

Wissenschaftliche Ansätze für einen energieoptimierten Eisenbahnbetrieb

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier¹, Dipl.-Ing. Tilo Schumann¹, Dr.-Ing. Michael Meyer zu Hörste¹, Dipl.-Ing. Holger Dittus², Dr.-Ing. Joachim Winter²

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

¹Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig

²Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

1 Einleitung

Das Eisenbahnsystem gilt zu Recht als eines der umweltfreundlichsten Verkehrssysteme. Die Energieverbräuche pro Personen- oder Tonnenkilometer sind deutlich unter denen im Individualverkehr und damit verbunden ist auch die Umweltbelastung entsprechend gering. Dennoch muss sich auch das Eisenbahnsystem den Herausforderungen stellen, die aktuell in allen Bereichen des Lebens herausragend sind. Es muss nachdrücklich die Frage gestellt werden, inwieweit Potenziale für eine Energiebedarfsoptimierung in dieser Domäne vorhanden sind und auf welche Art diese genutzt werden können.

Es sind bereits diverse Ansätze in dieser Richtung unternommen worden. Hier sind beispielhaft die moderne Fahrzeugtechnik mit immer effizienterer Motorentechnik und Fahrerassistenzsysteme zu nennen. Auch auf anderen Gebieten sind Untersuchungen, Versuche und erste Technologien vorhanden, die zu einer Reduzierung des Energiebedarfs des Eisenbahnsystems führen.

Die Maßnahmen zur Energiebedarfsoptimierung können in infrastrukturelle, betriebliche und fahrzeugseitige Maßnahmen eingeteilt werden [Abb. 1]. Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über technologische Ansätze zur Energiebedarfsoptimierung, um dann auf einzelne fahrzeugseitige und betriebliche Maßnahmen näher einzugehen. Abschließend wird das Energieeinsparpotential bei Langsamfahrstellen unter bestimmten Randbedingungen exemplarisch quantifiziert.

2 Technologische Ansätze

2.1 Überblick

Der Energiebedarf und damit auch das Feld für Ansätze der Energieeffizienz bilden sich bei der Eisenbahn aus dem Zusammenspiel aus Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb. Erst im Zusammenwirken aller drei Anteile werden neue Ansätze wirksam oder auch in ihrer Wirksamkeit reduziert. Im Rahmen der Initiative Eco Rail Innovation Plattform (ERI) wurden etliche Themen als relevant für die Steigerung der Energieeffizienz und der Verbesserung von Umwelteffekten identifiziert [Abb. 2]

In einer Diplomarbeit wurde diese Struktur noch weiter verfeinert und gewichtet [2]. Die Zusammenfassung der Untersuchungen wird in [Abb. 3] gezeigt.

Deutlich erkennbar ist hier, dass ein effizienter – also sparsamer – Umgang mit Energie erst im Zusammenspiel von betrieblichen, fahrzeugseitigen und infrastrukturseitigen Maßnahmen voll erreicht wird. Allerdings treten auch erhebliche Wechselwirkungen auf, so dass der Effekt einer Maßnahme durch eine andere wieder reduziert wird. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Maßnahmen sehr unterschiedliche Zeithorizonte bis zur vollen Umsetzung haben. Erkennbar ist dies an der Ordinate in [Abb. 3]. Der optimale Effekt kann also auch in einer zeitlichen Staffelung verschiedener Maßnahmen bestehen.

2.2 Fahrzeugseitige Maßnahmen

Im Energiemanagement von Schienenfahrzeugen werden aktive und passive Maßnahmen unterschieden. Aktive Maßnahmen umfassen Konzepte zum sorgsamem Umgang mit dem Energiebedarf und beinhalten die Funktionsbereiche Traktionsausrüstung, Hilfs- und Nebenbetriebe, Zugsammelschiene und betriebliches Energiemanagement [Abb. 4].

Zukünftig wird das aktive Energiemanagement zunehmend durch den Einfluss der Informationstechnologien geprägt werden. Die im Rahmen von Fahrerassistenz- und Zugortungssystemen [3] zur Verfügung stehenden Informationen über den erwarteten Strecken- und Geschwindigkeitsverlauf ermöglichen die Prädiktion zukünftiger Leistungsanforderungen [4]. Durch das Zusammenwachsen von Fahrerassistenzsystemen und Antriebssteuerung können so energetisch optimierte Steueralgorithmen entwickelt werden, die nicht nur den aktuellen, sondern auch den zukünftigen Leistungsbedarf berücksichtigen. Erste Erfahrungen mit der Kombination von Antriebssteuerung und Fahrerassistenz werden aktuell in Nahverkehrsfahrzeugen mit Energiespeichern für den oberleitungsfreien Betrieb gesammelt. In diesen Fahrzeugen ist ein prädiktives Energiemanagement zur Gewährleistung eines für die Überwindung der fahrdrahtlosen Abschnitte ausreichenden Speicherinhalts zur Versorgung der Traktionsausrüstung und Komfortfunktionen unverzichtbar.

Das passive Energiemanagement umfasst die Potentiale, die sich aus dem Konzept des Schienenfahrzeugs selbst ergeben. Wesentliche Funktionsbereiche sind umweltorientierte Antriebs- und Bremskonzepte, energetisch optimierte Betriebskonzepte und Fahrzeug-Leichtbau.

Aktive Maßnahmen lassen sich in aller Regel auch bei Alt-Fahrzeugen einsetzen, während passive Maßnahmen wirtschaftlich vernünftig nur auf Neu-Fahrzeugen realisiert werden können.

Es existiert eine Vielzahl technologischer Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz im Schienenfahrzeug. Im Folgenden werden Leichtbau, energetisch optimierte Bremskonzepte und fahrzeugseitige Energiespeicher näher betrachtet.

2.2.1 Energieeinsparpotenzial durch Leichtbau im Schienenfahrzeug

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde systematisch untersucht, wieweit sich der Energiebedarf durch die Reduktion der Fahrzeugmasse verringern lässt [5]. Es wurden drei Schienenfahrzeuge betrachtet, die jeweils eine Klasse des Schienenverkehrs repräsentieren. Für den Hochgeschwindigkeitsverkehr wird ein ICE3 (Baureihe (BR) 403) betrachtet, für den elektrifizierten Nah- und Regionalverkehr ein S-Bahn-Triebzug (BR 423) und für den

dieselbetriebenen Nah- und Regionalverkehr ein Fahrzeug der BR 611. Die Antriebssysteme der Fahrzeuge werden durch Zugkraftkennlinien am Rad beschrieben, wobei Zugkraft und Antriebsleistung von der Masse unabhängig sind.

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird der Traktionsenergiebedarf anhand von UIC-Serviceprofilen ermittelt [6]. Diese standardisierten Serviceprofile beschreiben typische Einsatzszenarien für Schienenfahrzeuge im Nahverkehr (Suburban), Regional-, Intercity- und Hochgeschwindigkeitsverkehr. Um den Einfluss der Fahrzeugmasse zu ermitteln, wird diese in den Simulationen in Schritten von 2,5 % bis zum Erreichen von 70 % der Besetztmasse reduziert.

In den Serviceprofilen Suburban und Regional sind die berechneten Einsparpotentiale für die BR 611 und die BR 423 ähnlich. Für eine Reduktion der Masse von 10 % ergeben sich beim Dieseltriebwagen Energiebedarfseinsparungen von bis zu 16 % bzw. 15 %. Beim elektrischen Fahrzeug sind die berechneten Einsparungen mit 10 % bzw. 8,9 % deutlich geringer, was neben dem generell besseren Antriebswirkungsgrad auch auf die Bremsenergie-Rückspeisung beim elektrischen Fahrzeug zurückzuführen ist. Im Serviceprofil Intercity weist das diesel-betriebene Fahrzeug absolut den größten Energiebedarf auf. Obwohl das Hochgeschwindigkeitsfahrzeug BR 403 mehr als dreimal so viel wiegt und in diesem Serviceprofil mit bis zu 200 km/h unterwegs ist, ist sein Primärenergiebedarf aufgrund des besseren Antriebswirkungsgrads und der Bremsenergie-Rückspeisung geringer als beim Dieselfahrzeug. Bezogen auf die Reduzierung der Fahrzeugmasse um 10 % ergeben sich beim Dieselfahrzeug BR 611 eine Einsparung von 5,9 %, beim elektrischen Fahrzeug BR 423 3,3 % und beim Hochgeschwindigkeitsfahrzeug BR 403 6,5 %. Im Serviceprofil Highspeed wird lediglich der Hochgeschwindigkeitszug BR 403 betrachtet. Der streckenbezogene Energiebedarf ist hier fast doppelt so groß wie im Serviceprofil Intercity. Dieser starke Anstieg ist auf die hohe Geschwindigkeit von 300 km/h zurückzuführen, durch die der Energiebedarf für den aerodynamischen Widerstand stark ansteigt. Der Einfluss der Masse auf den Energiebedarf ist hier vergleichsweise gering. Durch Einsparung von 10 % der Fahrzeugmasse verringert sich der Energiebedarf lediglich um 2,2 %, selbst bei 20 % weniger Masse könnten nur 4,1 % des Energiebedarfs eingespart werden.

Die Analysen zeigen, dass die Einsparpotentiale durch Reduzierung der Fahrzeugmasse von der Charakteristik des Serviceprofils dominiert werden. Insbesondere bei Serviceprofilen mit geringen Stationsabständen und geringen Höchstgeschwindigkeiten können große Potentiale realisiert werden. Mit steigender Höchstgeschwindigkeit nimmt der Anteil an Energie für die Überwindung der aerodynamischen Widerstände zu und das Einsparpotential sinkt. Bei diesel-betriebenen Fahrzeugen ist das Einsparpotential bis zu viermal größer als bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen, da dieselbetriebene Fahrzeuge die kinetische Energie beim Bremsen nicht zurückspeisen können. Die Tabelle 1 fasst die erreichbaren Energiebedarfseinsparungen zusammen.

Energieeinsparung in [kWh/100 km]			Fahrzeug		
			DMU BR 611	EMU BR 423	HST BR 403
Serviceprofil	Suburban	pro Tonne	22,0	4,0	---
		10 % mass red.	255	48	---
	Regional	pro Tonne	20,6	3,8	---
		10 % mass red.	238	46	---
	Intercity	pro Tonne	5,2	1,3	1,2

		10 % mass red.	60	15	54
	Highspeed	pro Tonne	---	---	0,7
		10 % mass red.	---	---	32

Tab. 1: Energiebedarfseinsparung verschiedener Fahrzeuge im UIC-Serviceprofil

Abschließend wird aus diesen Ergebnissen abgeleitet, welche Kosten für die Einsparung von einem kg Fahrzeugmasse entstehen dürfen, damit sie während der Lebensdauer des Fahrzeugs durch die eingesparte Energie amortisiert werden können. Dabei werden folgende Annahmen für die Berechnung der Kosteneinsparung getroffen: Betriebsdauer des Fahrzeugs 30 Jahre, Energiepreis Strom ab Stromabnehmer 12,44 Ct/kWh, Energiepreis Diesel 1,15 Euro/l entsprechend 11,533 Ct/kWh. Verzinsung des eingesetzten Kapitals und Preissteigerung bei den Energiekosten werden nicht berücksichtigt. Die Tabelle 2 enthält die berechneten Werte in Abhängigkeit von Fahrzeug und Serviceprofil.

Fahrzeug	in Euro/kg	UIC-Serviceprofil			
		Suburban	Regional	Intercity	High-speed
BR 611 - DMU	76	96	50	---	
BR 423 - EMU	15	19	13	---	
BR 403 - HST	---	---	12	15	

Tab. 2: Kosteneinsparung verschiedener Fahrzeuge im UIC-Serviceprofil

Die Tabelle zeigt, dass auch bei den Kosten das größte Einsparpotential mit mehr als 50 Euro/kg bei den diesel-betriebenen Fahrzeugen vorliegt. Bei Betrachtung der elektrischen Fahrzeuge wird deutlich, dass im Hochgeschwindigkeitsverkehr trotz geringerer Energieeinsparung pro Streckenkilometer das Kosteneinsparpotential aufgrund der größeren jährlichen Fahrleistung größer als im Fernverkehr ist. Für die elektrischen Fahrzeuge liegen die Einsparpotentiale zwischen 12 und 19 Euro/kg.

2.2.2 Energieeinsparpotential durch energetisch optimiertes Bremskonzept

Wie bereits bei der Untersuchung des Masseneinflusses auf den Energiebedarf eines Fahrzeugs gezeigt werden konnte, hat das generatorische Bremsvermögen bei elektrischen Fahrzeugen einen großen Einfluss auf den resultierenden Energiebedarf. Beim Zugkonzept Next Generation Train (NGT) des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sind alle Räder elektrisch angetrieben [7]. Neben einem gesteigerten Beschleunigungsvermögen ist dadurch auch das generatorische Bremsvermögen stärker ausgeprägt als bei konventionellen Zügen mit nur einem Teil angetriebener Räder bzw. Achsen.

Das Bremskonzept des NGT sieht den geschwindigkeitsabhängigen Einsatz verschiedener Bremssysteme vor. Für die Zulassung des Zuges muss gewährleistet werden, dass die nach TSI vorgeschriebenen Bremswege eingehalten werden. Um einen wirtschaftlichen und energieeffizienten Betrieb zu gewährleisten sollen Betriebsbremsungen möglichst verschleißfrei und rekuperativ erfolgen. Bei hohen Geschwindigkeiten wird daher aerodynamisch und generatorisch gebremst, im mittleren Geschwindigkeitsbereich werden zusätzlich lineare Wirbelstrombremsen eingesetzt. Der betriebliche Bremsweg kann so auf 10 km reduziert werden, wobei der größte Teil der Bremsenergie bei aufnahmefähigem Netz zurückgespeist werden kann. Durch den Einsatz der linearen Wirbelstrombremse und der aerodynamischen Bremse kann die Betriebsbremsung komplett verschleißfrei realisiert werden.

Zur Realisierung der Schnellbremsung reichen die Bremssysteme der Betriebsbremsung nicht aus. Um die für die Schnellbremsung erforderliche Bremskraft aufzubringen, ist ein zusätzliches Bremssystem notwendig, welches möglichst auch als Feststellbremse geeignet sein sollte. Die Scheibenbremse als Reibbremse erfüllt diese Anforderung. Mechanische sowie thermische Berechnungen ergeben, dass der Rad/Schiene-Kontakt vollständig von der Scheibenbremse ausgenutzt werden kann, so dass auch im Falle eines Totalausfalls der generatorischen Bremse die Schnellbremsung realisiert werden kann. Vor allem bei hohen Geschwindigkeiten ist die realisierbare Bremskraft größer als die erforderliche Bremskraft [Abb. 5]. Dies führt dazu, dass bei hohen Ausgangsgeschwindigkeiten die von der TSI geforderten maximalen Bremswege deutlich unterschritten werden. Dies ist insofern beachtlich, weil zusätzlich zu den in der TSI festgelegten Anforderungen bei der Auslegung sowohl Rückenwind als auch die Hangabtriebskraft infolge Streckengefälle berücksichtigt wurden.

Im Ergebnis wird bei der Schnellbremsung der Großteil der kinetischen und potentiellen Energie des Fahrzeugs über den Rad/Schiene-Kontakt übertragen (generatorische Bremse + Reibbremse) [Abb. 6]. Dabei kann selbst in diesem extremen Einsatzfall mehr als 40 % der am Rad verfügbaren Bremsenergie für die Rückspeisung genutzt werden.

Das Bremskonzept des NGT zeigt, dass durch verstärkten Einsatz der generatorischen Bremse signifikante Energieeinsparungen erzielt werden können. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein aufnahmefähiges Netz, was insbesondere bei schwachen DC-Netzen nicht gewährleistet werden kann. Bei dieselbetriebenen Fahrzeugen ist eine Rückgewinnung von Bremsenergie grundsätzlich nicht möglich.

2.2.3 Energieeinsparpotential durch fahrzeugseitige Energiespeicher

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten gezeigt werden konnte, ist ein wesentlicher Nachteil dieselbetriebener Fahrzeuge die fehlende Möglichkeit zur Rückgewinnung von Bremsenergie. Im Rahmen des NGT-Projektes des DLR wurde daher das Einsparpotential ermittelt, das durch die Kombination eines diesel-hydrmechanischen Antriebs mit Energiespeichern realisiert werden kann. Dabei wurde das Konzept eines hybriden Energiespeichers entwickelt, der aus einer Kombination von Doppelschichtkondensatoren und Batterien besteht [8]. Die Batterien werden hier eingesetzt, um die Hilfsbetriebe und Nebenaggregate zu versorgen, während die Doppelschichtkondensatoren über einen Elektromotor zur Unterstützung der Traktion eingesetzt werden. Ein Vorteil dieses Konzepts ist, dass die Traktionsleistung auch dann gesteigert werden kann, wenn die Doppelschichtkondensatoren bereits entleert sind, da die Batterie die Versorgung der Hilfs- und Nebenbetriebe übernimmt und somit diese sonst vom Dieselmotor aufgebrauchte Leistung als zusätzliche Traktionsleistung zur Verfügung steht.

Die größere Traktionsleistung des hybriden Antriebskonzepts wirkt sich im Zusammenspiel mit einem Fahrerassistenzsystem zusätzlich positiv auf den Energiebedarf aus. Durch die größere Beschleunigungsleistung wird ein Fahrzeitgewinn erreicht, der dann vom Fahrerassistenzsystem vor der nächsten Bremsphase für energiesparendes Ausrollen eingesetzt werden kann.

Für das vom DLR für Dieseltriebwagen entwickelte Konzept wurden im verwendeten Referenzfahrprofil Verbrauchseinsparungen von 10% bei gleichzeitiger Reduzierung der in den mechanischen Bremsen umgesetzten Arbeit und damit auch des Bremsverschleisses berechnet [Abb. 7]. Der direkte Vergleich der einzelnen Anteile des Energiebedarfs mit dem

konventionellen Fahrzeug zeigt, dass sich aufgrund des geringeren Energieumsatzes im Verbrennungsmotor auch der Kühlbedarf verringert. Im Antriebsstrang und Getriebe steigen die Verluste im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug an, was auf die zusätzliche übertragene Leistung während der Rückspeisung der Bremsenergie zurückzuführen ist. Zusammenfassend ist der Einsatz von Energiespeichern in dieselbetriebenen Fahrzeugen dazu geeignet, sowohl die Fahrleistungen zu steigern als auch den Energiebedarf zu reduzieren.

3 Betriebliche Ansätze

3.1 Fahrerassistenzsysteme

Der Ansatz, Fahrerassistenzsysteme für energieeffizienten Bahnbetrieb zu nutzen, verspricht ein gutes Kosten-Nutzen Verhältnis, verlangt aber komplexe mathematische Grundlagen [9]. Die in der Entwicklung oder im Einsatz befindlichen Systeme unterscheiden sich stark in Funktionalität, Architektur und Benutzerschnittstelle. Hierbei bietet sich die folgende Klassifikation der Assistenzsysteme an:

- 1) Optimierung einer Zugfahrt nach Plandaten oder Ist-Daten für einen Zug.
- 2) Optimierung der Zugfahrten auf einer Strecke. Typischerweise sind dies mehrere hintereinander fahrende Züge. Auch die so genannten „fliegende“ Überholungen und Kreuzungen sind in dieser Kategorie enthalten.
- 3) Optimierung von Teilnetzen oder Netzbereichen. Hier müssen neben aufeinanderfolgenden Zügen auch kreuzende berücksichtigt werden.

Als zweiter Ansatz der Klassifikation basiert auf dem notwendigen Datenaustausch:

- 1) Die erste Generation von Assistenzsystemen nutzt auf dem Fahrzeug vorliegende Daten.
- 2) Die zweite Generation verwendet Ist-Daten von den unmittelbar umgebenden Zügen.
- 3) Die dritte Generation, führt eine dynamische Optimierung für einen Netzbereich in einer zentralen streckenseitigen Instanz durch und verteilt Empfehlungen an die Züge in diesem Bereich.

3.2 Verkehrsflussoptimierung

Für eine Optimierung des Betriebsablaufs im Bahnverkehr ist ein Zusammenspiel von Fahrerassistenzsystemen (FAS) sowie streckenseitigen Systemen erforderlich. Um den Verkehrsfluss gleichmäßiger zu gestalten und damit Energie sparen zu können, benötigen die FAS Informationen über die Streckenbelegung bzw. über die Zeitpunkte, an denen bestimmte Punkte an der Strecke (z.B. Signale) passiert werden sollen. Die Streckenzentrale sendet die Informationen über die Zielpunkte an die entsprechenden Züge, die wiederum ihrerseits diesen Vorgaben folgen. Eine gewisse Ähnlichkeit besteht mit den in früheren Zeiten üblichen Verfahren der Verzögerungs- und Beschleunigungsanzeiger (Zs4 und Zs5), mit denen der Fahrdienstleiter dem Zug Anweisungen gegeben hat. Die Zielpunktvorgaben, die von der Streckenseite berechnet werden, sollten geringfügige Reserven enthalten, um den FAS Spielraum für zugbezogene Optimierungen zu geben, Reaktionszeiten des Fahrers

und dem FAS bekannte Abweichungen von den üblichen Zugeigenschaften zu berücksichtigen.

Notwendig sind für die Umsetzung Kommunikationssysteme, definierte Schnittstellen und eine Ausrüstung sämtlicher Fahrzeuge, die auf der Strecke fahren. Zu prüfen ist, inwiefern auf hoch belasteten Hauptstrecken eine Nutzung eines solchen Systems im Rahmen der diskriminierungsfreien Vergabe von Trassen vorgeschrieben werden kann. Eine Unterstützung für die Verbreitung des Systems ist es, eine Kompatibilität von verschiedenen FAS-Systemen herzustellen. Dann bleibt den Eisenbahnverkehrsunternehmen die Wahl, welches System sie verwenden. Dafür sind zwingend normierte Schnittstellen zwischen Strecke und Fahrzeug erforderlich.

Bei der DB ist ein System unter dem Titel „FreeFloat“ [10] in der Erprobung. Die Systeme Konflikterkennung, Konfliktlösung und Zuglaufregelung sorgen in der Betriebszentrale dafür, dass z.B. die Fahrprofile von auf langsamere Züge auflaufende Züge „verbogen“ werden. Dies bedeutet, dass die Züge langsamer werden. Was an dieser Stelle einen positiven Effekt auf den Streckendurchsatz und den Energiebedarf hat, führt natürlich zu einer Verspätung von schnellen Zügen. Daher muss auch immer eine Abwägung derartiger Maßnahmen durchgeführt werden. Die Prüfung von Dispositionen in diesem Zusammenhang wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung ist die schwedisch-norwegische Erzbahn, wo die schweren Züge vom System CATO (Computer Aided Train Operation) gelenkt werden [11]. Die Strecke Gällivare-Kiruna-Narvik ist eingleisig. Hier ist es aus energetischen Gründen naheliegender, dass die bis zu 8000 Tonnen schweren Erzzüge so gelenkt werden, dass nicht sie, sondern die leeren Gegenzüge in den Kreuzungsbahnhöfen anhalten müssen. Mit dem Arlanda Express in Stockholm findet CATO auch im Personenverkehr Anwendung. Im Rahmen des EU-Projekts „Railenergy“ wurde das Protokoll EETROP [12] als standardisierte Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Zug entwickelt, welches bei CATO zum Einsatz kommt.

In Dänemark befindet sich ein System namens „GreenSpeed“ seit 2011 in allen Vorortzügen im Einsatz, welches ebenfalls Informationsaustausch zwischen Zug und Streckenseite ermöglicht. Allerdings ist derzeit noch keine kooperative Verkehrsflussoptimierung implementiert [13].

3.3 Ansätze zur optimierten Disposition

Im Rahmen der Grundlagenforschung beschäftigt sich das DLR mit der Frage, inwiefern gezielte Dispositionsentscheidungen (hauptsächlich die Änderung der Zugreihenfolge) zur Einsparung von Energie führen können. Dabei gilt als Randbedingung, dass die Gesamtverspätung und die Streckenleistungsfähigkeit möglichst nicht negativ beeinflusst werden.

Für die Untersuchung von Dispositionsstrategien ist auf Grund der komplexen Fragestellung und Randbedingungen eine Methode erforderlich, die zum einen ein Abbild der Infrastruktur und des Betriebes und zum anderen Dispositionsstrategien beinhaltet. Die Prioritäten orientieren sich an den Eigenschaften der Modellzüge. Diese werden bei einem Konfliktfall in der Simulation folgendermaßen priorisiert:

Standard - Fernverkehr vor Regionalverkehr vor Güterverkehr

Priorität Energie – Reihenfolge absteigend nach Mehrenergiebedarf durch außerplanmäßigen Halt

Priorität Masse – Reihenfolge absteigend nach Masse

Priorität Geschwindigkeit – Reihenfolge absteigend nach Betriebsgeschwindigkeit

Priorität Zeit – Reihenfolge absteigend nach Zeitverlust durch außerplanmäßigen Halt

In einem Konfliktfall muss der benachteiligte Zug meist außerplanmäßig anhalten, wodurch der Energiebedarf steigt. Entweder geschieht dies bei Streckeneinmündungen vor dem gemeinsamen Abschnitt mit dem Belegungskonflikt oder durch eine Überholung vor dem Konfliktabschnitt.

Zur Bewertung der Auswirkungen eines außerplanmäßigen Halts wurden alle Modellzüge aus ihrer typischen Betriebsgeschwindigkeit zu einem Halt gebracht und ohne Aufenthaltszeit wieder auf die Betriebsgeschwindigkeit beschleunigt. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Abbildung 8 dargestellt.

Hier wird deutlich, dass von außerplanmäßigen Halten neben den beladenen Güterzügen auch der ICE stark betroffen ist. Während der Fahrzeitverlust bei einem beladenen Erzzug – diese gehören zu den schwersten Güterzügen - am größten ist, hat der ICE den größten Energiemehrbedarf bei einem zusätzlichen Halt.

Im nächsten Schritt wurden Simulationen an einem stark befahrenen Eisenbahnknoten (konkret in Lehrte) durchgeführt, bei denen die Zulpriorität stringent zur Konfliktlösung herangezogen wird. Dabei spielen die üblichen Ziele wie z.B. der Abbau von Verspätungen von langlaufenden Personenzügen keine Rolle. Es sollen auch die Auswirkungen einer bedingungslosen Bevorzugung des Güterverkehrs geprüft werden. Dies ist eine durchaus realistische Annahme für einen begrenzten Untersuchungsraum eines Eisenbahnknotens, da dort zur Abwicklung eines flüssigen Betriebes durchaus andere Maßstäbe angesetzt werden können als auf längeren Strecken.

In Abbildung 9 sind der Energiebedarf (Traktionsenergie) und die Verspätungssumme für die verschiedenen Prioritätsszenarien ersichtlich. Die Verspätungssumme ergibt sich aus der Summe der Verspätungen bei Ausbruch der Züge aus der Simulation. Im ungestörten Soll-Fahrplan gibt es keine Verspätungen, der Energiebedarf liegt bei 28,5 MWh. Der gestörte Fahrplan dient als Referenz für die weiteren Szenarien. Die Ergebnisse des Szenarios „Prio Energie“, bei dem die Züge entsprechend des erforderlichen Energiebedarfs eines zusätzlichen Anfahrvorgangs priorisiert werden, zeigen, dass die Fokussierung auf Energieeffizienz nennenswerte Einsparungen ermöglicht. Der Energiebedarf sinkt um 14,6 %. Absolut gesehen wird sogar weniger Energie benötigt als im ungestörten Sollfahrplan. Die Verspätungssumme steigt aber an, da an einigen Stellen Züge priorisiert werden, die langsamer sind. Das Szenario Prio Masse, bei dem die schwersten Züge priorisiert werden, zeigt ähnliche Ergebnisse, allerdings ist hier die Verspätungssumme höher als bei „Prio Energie“. Die Ergebnisse des Szenarios Prio Geschwindigkeit, bei dem die standardmäßige Priorisierung (schnellste Züge zuerst) angewendet wird, lassen sich durch das Verbiegen der Züge erklären. Durch das langsamere Hinterherfahren liegt der Energiebedarf niedriger. Erkennbar ist aber, dass die Verspätungssumme geringfügig niedriger als beim vorangegangenen Szenario liegt. Die Bevorzugung schneller Züge ist somit der Pünktlichkeit

zuträglich. Das Szenario Prio Zeit bedingt im Vergleich die höchste Verspätungssumme und den höchsten Energiebedarf. Die Priorität, die hier durch den Fahrzeitverlust definiert wird, hat allerdings einen positiven Effekt auf die Streckenbelegungszeit, welche im Bild nicht dargestellt ist.

Um die Verspätungen noch besser bewerten zu können, wurden diese nach Modellzug getrennt analysiert. Der ICE besitzt bei allen Priorisierungsstrategien die höchste oder zumindest eine hohe Priorität, daher wird dort die Verspätung in allen Fällen reduziert. Regionalverkehr und S-Bahn besitzen in den meisten Szenarien die niedrigste Priorität, daher sind hier – mit Ausnahme der „Prio Geschwindigkeit“ - die stärksten Verspätungsanstiege zu beobachten. Die Güterzüge haben insgesamt die größten Verspätungen, da für sie größere Einbruchsverspätungen angenommen wurden. Da sie bei „Prio Energie“ und „Prio Masse“ aber höher priorisiert sind, sind die Verspätungen hier geringer als bei einer Priorisierung nach Geschwindigkeit oder Zeitverlust.

3.4 Ausblick

Die Untersuchung hat gezeigt, dass sich die drei Optimierungsziele Energiebedarf, Pünktlichkeit und Streckenleistungsfähigkeit in einem Spannungsfeld befinden und hier ein Gesamtoptimum angestrebt werden sollte. Eine Untersuchung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen kann hier helfen, die besten Empfehlungen für die Disposition zu finden. Das DLR entwickelt eine Software für ein operatives Verkehrsmanagement, in dem verschiedene Gewichtungen der Optimierungskriterien getestet und bewertet werden können.

In Deutschland herrscht eine institutionelle Trennung von Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) statt. Da die Optimierung des Betriebsablaufs nur auf Seiten des EIU durchgeführt werden kann, der Nutzen von Energieeinsparungen aber nach derzeitigem Trassenpreissystem ausschließlich dem EVU zugutekommt, ist es nicht verwunderlich, dass die Aktivitäten von DB Netz primär auf eine Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit ausgerichtet sind. Eine EIU-unabhängige Betrachtung ermöglicht hier die Erreichung eines Optimums für das Gesamtsystem Bahn.

Die Fahrplananpassung im Störfall, die in den vorangegangenen Absätzen beschrieben wurde, kann auch für die Fahrplangestaltung interessant sein. Die Fahrplankonstruktion findet derzeit hierarchisch statt, wobei schnelle Züge Vorrang genießen. Nach der zu entwickelnden Bewertung des Optimums für das Gesamtsystem kann auch ein bestehender Fahrplan optimiert werden. Eventuell wird es dabei zu einer Benachteiligung des Personenverkehrs kommen. Mit dem Verfahren kann auch eine Quantifizierung der Auswirkungen auf den Personenverkehr vorgenommen werden.

4 Infrastruktureller Ansatz (Energieeinsparpotential an Langsamfahrstellen)

Ständige und temporäre Langsamfahrstellen können aus verschiedenen Gründen eingerichtet werden. Aufgrund der langsameren Geschwindigkeit als der sonst üblichen Streckengeschwindigkeit nehmen sie negativen Einfluss auf die theoretisch minimale Fahrzeit. Da nach der Verzögerung auf die Geschwindigkeit der Langsamfahrstelle wieder auf die Streckengeschwindigkeit beschleunigt wird, ist auch ein vermehrter Energiebedarf für Traktionsleistung vorhanden. Dies ist bei kurzen Langsamfahrstellen insbesondere der Fall,

da die Fahrt mit verringerter Geschwindigkeit Traktionsenergie einspart (z.B. geringerer Widerstand durch Luftreibung), jedoch die zusätzlich benötigte Energie zum Beschleunigen nicht ausgleicht. Ständige und kurze Langsamfahrstellen müssen unter Umständen eingerichtet werden, wenn Bahnübergänge nicht technisch gesichert werden, also nicht mit Lichtzeichen, Halbschranken oder Vollschranken ausgestattet sind. Alternativ kann durch Warntafeln (Andreaskreuz, Baken vor dem Bahnübergang, etc.), Warnsignalen (Pfeifen des Zuges) und freie Sicht auf den Zug (so genannte Sichtdreiecke) der Bahnübergang nicht technisch gesichert werden, so lange eine begrenzte Anzahl an Straßenverkehrsteilnehmern und Züge verkehren. Sind die Sichtdreiecke (z.B. durch Hecken, Gebäude) nur eingeschränkt vorhanden, muss oftmals am Bahnübergang die Geschwindigkeit der Züge herabgesetzt werden.

Die Auswirkungen einer solchen Langsamfahrstelle auf den Traktionsenergiebedarf wurden anhand fahrdynamischer Berechnungen untersucht und werden im Folgenden vorgestellt [14]. Der Traktionsenergiebedarf von Zugfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (Strecken- und Langsamfahrgeschwindigkeit) ist der Abbildung 10 zu entnehmen.

Für die Parameter der Strecke ist angenommen worden, dass kein Gleisbogen und keine Gradienten durchfahren wird. Für das Zugmodell ist die Baureihe 643 (Bombardier Talent) mit 630 kW Antriebsleistung angenommen worden. Da oftmals auf eingleisigen Nebenbahnen nicht technisch gesicherte BÜ mit Langsamfahrstellen vorhanden sind, wurde auch hier ein Triebzug mit Dieselmotor unterstellt. Aufgrund des geringeren Wirkungsgrades des Dieselmotors gegenüber einem rein elektrisch angetriebenen Zug ist der Energiebedarf nach Getriebe und Wandlung noch unvorteilhafter. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 40 % von der Energiezufuhr (Dieselkraftstoff) bis zur Traktionsleistung (am Rad) stellt sich der Dieselkraftstoffverbrauch in Litern folgendermaßen dar:

- 40 → 60 km/h: 0,51 Liter Diesel
- 20 → 60 km/h: 0,82 Liter Diesel
- 60 → 80 km/h: 0,68 Liter Diesel
- 40 → 80 km/h: 1,16 Liter Diesel
- 20 → 80 km/h: 1,47 Liter Diesel
- 60 → 100 km/h: 1,42 Liter Diesel
- 40 → 100 km/h: 1,87 Liter Diesel
- 20 → 100 km/h: 2,15 Liter Diesel

Ein stark vereinfachtes „Rechenspiel“ kann die dabei entstehenden Kosten verdeutlichen:

Die Züge müssen aufgrund einer Langsamfahrstelle die Geschwindigkeit auf 40 km/h verzögern und danach wieder auf 80 km/h beschleunigen. Je Vorgang werden 1,16 Liter Diesel benötigt. Bei 36 Zügen im Durchschnitt am Tag, kommen so zusätzliche Kraftstoffkosten im Jahr von ca. 18 000 € zusammen (Annahme Kraftstoffkosten: 1,20 €/Liter). Unter bestimmten Randbedingungen ist allein aufgrund der Kraftstoffkosten eine technische Sicherung des BÜ überlegenswert. Weitere Auswirkungen wie geringerer Fahrzeitverlust und geringerer Verschleiß an Schienen und Fahrzeug sowie höhere Sicherheit am Bahnübergang und Folgekosten durch Ausfall der Sicherungsanlage müssen abgewogen und mit in die Entscheidung einbezogen werden.

5 Zusammenfassung

Unter der Randbedingung kontinuierlich steigender Energiekosten ist der sparsame Umgang der Bahn mit der Energie ein Thema mit permanent steigender Bedeutung. Um hier ein Optimum zu erreichen, sind verschiedene Maßnahmen möglich. Der größtmögliche Effekt wird mit einer Kombination von betrieblichen, fahrzeugseitigen und infrastrukturseitigen Maßnahmen erreicht. Da die verschiedenen Maßnahmen auch in ihren zeitlichen Horizonten variieren, ist eine gestaffelte Einführungsstrategie sinnvoll.

6 Referenzen

- [1] <http://www.ecorailinnovation.de/innovations>, letzter Aufruf der Seite: 19.06.2013, 11:53 Uhr
- [2] Rüsich, F.: Entwicklung einer Branchen-Roadmap zur Energieeffizienzsteigerung im Bahnsektor auf Grundlage durchgeführter Potenzialanalysen, Diplomarbeit TU Berlin, Mai 2012.
- [3] Entwicklung eines Demonstrators für Ortungsaufgaben mit Sicherheitsverantwortung im Schienengüterverkehr – DemoOrt Abschlussbericht Phasen 1 und 2, Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik Band 8, 2009
- [4] Winter, J.; Lindemann, M.; Schlegel, S.; Kloos, H.: Driver Assistance System, RTR 2/2010, pp. 35 – 40
- [5] Dittus, H.; König, J.; Friedrich, H. E.: Energy Reduction of Railway Vehicles by Lightweight Design. In: 11th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, 2011, pp. 501-517
- [6] Technical Recommendation 100-001: Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock, UIC / UNIFE 2010
- [7] Winter, J. [Editor] Rail Technology Review Special "Next Generation Train". DVV Media Group. ISBN 978-3-7771-0435-5. ISSN 1869-7801
- [8] Dittus, H.; Hülsebusch, D.; Ungethüm, J.: Reducing DMU fuel consumption by means of hybrid energy storage, European Transport Research Review, DOI: 10.1007/s12544-011-0053-6, 2011
- [9] Howlett P.G. und Pudney, P.J.: Energy-Efficient Train Control. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 1995
- [10] Oetting, A., FreeFloat – Technologische Innovationen zur Steigerung der Kapazität im bestehenden Netz, in: Eisenbahntechnische Rundschau, Dezember 2010, Seite 824 ff.
- [11] CATO System, „Kiruna Electric Locomotives“, in: Railvolution, 2/2011, Seite 46
- [12] EETROP – Energy Efficient Train Operation, http://www.energy-efficiency-days.org/IMG/pdf/06_E-Eriksson_Panel_2_EETROP_RailenergyDay_23sept09.pdf, Esbjörn Eriksson, Transrail, 2009
- [13] Bergendorff, M., Christian Hage, "Cutting energy and boosting punctuality", über GreenSpeed der Dänischen Staatsbahn, in: Railway Gazette International, Juni 2012, Seite 19 ff.
- [14] Scheier B.: Arbeitspaketbericht AP 3130 des DLR-Projekts Next Generation Railway System, nicht veröffentlicht, DLR, Januar 2010

Abbildungen

Abb. 1: Konzeptionelles Energiemanagement in Schienenfahrzeugen: Funktionsbereiche und zugeordnete Komponenten

Abb. 2: Innovationsfelder im System Eisenbahn zur Steigerung der Energieeffizienz [1]

Abb. 3: Zusammenfassung der Untersuchung [2]

Abb. 4: Fahrzeugseitiges Energiemanagement in Schienenfahrzeugen: Funktionsbereiche und zugeordnete Komponenten

Abb. 5: Bremskonzept NGT: Betriebbremse, Fahrwiderstand, generatorische Bremse, aerodynamische Bremse, Wirbelstrombremse, Reibbremse

Abb. 6: Energieaufnahme [MJ] der einzelnen Bremssysteme bei einer Schnellbremsung.

Abb. 7: Vergleich Energiebedarf konventioneller und Hybrid-Dieseltriebwagen

Abb. 8: Auswirkungen eines außerplanmäßigen Halts auf Energiebedarf und Verspätung – ICE und Güterzüge sind am stärksten betroffen, S-Bahn und Regionalzüge am wenigsten

Abb. 9: Auswirkungen von Dispositionshandlungen mit Verbiegen von Fahrprofilen und Reihenfolgeänderung – der Energiebedarf lässt sich reduzieren, meist allerdings mit negativen Auswirkungen auf die Pünktlichkeit

Abb. 10: Traktionsenergiebedarf aufgrund Langsamfahrstellen

Tabellen

Tab. 1: Energiebedarfseinsparung verschiedener Fahrzeuge im UIC-Serviceprofil

Tab. 2: Kosteneinsparung verschiedener Fahrzeuge im UIC-Serviceprofil