahrzeugen kann ganz auf die Klimatisierung verzichtet werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die Fahrzeuge bis Einsatzbeginn auf entsprechende Temperatur gebracht werden. Eventuell muss für einige Komponenten die Frostfreiheit garantiert werden, dies könnte durch eine entsprechende Steuerung gewährleistet werden. Im abgestellten Modus können die Hilfsbetriebe auf alle Fälle mit reduzierter Drehzahl betrieben werden. Bei abgestellten Fahrzeugen sollte weiterhin die Frischluftzufuhr abgestellt und sämtliche Fenster geschlossen werden („Isolieren abgestellter Fahrzeuge“ genannt).

Durch eine entsprechende Fahrzeugsteuerung kann sichergestellt werden, dass bevorzugt während des Bremsens geheizt oder gekühlt wird. Dadurch wird gewährleistet, dass ein größerer Teil der Bremsenergie genutzt wird und dies zusätzlich noch mit möglichst geringen Übertragungsverlusten.

Die Abwärme der Traktionsanlage wird in heutigen Fahrzeugen meist ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Würde diese zur Beheizung genutzt, könnte damit der Heizenergiebedarf reduziert werden. Ebenso kann die Abluft aus den Fahrgasträumen über Wärmetauscher zur Vortemperierung der Frischluft genutzt werden, was den entsprechenden Energiebedarf gegenüber den gängigen heutigen Lösungen reduziert.

Sowohl die Innenbeleuchtung als auch Scheinwerfer und Rückleuchten beziehungsweise die Signallichter können als Leuchtstofflampe oder – mit noch höherem Wirkungsgrad – als LED ausgeführt werden. Dies wäre zwar eine nur sehr kleine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs des Fahrzeugs, allerdings ist diese mit vergleichsweise einfachen Mitteln zu erreichen.

Ein zukunftsorientierter, innovativer Ansatz ist die Verwendung von an den Klimatisierungsbedarf angepassten Fensterscheiben, die nach Bedarf Strahlungswärme der Sonne durchlassen oder reflektieren.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.2.4 Aerodynamischer Widerstand

Wird der Luftwiderstand des Zuges reduziert, so verringert sich primär der Energiebedarf für die Fahrt, aber aufgrund höherer Beschleunigung (bei gleich bleibender Zugkraft) auch die Fahrzeit. Letzteres jedoch nur in geringerem Maße, so dass dieser Effekt vernachlässigt werden kann und sich folglich für den Einsparfaktor ergibt:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Aerodynamik}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs}}{\text{Verringerung der Laufwiderstandskraft}} .$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	0,06	0,05	0,30	0,45	0,65

Bei den beiden Nahverkehrssystemen Straßenbahn und U-Bahn ist der Einfluss der Änderung des aerodynamischen Widerstandes auf den Energiebedarf am geringsten und zu vernachlässigen, weil die Aerodynamik im niedrigen Geschwindigkeitsbereich keine wesentliche Rolle spielt.

Eine Reduktion des aerodynamischen Widerstandes kann erreicht werden durch eine optimierte Kopfform, durch eine Verkleidung der Drehgestelle und der Unterflurausrüstung. Im Güterverkehr reduziert eine nach aerodynamischen Gesichtspunkten gestaltete Zugbildung den Luftwiderstand. Ebenso verkleinert eine Abdeckung der offenen Güterwagen den Luftwiderstand beträchtlich.

4.2.5 Leermasse des Zuges

Wird die Leermasse des Zuges reduziert, so verringert sich primär der Energiebedarf für die Fahrt, aber aufgrund höherer Beschleunigung (bei gleich bleibender Zugkraft) auch die Fahrzeit. Letzteres jedoch nur in geringerem Maße, so dass dieser Effekt vernachlässigt werden kann und sich folglich für den Einsparfaktor ergibt:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Leermasse}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs}}{\text{Verringerung der Leermasse}} .$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	0,71	0,60	0,66	0,46	0,11

Grundsätzlich ist eine Umsetzung von Masseeinsparungen in allen Fällen vorteilhaft, und zwar um so mehr, je häufiger die Züge verlustbehaftet beschleunigt und abgebremst werden müssen. Zusätzlich kann die durch das höhere Beschleunigungsvermögen gewonnene Fahrzeit für weitere Energiesparmaßnahmen genutzt werden. Im Fernverkehr liegt hierin sogar der wesentliche Vorteil, und nicht in der primären Reduzierung des Energiebedarfs für einen Fahrzyklus.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Die Fahrzeuge werden schon immer auf eine geringe Masse hin entwickelt. Die Möglichkeiten zu einer weiteren Reduktion scheinen gering. Eine Reduktion der Masse kann nur durch die Betrachtung und Optimierung in bezug auf Masse aller einzelner Bauteile erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass eine Massereduktion nicht kontraproduktiv in Bezug auf den Energieverbrauch ist. Beispiel: die Reduktion der Kabelquerschnitte reduziert die Fahrzeugmasse, erhöht dagegen die Verluste.

Mögliche Massereduktionen lassen sich prinzipiell in zwei Anwendungsbereiche kategorisieren, deren erster die tragenden Strukturen (Wagenkästen bzw. Untergestelle) betrifft. Hier kann man hochfeste Stähle nennen, Faserverbundwerkstoffe oder die Aluminium-Integralbauweise.

- Der zweite Bereich betrifft den Innenausbau der Züge, unter anderem Sandwichpanels
- Gewichtsoptimierte Bestuhlung. Die Bestuhlung hat bei Fahrzeugen für die Personenbeförderung einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtmasse des Fahrzeugs. Die diesbezügliche Optimierung einer einzigen Komponente hätte aufgrund ihrer großen Anzahl in einem Fahrzeug vermutlich einen deutlichen Einfluss auf die Fahrzeugmasse.
- Gewichtsreduzierte Verkabelung. Dies kann z.B. erreicht werden durch knappe Auslegung des Querschnitts auf die tatsächliche Belastung hin. Hier muss dann allerdings geprüft werden, ob der Gewinn durch die Gewichtsreduktion nicht durch die zusätzlichen Verluste aufgezehrt wird. Eine andere Möglichkeit zur Gewichtsreduktion ist die Anwendung von Aluminium-Kabeln statt Kupfer-Kabeln. Hierbei wären dann allerdings noch andere praktische Gesichtspunkte, z.B. Anschlusstechnik, zu klären.

4.3 Betriebliche Maßnahmen

Betriebliche Maßnahmen zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs sind sicherlich die technologisch unkompliziertesten. Mit rein planerischen Maßnahmen kann der Energieverbrauch beeinflusst werden. Die Maßnahmen Fahrzeitverlängerung, Verzicht auf Halt und Beseitigung von Störstellen werden im Folgenden betrachtet.

4.3.1 Fahrzeitverlängerung, Nutzung des Zeitrückhalts

Im realen Eisenbahnbetrieb wird bei der Fahrplanerstellung eine Reserve eingeplant. Sie stellt die Differenz zwischen der kürzesten und der geplanten Fahrzeit dar, wird prozentual linear auf die reine Fahrzeit aufgeschlagen und dient dem Ausgleich von Störungen, die auf die Zugfahrt einwirken. Wird diese von keinen Störungen beeinflusst, die das Verzehren der Fahrplanreserve nötig machen, steht dem System diese Zeit zur Energieeinsparung zur Verfügung. Dies kann durch Einlegen von Auslaufphasen oder eine Herabsetzung der Maximalgeschwindigkeit umgesetzt werden, bis der Zeitrückhalt aufgebraucht ist und die Zugfahrt pünktlich ihr Ziel erreicht.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

In den Auslaufphasen wird keine Zugkraft mehr vom Schienenfahrzeug aufgebracht, so dass sich entsprechend des aktuellen Fahrwiderstandes eine Verzögerung einstellt und die Geschwindigkeit verringert wird. Während der Auslaufphasen müssen lediglich die Hilfsbetriebe- und Komfortleistung aus der Fahrleitung gedeckt werden.

Betrachtet man die Absenkung der Geschwindigkeit, so führt dies primär zu einer Verringerung der Bewegungsenergie, und weiterhin zu einer Verminderung der Laufwiderstandskraft. Dies bedeutet eine Reduktion der erforderlichen Leistung am Rad und folglich eine zusätzliche Reduktion des Energiebedarfs.

Für den Einsparfaktor ergibt sich in beiden Fällen:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Fahrzeit}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs}}{\text{Verlängerung der Fahrzeit}} .$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	1,93	3,38	4,82	1,05	1,42

Zu beachten ist, dass der Zusammenhang nichtlinear ist und die Ergebnisse für den Einsparfaktor entsprechend über die simulierte Bandbreite gemittelt wurden. Der Effekt ist für alle Verkehrsarten sehr stark und dort am meisten ausgeprägt, wo viele Fahrzyklen auf relativ hohem Geschwindigkeitsniveau durchgeführt werden: im Regionalverkehr. Die Nutzung des Zeitrückhaltes kann unterstützt werden durch entsprechende Fahrerschulung, ein Fahrerassistenzsystem oder gar ein automatisiertes Fahren.

4.3.2 Verzicht auf Haltestellen

Durch den Verzicht auf einen planmäßigen Halt wird ein Brems- und Beschleunigungszyklus ausgelassen und der durchschnittliche Haltestellenabstand vergrößert. Mit dieser Variation reduziert sich neben dem Energiebedarf in erheblichem Maße die Fahrzeit. Dies wird unter Einbeziehung der Ergebnisse des vorhergehenden Abschnitts für eine zusätzliche Reduktion des Energiebedarfs genutzt.

Folglich ergibt sich für den Einsparfaktor:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Haltverzicht}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs}\,[\text{inkl. Fahrzeitreduktion} * \text{Einsparfaktor}_{\text{Fahrzeit}}]}{\text{Verringerung der Anzahl der Haltestellen}}$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	2,17	2,69	1,92	0,09	0,19

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Für den Güter- und Fernverkehr ist diese Maßnahme energetisch uninteressant, weil der Energiebedarf durch lange Beharrungsfahrten bestimmt wird. Dagegen lohnt sie sich besonders, wenn – wie im Nah- und Regionalverkehr – der Energiebedarf von Anzahl und Art der Fahrzyklen geprägt ist.

Um die Akzeptanz des öffentlichen Verkehrs zu erhalten, kann es kontraproduktiv sein, Haltestellen generell nicht mehr zu bedienen. Bei wenig frequentierten Haltestellen oder in Zeiten mit wenigen Fahrgästen bietet der „Halt auf Verlangen“ beziehungsweise der Bedarfshalt eine gute Lösung.

4.3.3 Reduktion von Störstellen

Der Bahnbetrieb ist häufig von Störungen betroffen, die dazu führen, dass außerplanmäßige Halte eingeführt oder Geschwindigkeiten temporär herabgesetzt werden müssen. Dadurch sind zusätzliche Verzögerungs- und Beschleunigungsphasen erforderlich mit entsprechenden Rückwirkungen auf den Energiebedarf und die Fahrzeit. In den durchgeführten Variationssimulationen wurden kurzzeitige Unstetigkeiten im Fahrprofil mit verschiedenen begrenzten Geschwindigkeitseinschränkungen untersucht.

Der Einsparfaktor wird wie folgt ermittelt:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Störstellen}} = \frac{\text{E}\textit{rhöhung des Gesamt} - \text{Energiebedarfs [inkl. Fahrzeitverlängerung} * \text{Einsparfaktor}_{\text{Fahrzeit}}]}{\text{Erhöhung der Fahrzyklenzahl}}$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	0,78	-	1,13	0,01	0,06

Weil der prinzipielle Zusammenhang und somit auch die Berechnung des Einsparfaktors gegenüber dem vorangegangenen Abschnitt lediglich invertiert wurden, ergibt sich hier auch das gleiche Bild: Verkehre mit vielen Fahrzyklen „leiden“ energetisch überproportional an Störungen in der Disposition. Für den U-Bahn-Betrieb mit separatem Bahnkörper ohne gemischte Verkehre stellt sich die Frage nicht.

Störstellen können nicht ohne weiteres beseitigt werden. Allerdings kann ihre Auswirkung auf den Energieverbrauch durch Maßnahmen wie Nutzung von Fahrerassistenzsystemen, Vorrangschaltung bei Straßenbahnen sowie geeignete Disposition im Regional-, Güter- und Fernverkehr minimiert werden.

4.4 Optimierung der Infrastruktur

Die Infrastruktur hat ebenfalls Einfluss auf den Energieverbrauch des schienegebundenen Verkehrs. Die Energieerzeugung, die Art und Weise der Energieverteilung und bei Tunneln dessen Bauart werden im Folgenden untersucht.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.4.1 Energieerzeugung

Der Gesamtwirkungsgrad des Energiemixes für die Bahnstromerzeugung betrug für das Jahr 2007 rund 32%. Dieser Wirkungsgrad enthält neben der Umwandlung der Energie in den Kraftwerken (Teilwirkungsgrad von rund 38%) zusätzlich die Primärenergieförderung und den Transport zum Kraftwerk (Teilwirkungsgrad von rund 94%) sowie die Umformungs- und Leitungsverluste vom Kraftwerk bis zum Stromabnehmer (Teilwirkungsgrad von rund 93%). Für die öffentliche Stromerzeugung sind diese Wirkungsgrade ähnlich, so dass für alle Verkehrsarten mit gleichen Daten gerechnet werden kann[4].

Werden die Verluste in der Energieversorgung reduziert, bedeutet dies einen geringeren Primärenergiebedarf für die gleiche Verkehrsleistung, die einen gewissen Energiebedarf am Stromabnehmer bedingt. Beim deutschen Strommix entsteht für jede generierte Kilowattstunde elektrischer Energie etwa die doppelte Menge an Verlusten. Eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades hat also erheblichen Einfluss auf den Primärenergiebedarf.

4.4.2 Energieverteilung

Zur energetischen Optimierung der Energieverteilung werden die folgenden Optionen betrachtet:

- rückspeisefähige Unterwerke ↔ nicht rückspeisefähige Unterwerke
- zweiseitige Speisung der Fahrleitung↔ einseitige Speisung der Fahrleitung
- Bauart 1 der Fahrleitung ↔ Bauart 2 der Fahrleitung

Eine Parametervariation kann hier nicht stattfinden. Entweder ist ein Unterwerk rückspeisefähig oder nicht. Es wird hier lediglich die Energieeinsparung der veränderten Konfiguration gegenüber der Basissimulation angegeben.

Für die Betrachtung rückspeisefähige Unterwerke versus nicht rückspeisefähige Unterwerke wird die Energieeinsparung nach

$$\text{Einsparung}_{\text{Rückspeisung}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs bei rückspeisefähigen Unterwerken}}{\text{Energiebedarf bei nicht rückspeisefähigen Unterwerken}}$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparung	24%	35%	-	-	-

[4] In Deutschland wird der Fern-, Güter- und Regionalverkehr und z.T. auch der S-Bahnverkehr zu großen Teilen aus Kraftwerken gespeist, die direkt an das Bahnstromnetz angeschlossen sind. Dagegen werden U-Bahn und Straßenbahnverkehr aus dem öffentlichen Netz der allgemeinen Versorgung gespeist.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Da im Regional-, Güter- und Fernverkehr die Unterwerke ohnehin rückspeisefähig sind und immer von einer Abnahme der Bremsenergie ausgegangen werden kann, sind diese Verkehre hier nicht betrachtet worden. Die im Vergleich zur Straßenbahn höhere Einsparung bei der U-Bahn ergibt sich aus der hoch angesetzten Streckenlänge mit vergleichsweise wenigen Fahrzeugen, so dass in den Außenbezirken wenig Bremsenergie von anderen Fahrzeugen aufgenommen werden kann.

Rückspeisefähige Unterwerke können aufgebaut sein als

- ein zum Einspeise-Diodengleichrichter zusätzlicher, nur für die Rückspeisung genutzter Wechselrichter,
- ein stellbarer Gleichrichter, sowohl für die Einspeisung als auch für die Rückspeisung,
- einen im Unterwerk integrierten Energiespeicher zur Aufnahme der überschüssigen Bremsenergie,
- oder einen Umkehrstromrichter.

Betrachtet man die zweiseitige gegenüber der einseitigen Speisung der Fahrleitung, ergibt sich die Energieeinsparung nach

$$\text{Einsparung}_{\text{Einspeisung}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs bei einseitiger Speisung}}{\text{Energiebedarf bei zweiseitiger Speisung}}$$

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparung	24%	31%	-	-	-

Bei Wechselspannungsfahrleitungen sind die Verluste in der Fahrleitung aufgrund der hohen Spannung verhältnismäßig klein. Eine Untersuchung der Einspeiseart kann daher für den Regional-, den Güter- und den Fernverkehr entfallen.

Bei der Übertragung von Elektroenergie vom Unterwerk zum Fahrzeug entstehen entsprechend des Wirkwiderstandes der Fahrleitung und des fließenden Stromes Verluste. Bei der Einflussgröße Fahrleitung wird untersucht, wie sich eine Änderung der Oberleitungsanlage auf die abgegebene Energie der Unterwerke auswirkt. Dafür werden die Widerstandsverhältnisse der Fahrleitungsbauart verändert.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Folgende Fahrleitungen wurden für die Simulationen der einzelnen Verkehrsarten angenommen:

Tabelle 4: Angenommene Oberleitungsbauarten für die verschiedenen Verkehrsarten

Fahrleitungstyp	Basis-Simulation	Variation
Straßenbahn: Kettenwerk	Fahrdraht Ri100[5] mit Tragseil Bz II 95[6]	Fahrdraht Ri120 mit Tragseil Bz II 150
U-Bahn: Stromschiene[7]	Querschnitt: 5100 mm^2	Querschnitt: 2100 mm^2
Regionalverkehr: Re 200	Ri100 + Bz II 50	Ri120 + Bz II 120
Güterverkehr: Re 200	Ri100 + Bz II 50	Ri120 + Bz II 120
Fernverkehr: Re 330	RiM120 + Bz II 120 mit Verstärkung Al 240 mm^2	RiM120 + Bz II 120 mit Verstärkung Al 480 mm^2

Für die Einsparung bei verbesserter Fahrleitung ergibt sich

$$\text{Einsparung}_{\text{Fahrleitung}} = \frac{\text{Reduktion des Gesamt} - \text{Energiebedarfs bei verbesserter Fahrleitung}}{\text{Energiebedarf bei Basissimulation}}$$

Folgende Werte ergeben sich:

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparung	1,0%	4,6%	0,7%	1,1%	0,8%

Lediglich im U-Bahn-Bereich kann durch Verwendung unterschiedlicher Bauarten von Stromschienen ein nennenswerter Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf nachgewiesen werden; „klassische“ Oberleitungen unterscheiden sich diesbezüglich nicht entscheidend.

[5] Ri100: Kupfer-Fahrdraht mit 100 mm^2 Querschnitt

[6] Bz II 95: Bronze-Tragseil mit 95 mm^2 Querschnitt

[7] Im Basisszenario der U-Bahn ist eine Aluminiumverbundstromschiene mit einem Querschnitt von 5100mm^2 angenommen worden. Dies stellt bereits eine optimale Stromschiene dar, daher wurde in der Variation eine Aluminiumverbundstromschiene mit Hohlprofil und einem deutlich kleineren Querschnitt untersucht. Für die Berechnung der Einsparung mussten folglich die errechneten Gesamt-Energiebedarfe vertauscht werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.4.3 Tunnelbauart

Bei der Fahrt im Tunnel erhöht sich die Laufwiderstandskraft durch den wirkenden Tunnelwiderstand, der insbesondere vom Versperrungskoeffizient (Verhältnis zwischen Fahrzeugquerfläche und Tunnelquerschnitt) sowie der Tunnelauskleidung beeinflusst wird. Diese Größen lassen sich zum sogenannten Tunnelfaktor zusammenfassen, der mit dem Koeffizienten für den Luftwiderstand multipliziert wird.

Neben einer Variation dieses Tunnelfaktors muss für die Ermittlung eines durchschnittlichen Einsparfaktors aber auch die Tunnellänge in einem realistischen Rahmen (2-20% der Gesamtstrecke) variiert werden, so dass folgende Beziehung gilt:

$$\text{Einsparfaktor}_{\text{Tunnel}} = \frac{\text{Reduktion des Pr}\textit{imäre}\text{nergiebedarfs [für verschiedene Streckenanteile im Tunnel]}}{\text{Verringerung des Tunnelfaktors}}$$

Es ergeben sich die folgenden Werte:

Verkehrsart	Straßenbahn	U-Bahn	Regionalverkehr	Güterverkehr	Fernverkehr
Einsparfaktor	-	0,07	0,05	0,07	0,05

Für die Straßenbahn wurde keine Variation ermittelt, da der Einfluss der Aerodynamik auf den Gesamtenergiebedarf aufgrund der vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeiten ohnehin gering ist (siehe Abschnitt 4.2.4). Auch für die U-Bahn ist anzumerken, dass (städte-)bauliche Aspekte bei der Ausführung und Gestaltung der Tunnelstrecken immer Vorrang haben werden. Selbst bei Verkehrsarten mit hohem aerodynamischen Einfluss spielt der Tunnelfaktor aber nur eine sehr untergeordnete Rolle.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.5 Einflussgrößen geringerer Bedeutung

Den in Kap.3.7 genannten Einflussgrößen mit einer Gewichtung kleiner 1,5 wird eine geringe Bedeutung in bezug auf den Energiebedarf zugemessen. Bei einigen Einflussgrößen ist dies sofort einsichtig. Auf andere Einflussgrößen wird im folgenden kurz eingegangen.

4.5.1 Energiespeicher

Der Einsatz von elektrischen Energiespeichern an Bord des Fahrzeugs lohnt sich besonders, wenn häufige Beschleunigungs- und Bremsprozesse einander abwechseln. Dies gilt vorrangig für den Nahverkehr. Die Energieeffizienz der Fahrzeuge mit bordeigenem Energiespeicher im Vergleich zu Fahrzeugen ohne hängt hauptsächlich von der Fähigkeit des Fahrleitungsnetzes ab, die Bremsenergie der Fahrzeuge aufzunehmen. Kann die Bremsenergie nicht an andere Fahrzeuge im Netz weitergeleitet werden, muss sie auf dem bremsenden Fahrzeug in nicht weiter nutzbare Wärme umgewandelt werden. Die Masseerhöhung der Fahrzeuge durch die bordeigenen Energiespeicher wirkt sich nur untergeordnet auf ihre Energieeffizienz aus, da die Fahrwiderstände fast unabhängig von der Masse sind und die Antriebe die einmal erzeugte kinetische Energie als Bremsenergie mit recht hohem Wirkungsgrad zurückgewinnen (siehe auch Kap 4.2.5).

Es wird die Aufgabe der nächsten Jahre sein, nicht nur die prinzipielle Eignung der Speichersysteme zu zeigen, sondern durch geeignete Forschungsvorhaben die Energieeffizienz und weitere Vorteile der bordeigenen elektrischen Energiespeicherung zu ermitteln und zu bewerten.

4.5.2 Neigungswiderstand

Die Neigung der Fahrstrecke hat einen Einfluss auf den Fahrwiderstand und damit auf den aktuellen Leistungsbedarf des Fahrzeugs. Da Strecken in der Realität in Hin- und Rückrichtung befahren werden, ist das Energieniveau eines Schienenfahrzeuges am Ende eines Umlaufes genauso groß wie am Anfang. Die gewonnene potentielle Energie durch Überwinden eines Höhenunterschiedes bei der Bergfahrt, wird bei der Talfahrt wieder freigesetzt.

Für übliche Streckenneigungen wurden ebenfalls Simulationen mit Variation der Neigung durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Energiebedarf nur sehr geringfügig von der Neigung abhängt. Aus diesem Grund wird hier auf eine weitere Betrachtung dieser Einflussgröße verzichtet. Zudem muss auch festgehalten werden, dass die Streckenneigung nur mit immens hohem Investitionsaufwand geändert werden kann.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

4.5.3 Bogenwiderstand

Der Einfluss des Bogenwiderstandes auf den Energiebedarf wurde untersucht. Er ist in den Systemen Straßenbahn sowie im Fernverkehr zu vernachlässigen. Selbst wenn die Fernverkehrsstrecke vollständig aus einem Bogen mit Radius von 3000m bestünde, läge der Mehrbedarf an elektrischer Energie mit 0,7% im zu vernachlässigbaren Bereich.

In der U-Bahn, im Regional- und Güterverkehr ist der Energiemehrbedarf etwas signifikanter, allerdings nur, wenn recht kleine Bögen in einem großen Anteil der Strecke angenommen werden. Somit ist der Einfluss von Bögen auf den Energiebedarf nur bei sehr bogenreichen Strecken näher zu untersuchen.

Wie bei der Streckenneigung ist auch eine Änderung des Bogens nur unter sehr hohem Investitionsaufwand möglich.

4.5.4 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand ist bei Schienenfahrzeugen aufgrund des harten Rad-Schienekontaktes sehr gering. Selbst eine vergleichsweise große Variation dieses des derzeit technisch machbaren Rollwiderstandes führt nur zu geringfügig kleinen Änderungen der Energieaufnahme.

4.5.5 Rotierende Massen

Die rotierende Masse muss beim Anfahren des Fahrzeuges beschleunigt werden, beim Bremsen des Fahrzeuges verzögert. Sie wirkt sich wie eine scheinbare Erhöhung der Fahrzeugmasse aus. Der Einfluss auf den Energiebedarf ist selbst bei Nahverkehrsfahrzeugen, die sehr häufige Anfahr- und Bremsvorgänge haben, nahezu vernachlässigbar. Daher kann auf eine weitere Betrachtung verzichtet werden, zumal auch eine Reduktion der rotierenden Masse mit hohem technischen und auch kommerziellen Aufwand verbunden sein dürfte.

4.5.6 Haltezeiten

Haltezeiten im Personenverkehr dienen dem Fahrgastwechsel, die Haltezeiten sind daher vordefiniert im Fahrplan mit berücksichtigt, sie beruhen auf Erfahrungen. Eine Reduktion der Haltezeit wirkt sich wie ein vergrößerter Zeitrückhalt aus, der sich aufgrund der möglichen Reduktion der Maximalgeschwindigkeit positiv auf den Energieverbrauch auswirkt. Daher sollte die Haltezeit immer knapp aber dennoch ausreichend ausgelegt werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5 Bewertung

5.1 Verfahren

Für die weitere Analyse wurde ein Bewertungssystem eingeführt, das eine Priorisierung der untersuchten Innovationen hinsichtlich ihrer Umsetzung vornimmt. Dabei wurde grundsätzlich so verfahren, dass Maßnahmen mit dem größten Nutzen und dem geringsten Aufwand (bzw. der kürzesten Realisierungszeit) ganz oben auf die Prioritätenliste kommen.

Bei der Bewertung der Maßnahmen sollen die Kriterien

- Aufwand für die Umsetzung und
- Energieeinsparpotenzial

eine herausragende Rolle spielen. Da für die meisten hier betrachteten Innovationen jedoch keine exakten quantitativen Aufwandsbewertungen vorliegen, wurde von den beteiligten Fachleuten eine vereinfachte Nutzwertanalyse durchgeführt. Mit der Nutzwertanalyse (NWA - auch „Punktwertverfahren“) werden Handlungsmöglichkeiten bewertet, die auch nicht exakt monetär oder quantitativ messbare Kriterien einschließen. Dadurch ergibt sich eine relativ g**r**obe Bewertungsskala, die durch unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Kriterien noch etwas nivelliert werden kann. Mit Blick auf das Ziel der Prioritätenliste ist diese grobe Bewertung aber ausreichend, da eine Orientierung gegeben werden soll, welche Maßnahmen in Summe aller Kriterien das größte Umsetzungspotenzial bieten.

Für die Nutzwertanalyse wurden die folgenden **vier Kriterien** definiert:

- Realisierungszeitraum
- Investitions- bzw. Entwicklungsbedarf
- Energiesparpotenzial „Einsparfaktor“ (ermittelt jeweils für eine Gruppe von Einzelmaßnahmen)
- Technologisches Potenzial (Anteil der Einzelmaßnahme an der Einflussgröße)

Jede Maßnahme zur Reduzierung des Energiebedarfes wurde in allen o.g. Kriterien mit einem dreistufigen Punktesystem (P = 1 / 2 oder 3) bewertet. Der höchste Punktwert P = 3 wurde jeweils für Maßnahmen mit geringem Umsetzungsaufwand bzw. mit großem Einfluss auf die Energieeinsparung vergeben. Um die unterschiedliche Bedeutung der vier Bewertungskriterien zu nivellieren, wurde zusätzlich eine Gewichtung vorgenommen. Dabei wird der pro Kriterium x vergebene Punktwert P_x mit einem Gewichtungsfaktor G_x des Kriteriums multipliziert. Aus den gewichteten Einzelbewertungen (P_x * G_x) wird anschließend pro Maßnahme ein Summenwert S gebildet. Dieser Summenwert wird in einen normierten Wert umgerechnet, so dass

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

sich bei einer ausschließlichen Bewertung aller Kriterien mit 3 Punkten eine Maximalbewertungszahl von 100 ergibt.

$$S_n = S * \frac{100}{3}$$

S_n normierter Summenwert
S Summenwert
$\frac{100}{3}$ Normierungsfaktor für eine Maximalpunktzahl von 100

Nachstehende Tabelle 5 gibt nochmals einen Überblick über die Kriterien, die Punktwerte und die Gewichtung des Bewertungssystems.

Tabelle 5: Bewertungssystem der Nutzwertanalyse

Nr.	Kriterien	Punktwerte			Gewicht
		3	2	1	%
1	Realisierungszeitraum	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	15
2	Investitionsbedarf	gering	mittel	hoch	35
3	Energieeinsparpotenzial	hoch	mittel	gering	25
4	Technologisches Potenzial	groß	mittel	gering	25
	Summe				100

Die ermittelten Ergebnisse werden in Kapitel 5.3 nach den (normierten End-)Werten S_n absteigend sortiert und in drei Bereiche farblich unterteilt:

- Grün (>70): vorrangig zu verfolgen
- Gelb: Maßnahmen mit Stärken und Schwächen (im Einzelfall zu untersuchen)
- Rot (<60): niedrigere Priorität (unter heutigen Randbedingungen)

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.2 Erläuterungen zu den Bewertungskriterien

5.2.1 Realisierungszeitraum

Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um Energieeffizienz und Klimaschutz im Verkehrssektor sollten die Maßnahmen zur Energieeinsparung in einem absehbaren Zeitrahmen umsetzbar sein, da politische Entscheidungen über Förderung und Unterstützung für kurz- bis mittelfristige Zeiträume getroffen werden.

Kurzfristig umsetzbare Maßnahmen wurden deshalb hoch bewertet, langfristige niedrig. Dabei gilt: kurzfristige Maßnahmen sind nachrüstbare Technologien, mittelfristige Maßnahmen können in der nächsten Generation von Fahrzeugen oder Anlagen umgesetzt werden, langfristige Maßnahmen werden frühestens in der übernächsten Generation von Fahrzeugen oder Anlagen erwartet.

Das Kriterium Realisierungszeitraum wird mit nur 15 % unterproportional gewichtet. Dies soll bewirken, dass Maßnahmen mit hohem Energieeinsparpotenzial, aber erst langfristiger Entwicklungsperspektive nicht aus dem oberen Bereich der Prioritätenliste verdrängt werden.

5.2.2 Investitionsbedarf

Hiermit wird der Aufwand für den Betreiber in Form von Investitionen oder Entwicklungsaufwendungen gekennzeichnet. Eine exakte quantitative Bezifferung des Aufwandes ist hier nicht möglich und auch nicht zielführend, da Preise nicht nur vom Material- und Entwicklungswert, sondern auch von der jeweiligen Marktsituation, den Stückzahlen usw. abhängen. Mit diesem Kriterium soll eine Größenordnung abgeschätzt werden, die den finanziellen Aufwand einer Maßnahme im Vergleich zu den anderen Maßnahmen abbildet.

Das Kriterium erhält eine hohe Gewichtung von 35 %.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.2.3 Energieeinsparpotenzial

Basierend auf den Simulationsergebnissen wurde das Energiesparpotenzial mit hoch, mittel und gering bewertet. Sofern das Energiesparpotenzial bei der Simulation als Einsparfaktor E (Gradient) ermittelt werden konnte, gilt folgende Bewertung:

$E < 0{,}3$	→	gering (1)
$0{,}3 \leq E < 0{,}75$	→	mittel (2)
$0{,}75 \leq E$	→	hoch (3)

Liegt das Potenzial einer Energieeinsparung als Prozentwert $E_{\%}$ vor, wird es wie folgt bewertet:

$E_{\%} \leq 3\%$	→	gering (1)
$3\% < E_{\%} < 10\%$	→	mittel (2)
$10\% \leq E_{\%}$	→	hoch (3)

Das Energieeinsparpotenzial wird als zweites wesentliches Kriterium mit 25 % gewichtet.

5.2.4 Technologisches Potenzial

Dieses Kriterium soll korrigierend wirken, wenn es mehrere technische Möglichkeiten gibt, die zur Energieeinsparung in der gleichen Kategorie beitragen können.

Ein Beispiel: Die Verbesserung des Antriebswirkungsgrades (d.h. Reduzierung der Verluste) könnte sowohl durch den Einsatz eines supraleitenden Transformators als auch durch das Abschalten paralleler Antriebstränge im Teillastbetrieb erreicht werden. In der Simulation wurde das energetische Potenzial der Wirkungsgrad-verbesserung des Antriebs technologieneutral ermittelt, d.h. ohne dabei schon eine konkrete technische Umsetzung zu unterstellen. Bei o.g. Beispiel hat der supra-leitende Transformator jedoch ein wesentlich höheres Potenzial zur Wirkungsgrad-verbesserung als die Teilabschaltung, daher kann sein technologisches Potenzial über dieses Kriterium höher bewertet werden. Somit ergibt sich eine zusätzliche Abstufung für unterschiedliche technische Maßnahmen, die dem gleichen energetischen Ziel dienen.

Das Kriterium wird mit 25 % gewichtet.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.3 Nutzwertanalyse

5.3.1 Fernverkehr

Tabelle 6: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Fernverkehr

Technologie		Realisierungs-zeitraum	Investitions-bedarf	Energieeinsparpot. "Einsparfaktor"	Technologisches Potenzial	Normierter Endwert
Nutzung Zeitrückhalt	Fahrerschulung/-assistenz	3	2	3	2	80
Verringerung Maximalgeschwindigkeit	um 30 km/h	3	2	3	2	80
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Temperatursollwert umweltorientiert	3	3	1	2	75
Aerodynamischer Widerstand	aerodynamisch optimierte Kopfform	2	2	2	2	67
Traktionswirkungsgrad	Stromrichter-Steuerverfahren	3	3	1	1	67
Traktionswirkungsgrad	max. elektrische Bremse	3	3	1	1	67
Traktionswirkungsgrad	Abschalten paralleler Antriebstränge	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	LED-Beleuchtung	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	bessere Isolation Fahrgastraum	2	2	1	3	67
Traktionswirkungsgrad	Permanentmagnet-Synchronmotor	3	2	1	2	63
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Hilfsbetriebe drehzahlvariabel (stufenlos)	3	2	1	2	63
Störstellenreduktion	geeignete Disposition	3	2	1	2	63
Leermasse	hochfeste Stahlrahmen-Integralbauweise	2	2	1	2	58
Störstellenreduktion	betriebliche Fahrerassistenzsysteme	2	2	1	2	58

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Leermasse	Aluminium-Integralbauweise	3	2	1	1	55
Leermasse	gewichtsoptimierte Bestuhlung	3	2	1	1	55
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Innenbeleuchtung neue Lampen	3	2	1	1	55
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Abwärme/ Bremsenergie zum Heizen	2	1	1	3	55
Traktionswirkungsgrad	Weiterentwicklung Motorstromrichter	2	2	1	1	50
Traktionswirkungsgrad	aktive Filter (Hilfsbetriebe-Umrichter)	2	2	1	1	50
Traktionswirkungsgrad	supraleitender Trafo	1	1	1	3	50
Leermasse	leichte Verkabelung	2	2	1	1	50
Leermasse	Faserverbund-Komplettaufbau	1	1	1	3	50
Leermasse	Sandwich-Innenausbau	2	2	1	1	50
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Wärmetauscher	2	1	1	2	47
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Anpassung Scheibe an Klimabedarf	1	1	1	2	42

Alle Maßnahmen, die auf eine Verringerung des aerodynamischen Fahrwiderstandes zielen, sind bedeutsam:

- einerseits eine Reduktion der Höchstgeschwindigkeit im Rahmen der betrieblichen Freiheitsgrade,
- andererseits die Optimierung der äußeren Gestaltung des Triebzuges.

Es folgen fahrzeugseitige Maßnahmen zur Reduktion von Verlusten und des Energiebedarfs der Hilfsbetriebe:

- Intelligente Steuerverfahren für die Leistungselektronik (insbesondere Antrieb und Klimatisierung)
- Einsatz von verfügbaren Komponenten mit besserem Wirkungsgrad (LED-Beleuchtung, Permanentmagnet-Motoren)

Zusätzlicher Leichtbau und andere Innovationen mit hohem Entwicklungsbedarf sind von untergeordneter Bedeutung.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.3.2 Güterverkehr

Tabelle 7: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Güterverkehr

Technologie		Realisierungs-zeitraum	Investitions-bedarf	Energieeinsparpot. "Einsparfaktor"	Technologisches Potenzial	Normierter Endwert
Verringerung Maximalgeschwindigkeit	um 10 km/h	3	2	3	2	80
Aerodynamischer Widerstand	Drehgestellverkleidung	2	2	2	3	75
Aerodynamischer Widerstand	Abdeckung offener Wagen	2	2	2	2	67
Traktionswirkungsgrad	Stromrichter-Steuerverfahren	3	3	1	1	67
Traktionswirkungsgrad	max. elektrische Bremse	3	3	1	1	67
Traktionswirkungsgrad	Abschalten paralleler Antriebstränge	3	3	1	1	67
Rückspeisefähiges Fahrzeug	rekuperative Güterwagenbremse	1	1	3	3	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	LED- Beleuchtung	3	3	1	1	67
Traktionswirkungsgrad	Permanentmagnet-Synchronmotor	3	2	1	2	63
Aerodynamischer Widerstand	aerodynamische Zugbildung	2	1	2	3	63
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Hilfsbetriebe drehzahlvariabel (stufenlos)	3	2	1	2	63
Störstellenreduktion	geeignete Disposition	3	2	1	2	63

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Leermasse	hochfester Stahlrahmen der Wagen	2	2	2	1	58
Aerodynamischer Widerstand	aerodynamisch optimierte Kopfform	2	2	2	1	58
Störstellenreduktion	betriebliche Fahrerassistenzsysteme	2	2	1	2	58
Traktionswirkungsgrad	Weiterentwicklung Motorstromrichter	2	2	1	1	50
Traktionswirkungsgrad	aktive Filter (Hilfsbetriebe-Umrichter)	2	2	1	1	50
Traktionswirkungsgrad	supraleitender Trafo	1	1	1	3	50

Aufgrund der ebenfalls langen Beharrungsphasen ist das Bild ähnlich wie im Fernverkehr.

Schwerpunktmäßig sollte der Traktionsenergiebedarf reduziert werden, und zwar

- vorrangig durch eine Verringerung der Höchstgeschwindigkeit,
- nachfolgend durch eine Verbesserung der Aerodynamik des Zuges,
- weiterhin durch eine Reduktion der Umwandlungsverluste im Antriebsstrang der Lok, und
- schließlich durch eine verbesserte Rekuperation beim Bremsen.

Betriebliche Aspekte sowie aufwändige neue Technologien haben eine geringere Bedeutung.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.3.3 Regionalverkehr

Tabelle 8: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Regionalverkehr

Technologie		Realisierungs-zeitraum	Investitions-bedarf	Energieeinsparpot. "Einsparfaktor"	Technologisches Potenzial	Normierter Endwert
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Temperatursollwert umweltorientiert	3	3	1	3	83
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Bedarfsgesteuerte Türöffnung	3	3	1	3	83
Nutzung Zeitrückhalt	Fahrerschulung/-assistenz	3	2	3	2	80
Störstellenreduktion	geeignete Disposition	3	2	3	2	80
Verringerung Maximalgeschwindigkeit	um 20 km/h	3	2	3	2	80
Traktionswirkungsgrad	Stromrichter-Steuerverfahren	3	3	2	1	75
Traktionswirkungsgrad	max. elektrische Bremse	3	3	2	1	75
Traktionswirkungsgrad	Abschalten paralleler Antriebstränge	3	3	2	1	75
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	keine Klimatisierung bei Abstellung	3	3	1	2	75
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Hilfsbetriebe in Parkstellung	3	3	1	2	75
Aerodynamischer Widerstand	Drehgestellverkleidung	2	2	2	3	75
Störstellenreduktion	betriebliche Fahrerassistenzsysteme	2	2	3	2	75
Traktionswirkungsgrad	Permanentmagnet-Synchronmotor	3	2	2	2	72
Traktionswirkungsgrad	Zusammenlegen von Kühlkreisen	2	3	2	1	70
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	bedarfsgerechte Frischluftregelung	2	3	1	2	70

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	frequenzvariables Bordnetz	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Luftentfeuchter statt Kühlung ü. 22°C	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	LED- Beleuchtung	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	bessere Isolation Fahrgastraum	2	2	1	3	67
Aerodynamischer Widerstand	aerodynamisch optimierte Kopfform	2	2	2	2	67
Aerodynamischer Widerstand	Verkleidung Unterflurausrüstung	2	2	2	2	67
Leermasse	hochfeste Stahlrahmen-Integralbauweise	2	2	2	2	67
Verzicht auf Halte	Einführung Bedarfshalte	2	2	3	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Hilfsbetriebe drehzahlvariabel (stufenlos)	3	2	1	2	63
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Klimatisierung Fenster (10°C -22°C) KLAPPFENSTER	3	2	1	2	63
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	bessere Park-/ Bereitstellungsklimatisierung	3	2	1	2	63
Leermasse	gewichtsoptimierte Bestuhlung	3	2	2	1	63
Traktionswirkungsgrad	Mittelspannungs-Eingangsstromsteller	1	2	2	2	62
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Isolieren abgestellter Frzg.	3	1	1	3	60
Traktionswirkungsgrad	Weiterentwicklung Motorstromrichter	2	2	2	1	58
Traktionswirkungsgrad	aktive Filter (Hilfsbetriebe-Umrichter)	2	2	2	1	58
Traktionswirkungsgrad	supraleitender Trafo	1	1	2	3	58
Traktionswirkungsgrad	Dreipunktschaltung	2	2	2	1	58
Leermasse	leichte Verkabelung	2	2	2	1	58
Leermasse	Faserverbund-Komplettaufbau	1	1	2	3	58
Leermasse	Sandwich-Innenausbau	2	2	2	1	58

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Innenbeleuchtung neue Lampen	3	2	1	1	55
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Abwärme/ Bremsenergie zum Heizen	2	1	1	3	55
Traktionswirkungsgrad	Mittelfrequenztrafo	1	1	2	2	50
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Wärmetauscher	2	1	1	2	47
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Anpassung Scheibe an Klimabedarf (Abdunkeln)	1	1	1	2	42

Das größte Potenzial haben betriebliche Maßnahmen im Zusammenhang mit der Klimatisierung des Fahrgastraumes:

- Bedarfsgerechte Regelung von Temperatur und Frischluftzufuhr
- Vermeidung unnötiger Wärmeverluste (oder Kälte-) bei Abstellung, Bahnhofshalten und während der Fahrt

Im Gegensatz zum Fernverkehr ist die Vermeidung von Störstellen genauso bedeutsam wie die Nutzung von Fahrzeitreserven, weil wegen des niedrigeren Geschwindigkeitsniveaus die Antriebsverluste dominieren und nicht durch den geringeren Fahrwiderstand in der Störstelle kompensiert werden.

Aus dem gleichen Grunde liegt unter den rein fahrzeugseitigen Maßnahmen die Verbesserung des Antriebswirkungsgrades vor der Aerodynamik. Neue Technologien rangieren am Schluß.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.3.4 S-Bahn / U-Bahn

Tabelle 9: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im U-Bahn-System

Technologie		Realisierungs-zeitraum	Investitions-bedarf	Energieeinsparpot. "Einsparfaktor"	Technologisches Potenzial	Normierter Endwert
Netzstruktur	zweiseitige Speisung	3	2	3	3	88
Einsatz rückspeisefähiger Uw	zusätzlicher Wechselrichter	3	2	3	2	80
Verringerung Maximalgeschwindigkeit	um 10 km/h	3	2	3	2	80
Traktionswirkungsgrad	Stromrichter-Steuerverfahren	3	3	2	1	75
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	keine Klimatisierung bei Abstellung	3	3	1	2	75
Traktionswirkungsgrad	Permanentmagnet-Synchronmotor	3	2	2	2	72
Nutzung Zeitrückhalt	Fahrerschulung/-assistenz	3	2	3	1	72
Traktionswirkungsgrad	mobile Speicher klein	3	1	2	3	68
Einsatz rückspeisefähiger Uw	Speicher stationär	3	1	3	2	68
Einsatz rückspeisefähiger Uw	Umkehrstromrichter	3	1	3	2	68
Traktionswirkungsgrad	getriebeloser Antrieb	2	2	2	2	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	frequenzvariables Bordnetz	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Luftentfeuchter statt Kühlung ü. 22°C	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	LED- Beleuchtung	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	bessere Isolation Fahrgastraum	2	2	1	3	67
Aerodynamischer Widerstand	Drehgestellverkleidung	2	2	1	3	67

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Leermasse	hochfeste Stahlrahmen-Integralbauweise	2	2	2	2	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Hilfsbetriebe drehzahlvariabel (stufenlos)	3	2	1	2	63
Traktionswirkungsgrad	Weiterentwicklung Motorstromrichter	2	2	2	1	58
Aerodynamischer Widerstand	aerodynamisch optimierte Kopfform	2	2	1	2	58
Leermasse	leichte Verkabelung	2	2	2	1	58
Leermasse	Faserverbund-Komplettaufbau	1	1	2	3	58
Leermasse	Sandwich-Innenausbau	2	2	2	1	58
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Innenbeleuchtung neue Lampen	3	2	1	1	55
Nutzung Zeitrückhalt	automatisches Fahren	2	1	3	1	55
Traktionswirkungsgrad	supraleitende Filterspule	1	1	2	2	50

Die Spitzenposition wird von der Bahnstromversorgung gehalten, um das volle Potenzial der regenerativen Bremsung nutzbar zu machen:

- Zweiseitige Speisung und Vermaschung des Netzes
- Einrichtung rückspeisefähiger Unterwerke
- Installation von stationären Energiespeichern

Aufgrund der häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge haben sowohl betriebliche als auch fahrzeugtechnische Maßnahmen eine gleich hohe Bedeutung wie im Regionalverkehr:

- Nutzung von Fahrzeitreserven zum Energiesparen
- Verbesserung des Antriebswirkungsgrades, einschließlich innovativer Ansätze (getriebeloser Antrieb, permanenterregte Fahrmotoren)
- Intelligentes Bordnetzmanagement

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

5.3.5 Straßenbahn

Tabelle 10: Ergebnis der Nutzwertanalyse für Maßnahmen im Straßenbahnsystem

	Technologie	Realisierungs-zeitraum	Investitions-bedarf	Energieeinsparpot. "Einsparfaktor"	Technologisches Potenzial	Normierter Endwert
Netzstruktur	zweiseitige Speisung	3	2	3	3	88
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Temperatursollwert umweltorientiert	3	3	1	3	83
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Bedarfsgesteuerte Türöffnung	3	3	1	3	83
Verzicht auf Halte	Einführung Bedarfshalte	3	3	3	1	83
Einsatz rückspeisefähiger Uw	zusätzlicher Wechselrichter	3	2	3	2	80
Nutzung Zeitrückhalt	Fahrerschulung/-assistenz	3	2	3	2	80
Störstellenreduktion	Vorrangschaltung	3	2	3	2	80
Verringerung Maximalgeschwindigkeit	um 10 km/h	3	2	3	2	80
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	keine Klimatisierung bei Abstellung	3	3	1	2	75
Störstellenreduktion	betriebliche Fahrerassistenzsysteme	2	2	3	2	75
Einsatz rückspeisefähiger Uw	stellbare Gleichrichter	3	2	3	1	72
Einsatz rückspeisefähiger Uw	Speicher stationär	3	1	3	2	68
Einsatz rückspeisefähiger Uw	Umkehrstromrichter	3	1	3	2	68
Traktionswirkungsgrad	Stromrichter-Steuerverfahren	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	frequenzvariables Bordnetz	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Luftentfeuchter statt Kühlung ü. 22°C	3	3	1	1	67

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	LED-Beleuchtung	3	3	1	1	67
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	bessere Isolation Fahrgastraum	2	2	1	3	67
Traktionswirkungsgrad	Permanentmagnet-Synchronmotor	3	2	1	2	63
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Hilfsbetriebe drehzahlvariabel	3	2	1	2	63
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Klimatisierung Fenster (10°C -22°C) KLAPPFENSTER	3	2	1	2	63
Leermasse	Sandwich-Innenausbau	3	2	2	1	63
Leermasse	Aluminium-Integralbauweise	3	2	2	1	63
Traktionswirkungsgrad	mobile Speicher klein	3	1	1	3	60
Leermasse	leichte Verkabelung	2	2	2	1	58
Leermasse	Faserverbund-Komplettaufbau	1	1	2	3	58
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Innenbeleuchtung neue Lampen	3	2	1	1	55
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Abwärme/ Bremsenergie zum Heizen	2	1	1	3	55
Traktionswirkungsgrad	getriebeloser Antrieb	2	2	1	1	50
Traktionswirkungsgrad	Weiterentwicklung Motorstromrichter	2	2	1	1	50
Traktionswirkungsgrad	supraleitende Filterspule	1	1	1	2	42
Hilfsbetriebe und Komfortleistungen	Anpassung Scheibe an Klimabedarf (Abdunkeln)	1	1	1	2	42

Wie bei der U-Bahn liegt der Fokus zunächst auf der Sicherstellung von Abnehmern für anfallende Bremsenergie, und zwar durch geeignete Gestaltung der Bahnstromversorgung (Netzstruktur und Unterwerke).

Unterschiedlich ist jedoch die hohe Bedeutung des Bordnetzmanagements (Klimatisierung und Hilfsbetriebe) gegenüber dem Antriebswirkungsgrad, weil die Beschleunigungsphasen wegen hoher Motorisierung des Musterzuges sehr kurz sind.

Eine weitere Besonderheit der Straßenbahn ist ihr Konfliktpotenzial mit dem Straßenverkehr, worauf man mit besonderen dispositiven Maßnahmen zur Energieeinsparung reagieren kann (Vorrangschaltung und spezielle Assistenzsysteme).

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Elektrische Bahnen sind leistungsfähig, energieeffizient und umweltfreundlich. Mittels elektrischer Energie ermöglichen sie den attraktiven und komfortablen Hochgeschwindigkeitsverkehr zu Land mit Reisegeschwindigkeiten zwischen 200 km/h und 300 km/h. In den modernen Großstädten sind sie als zuverlässige, Ressourcen schonende städtische Nahverkehrsmittel mit mehreren 10.000 Personen pro Stunde und Richtung unverzichtbar. Im Güterverkehr gibt es keine effizientere Variante für den Langstreckentransport und den Transport von Massengütern.

Die Vorteile der elektrischen Bahnen resultieren einerseits aus dem elektrischen Antrieb selbst, der in heutiger Ausführung mit stromrichtergeregelten Asynchronmotoren hinsichtlich Masse-Leistungsverhältnis, Wirkungsgrad und Nutzung der elektrischen Bremsenergie anderen Antriebstechnologien - nicht nur im Bahnbereich - weit überlegen ist. Zudem bieten der geringe Rollwiderstand des Rad-Schiene-Kontaktes, der vergleichsweise günstige aerodynamische Widerstand infolge der Zugbildung und die Möglichkeit der energieoptimalen Steuerung bahnbetrieblicher Prozesse hervorragende Voraussetzungen für nachhaltige energieeffiziente Mobilität.

Trotz hohem Entwicklungsstand wird auch bei den elektrischen Bahnen intensiv an Weiterentwicklungen gearbeitet, wie an der Verbesserung von Komponentenwirkungsgraden z.B. bei Fahrmotoren, Umrichtern und Transformatoren, an der Integration von Traktionsenergiespeichern oder an der betrieblichen Prozesssteuerung. Selbstverständlich soll die Bahn auch in mittlerer und fernerer Zukunft weiterhin im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern zuverlässig, komfortabel, preisgünstig und auch noch energiesparender betrieben werden. Ein energiesparender Betrieb hat dabei einerseits den Vorteil der geringeren Betriebskosten und andererseits der geringeren Umweltauswirkungen in Form von vermindertem Ausstoß des klimarelevanten CO_2.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Der Fachbereich A2 „Bahnen mit elektrischen Antrieben“ der Energietechnischen Gesellschaft im VDE hat sich daher vor einiger Zeit die Aufgabe gesetzt, die Reduktion des Energieverbrauchs von Bahnen zu untersuchen und Verbesserungspotenziale zu erarbeiten. Folgende Ansätze dienten dabei als Leitlinie:

- Die Entwicklung von Komponenten und Teilsystemen ist bereits so weit fortgeschritten, dass sich in vielen Bereichen nur noch geringe Optimierungen realisieren lassen. Für eine erweiterte Betrachtung des Gesamtsystems und damit des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten fehlt vielen Bereichen (Hersteller, Betreiber, universitäre Forschung) jedoch die Kompetenz und/oder die Erfahrung. Eine enge Zusammenarbeit dieser drei Bereiche findet nur selten und nur unter eng begrenzten Aufgabenstellungen statt.
- Betreiberseitig lag bislang der Fokus mehr auf Betriebsstabilität, Zuverlässigkeit, Langlebigkeit der Produkte, Performance, Komfort usw. als auf Energieeffizienz. Aufgrund steigender Energiekosten, steigenden Kostendrucks sowie der öffentlichen Meinung in Bezug auf die Umweltwirkungen, auch des Schienenverkehrs, wird ein geringer Energiebedarf immer wichtiger.

Der vorliegende Bericht beschreibt objektiv, wie im Bahnwesen der Energiebedarf technisch machbar reduziert werden kann. Er gibt so Handlungsempfehlungen an die verschiedenen verantwortlichen Stellen bei Herstellern und Betreibern, gibt Anregungen an Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen. Bereits im Vorfeld umwelt- und verkehrspolitischer Entscheidungsfindung werden deren Auswirkungen durch diesen Bericht transparent gemacht.

<u>Energie“verluste“ reduzieren:</u>

Das beinhaltet die Verbesserung der Wirkungsgrade von Komponenten und Anlagen und erfordert prinzipiell technische Innovationen. Derartige Maßnahmen sind jedoch nur bei denjenigen Komponenten bzw. Elementen effizient anwendbar, in denen hohe Verluste auftreten. Grundsätzlich ist dieser Effekt am Anfang der Energieübertragungskette (Kraftwerke, Umrichterwerke), wo der „Energiefluß“ gebündelt ist, größer als am Ende (Bahnantrieb).

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

- Verlustarme Energieerzeugung

  Konventionelle Kraftwerke zur Stromerzeugung haben erhebliche Umwandlungsverluste, die durch technologische Weiterentwicklung reduziert werden können. Mehr Potenzial hat jedoch die Umstellung auf regenerative Energien, wie sie momentan unter dem Stichwort „Energiewende“ vorangetrieben wird [8].

  Folglich wird der gesamte elektrische Bahnverkehr besonders von dieser Entwicklung profitieren.

- Verlustarme Energiewandlung im Fahrzeug

  Hierunter ist primär der Antriebswirkungsgrad zu verstehen. Der Effekt ist bei Verkehrsarten mit häufigen Fahrzyklen (Regionalverkehr, U-Bahn) am größten.

  Da mit der Einführung der Drehstromantriebstechnik bereits ein niedriges Verlustniveau erreicht worden ist, stehen hier die „kleinen“, aber aufwandsarmen Maßnahmen im Vordergrund:

  a. optimierte Steuerverfahren der Leistungselektronik,
  b. Bedarfsweises Abschalten paralleler Antriebsstränge,
  c. Zusammenlegung von Kühlkreisläufen.

  Sie sollten von der Bahnindustrie in Eigeninitiative verfolgt werden. Innovative Entwicklungen (permanenterregte Fahrmotoren, getriebeloser Antrieb, mobile Energiespeicher, oder Ersatz herkömmlicher Transformatoren durch Umrichter mit Hochspannungs-Halbleitern, Supraleitende oder Mittelfrequenz-Trafos) stehen noch am Anfang und sind bei heutigen Energiepreisen selten wirtschaftlich. Aufgrund negativer Erfahrungen mit individuellen Initiativen wird vorgeschlagen, die Entwicklungsanstrengungen gezielt zwischen Bahnindustrie und Hochschulen zu bündeln und von staatlicher Seite zu fördern.
  Im Gleichklang mit der Technologieentwicklung müssen auch betriebliche und technische Regelwerke der Betreiber sowie Normen und Standards fortgeschrieben werden, damit die neuen Komponenten und Verfahren überhaupt zugelassen werden können.

- Verringerung des Fahrwiderstandes

  Wegen des (bahn-)systembedingt kleinen Rollwiderstands ist hierunter vorrangig der aerodynamische Widerstand zu verstehen. Dessen Optimierung ist zunächst für Bahnen mit höheren Geschwindigkeiten (Fernverkehr) oder hohem Luftwiderstand (Güterverkehr) interessant, gegebenenfalls auch im schnellen Regionalverkehr.

  Entsprechende Entwicklungsanstrengungen der Bahnindustrie müssen von den Bahnbetreibern nicht nur gefordert, sondern auch honoriert werden.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energie“verschwendung“ vermeiden:

Einerseits sind Verhaltensänderungen im Bahnbetrieb nötig, die vorrangig durch ein gezieltes Training der beteiligten Fachkräfte erreicht werden können: Zu nennen wären die energiesparende Fahrweise oder eine Anpassung der Komfortfunktionen an die Umweltbedingungen.

Andererseits gibt es technische Innovationen, die aufgrund der langen Lebensdauer von Fahrzeugen und Infrastruktur bislang nur in Einzelfällen realisiert wurden. Diese erfordern eine gezielte Förderung der Modernisierung, und zwar nicht nur monetär, sondern auch durch Abbau von bürokratischen Hürden.

- Energiesparende Fahrweise

  Die Nutzung von vorhandenen Fahrzeitreserven „Zeitrückhalt“ durch Absenkung der Maximalgeschwindigkeit ist in allen Verkehrsarten relevant. Dies kann im einfachsten Fall durch eine Schulung des Fahrpersonals erfolgen, in komplexen Netzen jedoch besser mithilfe von Fahrerassistenzsystemen, deren Empfehlungen über eine Betriebsleitzentrale fahrplangerecht koordiniert werden.

  Ein weiterer Ansatz ist die Vermeidung unnötiger Antriebs- und Bremszyklen durch die Einführung von „Bedarfshalten“ (Fahrgastwunsch in Straßenbahn und Regionalverkehr).
- Bedarfsgerechte Klimatisierung

  Wegen ihres hohen Energiebedarfs kommt der Optimierung von Heizung bzw. Kühlung des Fahrgastraumes in allen Personenverkehrsarten eine besondere Bedeutung zu. Energieverschwendung kann bekämpft werden durch

  a. Stärkere Angleichung des Temperatursollwertes an die Umweltbedingungen
  b. Reduktion der Türöffnungszeiten auf das betrieblich Notwendige
  c. Minimierung der Einschaltzeiten während der Abstellphasen des Zuges „Parken“

  Die technischen Voraussetzungen hierfür sind in der Regel bei neueren Fahrzeugen vorhanden, müssen aber auch zuverlässig an eine Betriebssteuerung angebunden werden. Entsprechende Anforderungen müssen von den Betreibern rechtzeitig spezifiziert werden, da Nachrüstungen ungleich aufwändiger sind. Deshalb wäre für die Bestandsflotten ein staatliches Anreizsystem ähnlich der energetischen Gebäudesanierung anzustreben.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Weitere Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs für die Klimatisierung wären eine bessere Isolation des Fahrgastraumes (einschließlich der Fenster!), eine bedarfsgerechte Frischluftzufuhr sowie die Nutzung vorhandener Abwärme. Alles bedeutet aber einen hohen technologischen Aufwand mit entsprechenden Kosten.

- Maximierung des rekuperativen Bremsens

  An erster Stelle steht hier die volle Ausnutzung des bereits installierten elektrischen Bremsvermögens. Dem stehen drei Dinge entgegen,

  a. die fehlende Anpassung bestehender betrieblicher Regelwerke an moderne lokbespannter Züge. Dies ist in der Schweiz bereits erfolgt, weil aufgrund ihrer Topographie größere Potenziale vorhanden sind und die Optimierung des Energiebedarfs stärker im Vordergrund steht als hierzulande.
  b. Die Sorge des Fahrpersonals, bei frühzeitigem Beginn der Bremsung den Fahrplan nicht einhalten zu können. Als Folge muss vor allem im hohen Geschwindigkeitsbereich mechanisch zugebremst werden. Abhilfe schaffen hier Training oder Assistenzsysteme.
  c. Die vermeintliche oder tatsächliche Inkompatibilität heute zulässiger Maximalspannungen im Gleichstromnetz mit vorhandenen Altfahrzeugen und stationären Anlagen. Bei ohnehin anstehenden Erneuerungsmaßnahmen sollte dies untersucht und abhängig vom Aufwand auch umgesetzt werden.

- Energieoptimiertes Bordnetz

  Durch bedarfsgerechte Frequenzabsenkung des dreiphasigen Bordnetzes von Lokomotiven und Triebzügen sinkt die Leistungsaufnahme in den angeschlossenen Hilfsbetrieben (Pumpen, Lüfter). Dies erfordert ein intelligentes Bordnetzmanagement und gegebenenfalls zusätzliche Komponenten (Schaltmittel, dezentrale Umrichter). Weiterhin kann man auch Kleinverbraucher mit noch geringerem Energiebedarf einsetzen (z.B. LED-Beleuchtung)

  Das derzeitige Energiepreisniveau ist allerdings kein ausreichender Motivator für derartige Konzepte.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Energie“optimierung“ vorantreiben:

In der Priorisierung von energetischen Zielen im gesamten Bahnsystem liegt das größte Potenzial, wobei der Aufwand meist beträchtlich ist und mitunter Konkurrenz zu anderen Zielen besteht. Zu nennen wären ein Umbau der Verteilnetze mit dem Ziel höherer Rückgewinnung bzw. geringerer Verluste, oder die Entflechtung von Verkehrsarten.

Dies erfordert größere Investitionen in die Infrastruktur von Fahrweg und/oder Energieversorgung. Kosten- und zeitintensiv, insbesondere durch öffentliche Interessenskonflikte.

- Netzstruktur bei Gleichstrombahnen optimieren

  Während in Deutschland der Fern-, Güter- und Regionalverkehr über ein 110/15kV-Wechselstrom-Verbundnetz betrieben wird, das grundsätzlich aufnahmefähig und verlustarm ist, ist bei Stadtbahnen die Lage anders: Ein nennenswerter Teil der generatorischen Bremsenergie muss in Bremswiderständen „verheizt“ werden, wenn gleichzeitig keine Abnehmer vorhanden sind. Wirksame Gegenmaßnahmen sind:

  a. Zweiseitige Speisung und Vermaschung des Netzes, um weitere Fahrzeuge in der Nähe mit dem Bremsenergieangebot zu erreichen. Zudem senkt dies die Leitungsverluste.
  b. Einrichtung rückspeisefähiger Unterwerke, um die überschüssige Bremsenergie ins öffentlicheStromversorgungsnetz einspeisen zu können.
  c. Schaffung von gesetzlichen / regulatorischen Rahmenbedingungen, die eine solche Rückspeisung ohne Vereinbarung eines s.g. Fahrplanes zur Energielieferung erlauben.
  d. Installation von stationären Energiespeichern, um Leistungsangebot und –Bedarf zeitlich entkoppeln zu können.

- Vermeidung von Störstellen

  Insbesondere Straßenbahnen sind häufigen Geschwindigkeitswechseln unterworfen, weil sie sich den Verkehrsweg (mindestens an Ampeln und Kreuzungen) mit dem Individualverkehr teilen müssen. Lässt sich eine prinzipielle Vorrangschaltung für den Bahnverkehr nicht um- oder durchsetzen, so können Fahrerassistenzsysteme zumindest das Ausfahren unnötiger Zyklen vermeiden, indem sie die Sollgeschwindigkeit reduzieren oder die Abfahrt verzögern. Voraussetzung ist jedoch eine Vernetzung mit der Betriebsleitzentrale des

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Straßenverkehrs. Entsprechende Konzepte müssen folglich in der Stadtplanung initiiert werden.

Im Vollbahnbereich verkehren schnell- und langsamfahrende Züge häufig auf gleichen Trassen und verursachen damit gegenseitige Behinderungen mit entsprechendem Energiebedarf für zusätzliches Bremsen und Beschleunigen.

Wo die Optimierung der betrieblichen Disposition an ihre Grenzen stößt, hilft nur noch der Streckenausbau zur Entflechtung der Verkehrsarten. Dies kann durch Neubaustrecken, mehrgleisigen Ausbau oder auch die Schaffung spezieller Korridore geschehen. Triebkraft für alle diese Maßnahmen ist aber immer die Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Bahnsystems; die Energieeinsparung ist dann ein schöner Nebeneffekt.

Insbesondere die bedeutenderen Maßnahmen sind nur in einer gemeinsamen Initiative von Politik, Betreibern und Bahnindustrie erfolgreich und in einem angemessenen Zeitrahmen umsetzbar:

- Die Politik muss verlässliche Rahmenbedingungen schaffen und somit langfristig wirkende Maßnahmen mit großem Investitionsvolumen ermöglichen. So wird beispielsweise die „Energiewende“ zu einer weiteren Verbesserung der Umweltbilanz des Bahnverkehrs führen.
- Die Betreiber sollten bei der Spezifikation von Fahrzeugen und Bahnstromversorgung den energetischen Aspekt stärker als bislang wertschätzen, so dass entsprechende Technologien von der Bahnindustrie umgesetzt werden können. Hierzu ist eine genaue Kenntnis und Optimierung der betrieblichen Einsatzbedingungen erforderlich.
- Der Bahnindustrie obliegt es, selbständig auch kleinere Potenziale zu nutzen und darüber hinaus den oben genannten Gruppen als kompetenter Diskussionspartner für die Optimierung des Gesamtsystems zur Verfügung zu stehen. Dies wird immer wichtiger, weil die ehemals bei Eisenbahnaufsicht und großen Betreibern gebündelte Systemkenntnis infolge Dezentralisierung und Privatisierung abnimmt, während sich die Bahnindustrie im gleichen Zeithorizont zu größeren Einheiten konsolidiert hat.

Letztlich soll aber auch einer der einfachsten Ansätze nicht unerwähnt bleiben, der jedem einzelnen Bürger offen steht: Die vermehrte Nutzung des Bahnsystems, sei es als Fahrgast oder für den Warentransport, steigert mittels höherer Auslastung unmittelbar dessen Energieeffizienz und verringert zusätzlich den Energiebedarf des Individualverkehrs.

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

Literaturverzeichnis

[1] DB. (2012). *Mobilität sichern - Klima schützen - Klimabroschüre.*
DeutscheBahn. (2009). *Nachhaltigkeitsbericht*. Abgerufen am 2012 von http://www.deutschebahn.com/site/nachhaltigkeitsbericht__2009/de/unsere__umwelt/klima/energieverbrauch/energieverbrauch.html

[2] Frenzel, A. (2011). *Technologietrends zur Energieeffizienzsteigerung bei elektrischen Bahnen.* Dresden.

[3] IVE. (kein Datum). *EcoTransIT world*. Abgerufen am 2012 von www.ecotransit.org

[4] Lippmann, G. (2009). *Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz elektrischer Bahnen.* Dresden: TU Dresden.

[5] Neubert, M. (2009). *Simulationsrechnungen zum Energiebedarf elektrischer Bahnen.* Dresden: TU Dresden.

[6] Schütte, J., & Stephan, A. (2010). Die Bahn im postfossilen Mobilitätskontext. *Forum Umwelt und Verkehr.* Greifswald.

[7] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. (2000). *Stadtbahnen in Deutschland.* alba.

[8] VDE-Studie: Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020 (2012)

© Energietechnische Gesellschaft im VDE

VDE

VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.
Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main

Telefon 069 6308-0
E-Mail service@vde.com
http://www.vde.com

