



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Institut für Eisenbahnwesen,
Verkehrswirtschaft
und Seilbahnen

Karlsplatz 13, A-1040 Wien, Tel. +43/1/58801-23201, Fax DW -23299
Internet: www.eiba.tuwien.ac.at



Lastenstraße 38, A-1230 Wien, Tel. +43/1/865 67 55, Fax DW-16
e-Mail: office@psia.at Internet: www.psia.at

Untersuchungsbericht

RAILERGY

Potentiale für die Steigerung der Energieeffizienz im Eisenbahnwesen

Gefördert mit den Mitteln des ZIT im Rahmen der
Rationellen Energienutzung Wien 2003



Wien, im Juli 2004
DN 2003-076-021 - Seite 1 von 34

INHALT

1	AUFGABENSTELLUNG	3
2	EINLEITUNG	3
3	MASSNAHMENKATALOG	5
3.1	Fahrzeug – Konstruktion / Design.....	5
3.1.1	Verbesserung des Verhältnisses von Leergewicht zu Nutzlast.....	5
3.1.2	Reduktion des Rollwiderstandes.....	9
3.1.3	Verwendung von Fahrgestellen mit radial einstellbaren Radsätzen	10
3.1.4	Verwendung der Losrad - Technik	11
3.1.5	Erhöhung der Effizienz von dieselgetriebenen Fahrzeugen	11
3.1.6	Einsatz von fahrzeugseitigen Energiespeichern in Nahverkehrssystemen	12
3.1.7	Abwärmenutzung für Komforteinrichtungen	13
3.2	Fahrzeug - Betrieb	14
3.2.1	Energiesparende Fahrweise (ESF).....	14
3.2.2	Signalisierung der energiesparenden Fahrweise	15
3.2.3	Optimierung des Fahrplanes und des Verkehrsflusses	15
3.2.4	Maximale Ausnutzung der Rekuperationsbremse	16
3.2.5	Energieverbrauch für Komforteinrichtungen.....	17
3.3	Infrastruktur – Konstruktion.....	17
3.3.1	Trassierungsparameter	17
3.4	Infrastruktur – Betrieb	19
3.4.1	Netzseitige Maßnahmen zur Energiespeicherung	19
3.5	Energienutzung außerhalb des Bahnsystems.....	20
3.5.1	Nutzung der warmen Tunnelluft.....	20
3.5.2	Oberflächennahe Erdwärmenutzung.....	20
3.5.3	Nutzung der hydrothermalen Geothermie.....	22
3.5.4	Nutzung der Photovoltaik an Betriebsgebäuden.....	22
3.6	Systemansatz Modal-Split	23
3.6.1	Dieselelekttriebwagen, „gummibereifte Straßenbahn“, Anrufsammeltaxi	23
3.6.2	Nutzung des innerstädtischen ÖPNV für Gütertransporte	24
4	BEURTEILUNG & EMPFEHLUNG	26
5	LITERATUR	28

1 AUFGABENSTELLUNG

Der Eisenbahnverkehr gilt im Allgemeinen als sehr umweltfreundliche und energieeffiziente Verkehrsart. Der niedrige Rollwiderstand ist hier der wesentliche Faktor und systemimmanent. Aus diesem Grund blieben bis heute eine Reihe von Faktoren unberücksichtigt, welche den Eisenbahnbetrieb ohne Einschränkung der „Performance“ energiesparender, kostengünstiger und umweltfreundlicher machen könnten. Einige dieser Faktoren sind optimierte Betriebsabläufe, energieeffiziente Konstruktion von Triebfahrzeugen, Reduktion des unproduktiven Leergewichtes von Schienenfahrzeugen oder die Nutzung der Wärme und Abwärme in und an Tunnelbauwerken.

Ziel dieser Studie ist es, die Energieeinsparpotenziale systematisch darzustellen, die wirtschaftlichen Auswirkungen der Maßnahmenumsetzung aufzuzeigen und zu bewerten sowie die Implementierung der vorgeschlagenen Energieeinsparmaßnahmen gemeinsam mit den potenziellen Nutzern vorzubereiten. Damit kann ein Nutzen für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft erreicht werden.

Der Schwerpunkt dieser Studie zielt auf die Senkung des Energieverbrauchs und die Erhöhung der Umweltfreundlichkeit im System Eisenbahn ab. Die Bewertung schließt aber auch Aspekte wie Lärmschutz und Wirtschaftlichkeit ein. Durch die Neuartigkeit des hier gewählten Arbeitsansatzes ist somit ein deutlicher Know-how-Vorsprung zu erwarten.

2 EINLEITUNG

Wiewohl der Eisenbahnverkehr im Vergleich mit den anderen Verkehrs-Modi im allgemeinen umweltfreundlich und energieeffizient ist, bestehen trotzdem noch beachtliche Energieeinsparungspotenziale, welche zur Zeit noch ungenützt sind. Von der Systematik her können die Einsparungspotenziale folgendermaßen eingeteilt werden:

- **Reduktion des Primärenergiebedarfs:**
Dabei handelt es sich um die Energieeinsparungen im eigentlichen Sinne, die man nutzen kann, wenn beispielsweise Motoren mit besserem Wirkungsgrad verwendet werden. Man kann im diesem Zusammenhang auch von Erhöhung der Effizienz und Ausnutzung der eingesetzten (Primär-)Energie sprechen.
- **Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten:**
Auch bei steigender betrieblicher Effizienz des Eisenbahnsystems verbleiben noch eine Reihe von systembedingten Verlusten. Die kinetische Energie muss beim Abbremsen der Fahrzeuge wieder „abgebaut“ werden, ebenso wie die potenzielle Energie, die bei der Fahrt über eine Steigungsstrecke den Fahrzeugen zugeführt wurde. Einsparpotenziale bestehen darin, diese Energie nicht (nur) in Wärme umzuwandeln, sondern im System zu nutzen.
- **Deckung des Energiebedarfs aus erneuerbarer Energie:**
Geothermie stellt eine weitere Möglichkeit dar, den Bedarf an nicht erneuerbarer Energie zu reduzieren. Die Nutzung kann sowohl im Bahnsystem selbst erfolgen, etwa durch Verwendung von mit Erdwärme betriebenen Weichenheizungen, oder außerhalb

des Bahnsystems, etwa durch der in Eisenbahntunneln gewonnenen geothermischen Energie zur Beheizung von Wohnhäusern.

- Verlustenergienutzung außerhalb des Eisenbahnsystems:
Die Abwärme, die in Eisenbahn- oder U-Bahntunnel entsteht, kann wie die Geothermie aus Eisenbahntunneln zur Beheizung von Wohnhäusern verwendet werden.

Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal von energiesparenden Maßnahmen bildet die Tatsache, ob die Maßnahme bereits während der Konstruktion des Fahrzeuges bzw. Infrastruktur vorgesehen werden muss, oder ob die Maßnahmen nachträglich während des Betriebs gesetzt werden können. Dementsprechend generell einfacher und kostengünstiger erscheint die Umsetzung von betrieblichen Maßnahmen.

In Tabelle 1 sind die Handlungsansätze systematisch zusammengefasst. Für die Beurteilung von energiesparenden Maßnahmen sind die Grenzen fließend, sodass einzelne Maßnahmen auch mehreren Kategorien zugeordnet werden können. Der in Kap. 3 folgende Maßnahmenkatalog verwendet dennoch die dargestellten Kategorien; Maßnahmen sind darin jener Kategorie zugeordnet, in welcher der größte Nutzen aus ihrer Anwendung zu erwarten ist.

Tabelle 1: Systematik der Energieeinsparungspotenziale hinsichtlich Primärenergieeinsparung sowie Verlustenergie- und Geothermienutzung

		Konstruktion /Design	Betrieb
Fahrzeuge	Traktion	Reduktion des Primärenergiebedarfs	Reduktion des Primärenergiebedarfs
		Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten	Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten
		-	Verlustenergienutzung außerhalb d. Bahnsystems
	Hilfsbetriebe	Reduktion des Primärenergiebedarfs	Reduktion des Primärenergiebedarfs
		Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten	Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten
		-	Verlustenergienutzung außerhalb d. Bahnsystems
Infrastruktur	Reduktion des Primärenergiebedarfs	-	
	Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten	Deckung des Energiebedarfs aus Systemverlusten	
	Energiebedarf aus erneuerbarer Energie decken	Energiebedarf aus erneuerbarer Energie decken	
Verkehrssystem		Veränderung des Modal-Splits zu energieeffizienten Verkehrsmitteln	

3 MASSNAHMENKATALOG

3.1 Fahrzeug - Konstruktion / Design

3.1.1 *Verbesserung des Verhältnisses von Leergewicht zu Nutzlast*

Beschreibung der Maßnahme

Im Eisenbahnwesen besteht seit langem ein sehr ungünstiges Verhältnis zwischen dem Leergewicht des Beförderungsmittels und der beförderten Nutzlast. Darunter sei hier nicht das Thema Leerfahrten verstanden, sondern die Verhältnisse, betrachtet bei voll beladenen Fahrzeugen. Der Grund für die Missachtung dieses auffälligen Missverhältnisses dürfte im geringen Rollwiderstand der Bahn liegen, der für das Weiterbewegen des Zuges deutlich weniger Energie erfordert als beim Straßenverkehr.

Von wesentlicher Bedeutung ist ja, dass die Massen jeweils auch auf Maximalgeschwindigkeit beschleunigt bzw. Steigungsstrecken empor bewegt werden müssen. Bewegungs- und potenzielle Energie kann beim Bremsen zurückgewonnen werden. Diese Rückgewinnung ist jedoch mit großen Verlusten behaftet, sodass auch hier der Vermeidung des Energiebedarfes und daraus resultierenden Verbrauches der Vorrang zu geben ist.

Wie der Vergleich von Hochgeschwindigkeits- und Gütertransportsystemen zeigt, ist es nicht unbedingt erforderlich, Aluminium oder High-tech-Werkstoffe anstelle von Stahl zu verwenden, um (Leer-)Gewicht zu sparen. Ein mindestens gleich großes Potenzial liegt in der Konstruktion und Systemwahl: Gliederzüge wie der TGV oder der Thalys besitzen, bezogen auf dieselbe Fahrgastkapazität, weniger Drehgestelle (Abbildung 5-1) und somit weniger Leergewicht als konventionelle Systeme wie beispielsweise der ICE; Die Rollende Landstraße (ROLA), bei der die Zugmaschine des LKW-Zuges mitgeführt wird, hat ein schlechteres Nutzlastverhältnis als ein Containerwagen.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Sowohl beim Personen- als auch beim Güterverkehr bestehen große Gewichtseinsparungspotenziale. Gelingt es, die unproduktive Masse zu reduzieren, also alle jene Teile, die man nur dazu benötigt, um die produktive Masse (zu transportierende Personen und Güter) zu transportieren, dann reduziert sich gleichzeitig proportional der Energieaufwand, der notwendig ist, um die Personen, Güter und Fahrzeuge zu beschleunigen bzw. über Steigungsstrecken zu bewegen. Nach dem linearen physikalischen Zusammenhang von kinetischer [$E=mv^2/2$], potentieller Energie [$E=mgh$] und Masse bedeutet 10 % weniger Masse auf eine Endgeschwindigkeit zu beschleunigen 10 % weniger Bedarf an Antriebsenergie.

In Tabelle 2 ist die Masse des leeren, betriebsbereiten Zuges je Sitzplatz für die wichtigsten Hochgeschwindigkeitszugsysteme in Europa zusammengestellt. Man erkennt daran deutliche Unterschiede. Während mit dem deutschen ICE knapp mehr als eine Tonne benötigt wird, um einen Reisenden zu transportieren, kommt der französische TGV mit deutlich weniger als einer Tonne aus. Der Doppelstock-Triebzug TGV-Duplex benötigt nur 740 kg Zugmasse, um

einen Passagier mit bis zu 300 km/h zu befördern. Damit benötigt der TGV-D um mehr als 2/3 weniger „unproduktive“ Masse als der ICE 1. Ähnlich günstig wie der TGV-D ist das spanische Talgo-Pendular-System (Abbildung 5-2). Die Firma Talgo [1] entwickelt allerdings zur Zeit eine Doppelstockversion, die unter 700 kg Zugmasse pro Passagier besitzen wird (Abbildung 5-3).

Erreicht wird diese Gewichtsreduktion im wesentlichen durch Einsparung von Drehgestellen. Das Gewicht eines Drehgestelles und der dazugehörigen Radsätze beträgt rund 6,5t, wobei der Rahmen einen erheblichen Anteil daran hat. Verwendet man bei einem Triebzug anstelle der konventionellen Wagen mit 26,4 m Länge und zwei zweiachsigen Drehgestellen (ICE) nur etwa 18 m lange Wagen, welche sich über sog. Jacobs-Drehgestelle an den Wagenenden jeweils auf einem halben zweiachsigen Drehgestell abstützen (TGV), erreicht man eine wesentliche Gewichtsreduktion.

Das Strukturgewicht eines Wagens steigt mit der dritten Potenz der Stützweite! Je kürzer ein Fahrzeug gebaut wird, desto leichter und preiswerter wird die Konstruktion. Umso leichter die Konstruktion eines Fahrzeuges ist, desto weniger Masse mit beschleunigt und verzögert, desto weniger wird der Fahrweg beansprucht und umso geringer muss die Leistung der Fahrmotoren sein [46].

Tabelle 2: Charakteristische Betriebsdaten der wichtigsten europäischen Hochgeschwindigkeitszugsysteme

Quelle:	4	4	4	2	1	1	1	3
	ICE 1	ICE 2	ICE 3	ICE-T	eurostar	TGV-A	TGV-D	Talgo
Vmax [km/h]	280	280	330	230	300	300	300	350
Konfiguration	T+12+T	T+7	8	7	T+18+T	T+10+T	T+8+T	T+12
Achsen	56	32	32	28	46	30	26	17
Länge d Zuges [m]	357,9	205,0	200,0	184,4	393,7	238,0	200,2	177,7
apm [1/m]	0,16	0,16	0,16	0,15	0,12	0,13	0,13	0,10
dL(apm) [dB]	+0,2	+0,2	+0,3	+0,1	-1,1	-0,8	-0,6	-2,0
Leermasse [t]	782	410	435	368	752	444	380	254
Plätze	669	391	404	382	794	485	516	318
Leermasse/Platz	1,17	1,05	1,08	0,96	0,95	0,92	0,74	0,80
Massereduktion zu ICE1	0%	-10%	-8%	-18%	-19%	-22%	-37%	-32%
Leistung [kW]	9600	4800	8000	4000	12200	8800	8800	8000
Leistung/LeerM [kW/t]	12,3	11,7	18,4	10,9	16,2	19,8	23,2	31,5
Leistung/Platz [kW/Pl]	14,3	12,3	19,8	10,5	15,4	18,1	17,1	25,2

1 Perren Brian: *der TGV - mit hoher Geschwindigkeit zum Erfolg*. Minirex, Luzern 2003

2 Riechers Daniel: *ICE - Neue Züge für Deutschlands Schnellverkehr*. Transpress, Stuttgart 2001

3 Koschinski Konrad, Krolow Michael: *Neigetechnik in Europa*. Eisenbahn Journal, Special-Ausgabe 4/2001

4 Kle Wolfgang: *Die ICE Familie*. Eisenbahn Journal, Special 5/99

Für den schienengebundenen Nahverkehr sei das Beispiel der ÖBB Triebwagengarnituren Baureihe 4020 und Baureihen 4023/4024 angeführt. Bei der Baureihe 4020 handelt es sich um die S-Bahnfahrzeuge, wie sie gegenwärtig auf der Wiener Schnellbahn bzw. generell im S-Bahnverkehr eingesetzt werden. Die Baureihen 4023/4024 repräsentieren die neue Generation

von S-Bahnfahrzeugen, deren Prototypfahrzeuge gerade getestet und zugelassen werden. Bei der Baureihe 4023 handelt es sich um eine 3-teilige Garnitur für den Regionalverkehr, während die 4-teilige Baureihe 4024 für den S-Bahneinsatz vorgesehen ist.

Tabelle 3 fasst wieder die wichtigsten Fahrzeugdaten und die pro Fahrgast erforderliche Leermasse zusammen. Zieht man in die Betrachtung nur die Sitzplätze ein, dann benötigen die neuen Fahrzeuge um 8 bzw. 16 % weniger Masse für die Beförderung eines (sitzenden) Fahrgastes. Anders wird das Bild, wenn man Sitz- und Stehplätze, also die gesamte Fahrzeugkapazität, betrachtet. In dieser Betrachtung benötigt das alte Fahrzeug die wenigste spezifische Masse, um einen (stehenden bzw. sitzenden) Fahrgast zu befördern, während das neue 4-teilige Fahrzeug um 19 und das 3-teilige Fahrzeug sogar um 46 % mehr Leermasse für die Beförderung eines Fahrgastes benötigt. Ein Grund für die Verschlechterung des Verhältnisses zwischen Leermasse und Anzahl der beförderbaren Passagiere ist jedenfalls in den höheren Komfortanforderungen zu suchen, welche sich in den letzten 30 Jahren auch im ÖPNV entwickelt haben.

Tabelle 3: Charakteristische Betriebsdaten der wichtigsten elektrischen Nahverkehrstriebwagen der ÖBB

Quelle: ÖBB, Traktionsstandort Floridsdorf (http://land.heim.at/waldviertel/242405/index.htm)	nur SITZPLÄTZE			SITZ- & STEHPLÄTZE		
	4020	4023	4024	4020	4023	4024
Vmax [km/h]	120	140	140	120	140	140
Achsen	12	8	10	12	8	10
Länge d Zuges [m]	69,4	52,1	66,9	69,4	52,1	66,9
apm [1/m]	0,17	0,15	0,15	0,17	0,15	0,15
dL(apm) [dB]	+0,6	+0,1	-0,0	+0,6	+0,1	-0,0
Leermasse [t]	127	96,1	116	127	96,1	116
Plätze	184	151	199	600	311	461
Leermasse/Platz	0,69	0,64	0,58	0,21	0,31	0,25
Masseveränderung zu BR 4020	0%	-8%	-16%	0%	+46%	+19%
Leistung [kW]	1200	1440	1520	1200	1440	1520
Leistung/Leerm [kW/t]	9,4	15,0	13,1	9,4	15,0	13,1
Leistung/Platz [kW/Platz]	6,5	9,5	7,6	2,0	4,6	3,3

Eine ähnliche Steigerung der Produktivität und Energieeffizienz ist auch im Güterverkehr möglich. Tabelle 4 enthält das Verhältnis zwischen der Nutzlast und der Masse des leeren, betriebsbereiten Güterwagens der wichtigsten europäischen Gütertransportsysteme auf der Bahn. Es wird deutlich, dass das verkehrspolitisch, wegen seiner logistischen Einfachheit stark forcierte System der Rollenden Landstraße (ROLA) extrem ineffizient ist, da für die Beförderung von 870 kg Gütern 1 Tonne Fahrzeug und Transportbehältnisse mitbefördert werden müssen. Wird nur der Sattelaufleger auf einem 4-achsigen Güterwagen transportiert, steigt das Verhältnis zwischen Nutz- und Leermasse bereits auf etwa 1:1 an.

Auch für die Güterwagen gilt, dass durch Einsparen von Drehgestellen eine Menge Tara eingespart werden kann. So können mit 1 Tonne Fahrzeug und Transportbehältnisse mit einem Doppelwagen mit drei 2-achsigen Drehgestellen bereits 1,74 Tonnen Güter transportiert werden. Am effizientesten ist das System Trailer-Zug, mit dem je eingesetzter

Tonne Leermasse fast doppelt so viel Güter befördert werden können. Der Trailer-Zug verzichtet gänzlich auf einen Wagenkasten mit (schwerem) Längsträger. Speziell konstruierte Sattelaufleger werden zur Beförderung auf der Bahn an beiden Enden auf Drehgestelle geschoben. Jeweils zwei Sattelaufleger ruhen auf einem Drehgestell und bilden so einen Gliederzug.

Tabelle 4: Charakteristische Betriebsdaten der wichtigsten europäischen schienengebundenen Güterverkehrssysteme

Quelle	1	1	1	1	2	1	1	
Typ	Rollende Landstraße (ROLA)	Sattelauf- lieger auf Wagen	Container- wagen	Container- wagen (LNT)	Trailer-Zug	Cargo- Beamer	Cargo-Sprinter (inkl. Antrieb für die Einheit!)	
Gattung	Saadkms	Sdgmns	Sggnoss	Sgnss				
Vmax [km/h]	100	100	120	120	120	120	100	120
Achsen [1]	8	4	6	4	2	4	14	14
LüP [m]	19,59	18,34	33,94	19,64	13,85	20,00	90,36	90,36
apm [1/m]	0,41	0,22	0,18	0,20	0,14	0,20	0,15	0,15
dL(apm) [dB]	4,3	1,6	0,7	1,3	-0,2	1,2	0,1	0,1
Leermasse Fzg [t]	21,5	21,0	30,0	19,0	6,0	28,0	121,0	121,0
Leermasse Contn. [t]	12,0	8,5	7,2	3,6	8,6	8,0	18,0	18,0
Nutzlast [t]	29,0	29,0	64,8	32,4	28,4	39,0	142,0	94,0
Gesamtmasse [t]	62,5	58,5	102,0	55,0	43,0	75,0	281,0	233,0
Nutzlast : Leermasse	0,87 : 1	0,98 : 1	1,74 : 1	1,43 : 1	1,95 : 1	1,08 : 1	1,02 : 1	0,68 : 1
Effizienz gegenüb. Rola	100%	114%	201%	166%	225%	125%	118%	78%

¹ Carstens Stefan: Die Güterwagen der DB-AG, Stand 1998. MIBA exklusiv Buch, 1998

² DB: Der Trailerzug, Vorteile und Chancen. München/Hannover 1990

³ Angaben des Systembetreibers CargoBeamer AG (www.cargobeamer.com)

Das Beispiel Trailer-Zug ist leider symptomatisch dafür, wie schwer sich innovative Lösungen durchsetzen. Seit Anfang der Neunzigerjahre fuhr der Trailer-Zug auf der Strecke zwischen München und Verona, ohne nennenswerte betriebliche Probleme und ohne jeden Unfall. Dennoch blieb dem System ein breiter Erfolg verwehrt. Ende 2003 wurde die Trailer-Zug-Betriebsgesellschaft verkauft und der Betrieb eingestellt.

Ein ähnliches Schicksal ist auch dem System Cargo-Sprinter beschieden. Beim Cargo-Sprinter handelt es sich um einen 5-teiligen Gütertriebzug für Containertransporte. Jeder Triebzug besitzt einen autarken Antrieb, der eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h erlaubt. Bis zu 5 Triebzüge können schnell zu einem Güterzug verbunden werden und von einem Führerstand gesteuert werden. Das System Cargo-Sprinter hat – trotzdem in der Fahrzeugmasse bereits der Antrieb enthalten ist – bei 100 km/h etwa dasselbe Verhältnis zwischen Nutz- und Leermasse wie der 4-achsigen Güterwagen für den Sattelauflegertransport. Dennoch blieb auch diesem System der kommerzielle Erfolg verwehrt. Nach einem mehrjährigen Testbetrieb hat die Deutsche Bahn die Triebzüge im Jahr 2003 abgestellt und zum Verkauf angeboten.

Zur Zeit wird gerade wieder ein neues, intermodales Güterverkehrssystem entwickelt, der sog. CargoBeamer (Abbildung 5-6,

Abbildung 5-7). Dabei wird versucht, die „Nachteile“ des Trailerzuges insoweit zu beseitigen, als nicht die Sattelaufleger die mechanische Verbindung zwischen den Drehgestellen bilden, sondern Niederflurwagen mit sogenannten Wagonaufsätzen, in welche die Sattelaufleger, Container oder Wechselaufbauten verladen werden. Damit ist beim CargoBeamer mehr Leermasse zur Beförderung erforderlich als beim Trailerzugsystem. Der CargoBeamer schneidet beim Verhältnis Nutz- zu Leermasse aber immer noch um 25 % besser ab als die Rollende Landstraße.

Gegenüber den konventionellen Systemen besteht somit beim Personenverkehr ein Traktionsenergieeinsparpotential von bis zu 25 %, beim Güterverkehr von bis zu 33 % (zieht man nicht die ROLA, sondern den konventionellen Güterwagen als Vergleichsbasis heran). Gegenüber der Rollenden Landstraße sind praktisch alle anderen Bahn-Systeme wirtschaftlicher und umweltfreundlicher.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Die sonstigen Umweltwirkungen sind generell positiv. Eine Verringerung der Räderanzahl je Zug führt auch zu einer Verringerung der Rollgeräuschemissionen. Weniger Masse bedeutet auch tendenziell weniger Verschleiß.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Anders als bei der Gewichtreduktion durch Verwendung von High-tech-Materialien, welche i. a. deutlich teurer in der Anschaffung sind als Stahl und Aluminium, ist die Gewichtseinsparung auf der Systemebene kostenneutral. Entscheidet man sich bereits bei der Auswahl des Systems für jenes mit hohem Nutz- zu Leermasseverhältnis, können sowohl bei der Investition als auch in der laufenden Erhaltung Kosten eingespart werden, zusätzlich zu den hier betrachteten Ersparnissen in Energiekosten.

3.1.2 Reduktion des Rollwiderstandes

Beschreibung der Maßnahme

Die Reibung in den vielen Lagern eines Zuges beeinflusst seinen Laufwiderstand. Bei geringen Geschwindigkeiten ist der Anteil des Rollwiderstandes die dominierende Komponente des Laufwiderstandes, mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nimmt dieser Anteil im Vergleich zum Luftwiderstand ab. Die bedeutendste Reduktion des Rollwiderstandes wurde bei den europäischen Bahnen durch die seit Jahren betriebene Umstellung von Gleit- auf Wälzlager realisiert.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Ein gewisses Potential besteht nach wie vor bei den Triebzügen: Durch intelligente Fahrzeugkonzepte und angepasste Fahrwerke lässt sich die Anzahl der benötigten Lagerstellen, vor allem aber das Zugsgewicht minimieren (siehe auch Kap. 3.1.1)

Ein weitaus wichtigerer Aspekt, der bei der Verwendung derartiger Drehgestelle auftritt, ist die Radialeinstellung der Radsätze (siehe Kap. 3.1.3)

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Reduktion der Anzahl der Drehgestelle und somit eine Verringerung des Rollwiderstandes ergeben eine Verringerung der Rollgeräuschemission.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Die Konstruktion neuer Schienenfahrzeuge unter Berücksichtigung der Rollwiderstandreduzierung wird praktisch keinen Einfluss auf die Kosten des Fahrzeuges haben. Demgegenüber bedingt der Umbau von Gleit- auf Wälzlager einen massiven Eingriff in die Wagenkonstruktion, welcher mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist.

3.1.3 Verwendung von Fahrgestellen mit radial einstellbaren Radsätzen

Beschreibung der Maßnahme

Auf dem Gebiet der Fahrgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen gibt es eine große Anzahl von Entwicklungen. Man kann dabei von 3 mechanischen Grundprinzipien ausgehen (siehe Abbildung 5-9):

- Elastisch geführte Radsätze
- Gegenseitig gekoppelte Radsätze (Stangenmechanismus oder Diagonalverbindung)
- Kastenseitig gekoppelte Radsätze

Fahrgestelle mit radial einstellbaren Radsätze haben den Vorteil, dass der Anlaufwinkel des Radsatzes im Gleisbogen kleingehalten wird.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Das Energieeinsparpotenzial dieser Maßnahme ist gering und beträgt maximal 1 % der erforderlichen Traktionsenergie. Radial einstellbare Radsätze verringern den Verschleiß bei der Kurvenfahrt und erhöhen somit die Lebensdauer von Radsätzen und Schienen, was die Betriebskosten senkt.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Radial einstellbare Radsätze bzw. Losradsätze verringern den Verschleiß und die Geräuschemission (=Kurvenquietschen) bei der Kurvenfahrt.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Es existieren Drehgestellrahmen derartiger Bauart, die mit jener eines Fahrgestells mit starrer Radsatzführung weitgehend baugleich sind. Diese können mit geringem Aufwand entsprechend adaptiert werden. Somit sind für den Einbau eines derartigen Fahrgestells keine wesentlichen Umbauten am Wagenkasten notwendig. Die Kosten beschränken sich hiermit lediglich auf die Anschaffung des Fahrgestells und dessen Einbau.

3.1.4 Verwendung der Losrad - Technik

Einachs-Losrad-Fahrgestelle nach dem Vorbild des spanischen *Talgo* weisen sehr gute Laufeigenschaften auf, da sie sich entsprechend der Position des vorlaufenden Wagens optimal auf

den Kurvenradius einstellen. Der *Talgo* ist ein Gliederzug in Jacobs-Bauweise, an dessen Gelenken sich jeweils ein Einachs-Einzelfahrwerk befindet, welches beide Wagenteile gleichermaßen trägt. Die Stellung der Radachse wird durch eine Rotation um die Hochachse mittels mechanischer Steuerung jeweils in die Winkelhalbierende zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wagenkästen eingestellt.

Dies hat den Vorteil, dass das Fahrwerk im Gleisbogen immer optimal eingestellt ist. Der Schräganlauf bei der Bogeneinfahrt reduziert sich daher nur auf das Drehgestell des Triebfahrzeuges, die restlichen Achsen befinden sich dann in der für die Bogendurchfahrt optimalen Stellung. Die Drehmomentenkopplung, bedingt durch das Fehlen der starren Achse, begünstigt die Laufruhe in der Geraden. Die mittlere Lebensdauer der Räder der Einzelradfahrwerke beträgt rund 1,8 Mio. km im Gegensatz von ca. 1 Mio. km beim starren Radsatz. Das Rad unterliegt damit einem geringeren Spurkranzanlauf, was die Laufleistung eines solchen Drehgestells erhöht und den Schienenverschleiß verringert [40].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Das Energieeinsparpotenzial dieser Maßnahme ist gering und beträgt maximal 1 % der erforderlichen Traktionsenergie. Radial einstellbare Radsätze bzw. Losradsätze verringern den Verschleiß bei der Kurvenfahrt und erhöhen somit die Lebensdauer von Radsätzen und Schienen, was die Betriebskosten senkt.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Radial einstellbare Radsätze bzw. Losradsätze verringern den Verschleiß und die Geräuschemission (=Kurvenquietschen) bei der Kurvenfahrt.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Der Einbau von radial einstellbaren Radsätzen bedingt oft einen massiven Eingriff in die Wagenkonstruktion und ist nachträglich nur in wenigen Fällen wirtschaftlich möglich. Eine derartige Maßnahme soll bereits bei der Konstruktion des Fahrzeuges berücksichtigt werden, um wirtschaftlich und aus Umweltschutzsicht sinnvoll zu sein.

3.1.5 Erhöhung der Effizienz von dieselgetriebenen Fahrzeugen

Beschreibung der Maßnahme

Heutige Dieselmotoren haben im Nennleistungsbereich einen hohen Wirkungsgrad, wird aber nicht die volle Traktionsleistung benötigt, sinkt der Wirkungsgrad. Gerade bei Verschublokomotiven werden kurzzeitig hohe Leistungen gebraucht, auf die der Antriebsmotor ausgelegt sein muss. Verschublokomotiven laufen nur selten im optimalen Bereich!

Eine Hybrid-Lokomotive, welche mit Elektromotoren angetrieben wird und den Strom aus Batterien, welche ihrerseits über einen dieselmotorgetriebenen Generator geladen werden, ist in der Lage, kurzzeitig große Leistungen abzugeben, ohne dass der Traktionsdieselmotor für den Großteil der Einsatzzeit überdimensioniert sein muss.

In Kalifornien bietet die Firma Railpower die sog. Green Goat und die Green Kid Hybrid Switch Lokomotive an, die mit Hybridantrieb ausgestattet ist (siehe Abbildung 5-10).

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Treibstoffeinsparungen und die damit verbundene Verringerung der Produktion an Treibhausgasen werden auf 50% - 80% geschätzt. Die Gesamtkosteneinsparungen betragen rund 30%. [51]

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Durch den verringerten Treibstoffverbrauch und der effizienteren Umsetzung der Energie wird auch eine Reduktion der Schadstoffproduktion von 80%-90% erzielt. [smog, NO_x]. Damit eignet sich eine derartige Lokomotive speziell für den Einsatz in umweltsensiblen Gebieten.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Eine Implementierung bedingt einen massiven Eingriff in die Antriebskonstruktion, wodurch nur der Einsatz neuer Lokomotiven sich wirtschaftlich rechnet. Die Anschaffungskosten für eine Hybridlok liegen in derselben Größenordnung wie bei vergleichbaren konventionellen Lokomotiven.

3.1.6 Einsatz von fahrzeugseitigen Energiespeichern in Nahverkehrssystemen

Beschreibung der Maßnahme

Prinzipiell sind 4 Systeme zur Energiespeicherung im Fahrzeug möglich [6], [7], [8], [21]:

- Batteriespeicher
- Supraleitende Spulen
- Drehmassenspeicher
- Kondensatoren

Batteriespeicher wirken sich durch die systembedingt häufigen und unvollständigen Be- und Entladevorgänge nachteilig aus, da sie dem „Memory-Effekt“ unterliegen.

Der Einsatz supraleitender Spulen zur Speicherung überflüssiger Traktionsenergie befindet sich derzeit im Entwicklungsstadium, da das System noch Sicherheitsrisiken in sich birgt. Beim japanischen Magnetschwebesystem MAGLEV wurde der elektrodynamische Schwebevorgang jedoch mit supraleitenden Spulen realisiert. Diese haben dort zwar nicht die Funktion der Energiespeicherung, sind aber mit all ihren bisher bekannten Risiken bereits im Einsatz in einem Verkehrsmittel. Das System steht vor der Einsatzreife [22].

Drehmassenspeicher in Form von Schwungrädern sind sowohl netz- als auch fahrzeugseitig im Einsatz. Fahrzeugseitig sind je nach Art des Triebfahrzeuges 3 Kombinationen möglich:

- Dieselelektrische Fahrzeuge (Booster- und/oder Speicherbetrieb)
- Dieselhydraulische Fahrzeuge (Drehmomentwandler nötig)
- Elektrische Fahrzeuge (Energierückgewinnung)

Für ein mit Drehmassenspeicher ausgestattetes Fahrzeug sind mehrere Betriebsmodi möglich:

- Bremsenergieerückgewinnung: beim Bremsen wird die Drehmasse beschleunigt und so die kinetische Energie erhalten
- Boosterbetrieb: die gespeicherte kinetische Energie wird zur Unterstützung des konventionellen Antriebs bei Beschleunigung genützt
- Emissionsfreier Betrieb: z.B. Abschaltung des Dieselmotors und Antrieb über Massenspeicher im Tunnel
- Hilfsbetriebsversorgung: Antrieb der Hilfsbetriebe über Massenspeicher
- Verbrauchsarmer Betrieb der Diesellaggregate

Auch für den Einsatz von Kondensatorspeichern bei Triebfahrzeugen gibt es bereits einige Beispiele. Bombardier Transportation hat einen statischen Energiespeicher (genannt MITRAC ENERGY SAVER) auf der Basis von zusammenschalteten Doppelschichtkondensatoren „Ultra-Cap“ entwickelt. Diese lassen ein Stadtbahnfahrzeug, welches mit zwei derartigen Anlagen ausgerüstet ist, unter Beschleunigung bis zu 1000m fahrdrahtlos fahren [23],[24].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Das Energieeinsparpotential liegt unter 5% des Traktionsenergiebedarfs. Der Kosteneinsparung beim Betrieb stehen höhere Investitionskosten für den Einbau der oben genannten Maßnahmen gegenüber. Die Auswirkungen auf die Life-Cycle-Costs der Fahrzeuge sind heute noch nicht abschätzbar, da es noch keine Erfahrungen im regulären Betrieb gibt.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Geräuschminderung durch Abschaltung der Dieselmotoren

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Der Kosteneinsparung beim Betrieb stehen höhere Investitionskosten für den Einbau oben genannter Maßnahmen gegenüber. Die Auswirkungen auf die Life-Cycle-Costs der Fahrzeuge sind heute noch nicht abschätzbar, da es noch keine Erfahrungen im regulären Betrieb gibt.

3.1.7 Abwärmenutzung für Komforteinrichtungen

Beschreibung der Maßnahme

Energieverluste werden hauptsächlich durch Fahrmotor, Stromrichter und Transformator verursacht. Diese Energieverluste können genutzt werden, um die wesentlichen Energieverbraucher der Komforteinrichtungen für die Fahrgäste, wie die Klima- und Heizungsanlagen, zu speisen. Die Verlustwärme wird mit Hilfe des Rankine-Prozesses in nutzbare Energie umgewandelt.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Verglichen mit der Verwendung einer Kaltluftanlage, wie sie im ICE 2 verwendet wird, liegt das Stromeinsparungspotential bei rund 36 MWh pro Jahr und Reisezugwagen.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Die Senkung der Energieverluste und die damit verbundene Nutzung mit Hilfe des Rankine Prozesses führt zu einer Verringerung des Treibhauseffektes (Kühlmittel).

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Zur Zeit gibt es nur Prototypen dieser Technologie, sodass eine Abschätzung der tatsächlichen (Investitions-)Kosten heute kaum möglich ist. Zieht man allerdings die Erfahrung mit neuen Technologien in anderen Sektoren heran, ist zu erwarten, dass bei entsprechenden Stückzahlen auch diese Klima/Heizaggregate zu denselben Investitionskosten wie konventionelle Geräte angeboten werden.

3.2 Fahrzeug - Betrieb

3.2.1 *Energiesparende Fahrweise (ESF)*

Beschreibung der Maßnahme

Bei der im Förderprogramm ISB (Innovatives System Bahn) des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie entwickelten und erprobten „klassischen ESF“ lässt man den Zug vor dem Abbremsen mit einer konstanten Verzögerung von $0,44 \text{ m/s}^2$ rollen. Bei der „dreistufigen ESF“ dagegen folgt auf das Rollen bis V_{roll} (z.B. 220 km/h) ein Abschnitt, in dem rein elektrisch gebremst wird. Erst im Geschwindigkeitsbereich unterhalb V_{brems} (z.B. 120 km/h) wird mit konstanter Verzögerung gebremst.

Mit Hilfe von Neuentwicklungen in der Simulationssoftware ist es nun möglich, den Traktionsenergieverbrauch für bestimmte Fahrplantrassen, Zugklassen und sogar Einzelzüge zu berechnen. Somit ist es beispielsweise bei den ÖBB nun möglich, ein energieverbrauchsabhängiges Trassenentgelt einzuheben. Mit dem Programmsystem EMAT, das auf dem zum Fahrzeitberechnung eingesetzten Fahrdynamikmodell DYNAMIS aufbaut, existiert seit Frühjahr 2002 die notwendige Software [25].

Der Erfolg der ESF hängt nicht zuletzt von einer entsprechenden Schulung der Triebfahrzeugführer ab. Weiters wird es in Zukunft notwendig sein, dem Triebfahrzeugführer im Führerstand Informationen über den Energieverbrauch und seine Fahrweise aus der Energiesimulationssoftware zu geben (s. dazu 3.2.2).

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Da bei dieser Fahrstrategie weniger mechanisch gebremst werden muss, lassen sich mit ihr etwa 2 % mehr Energie einsparen, als mit der klassischen ESF. Grundsätzlich gilt: Je höher die Fahrtgeschwindigkeit, desto höher die Möglichkeit der Energieersparnis.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Durch Reduktion der Intensität und der Anzahl der Bremsvorgänge werden die Bremsgeräuschemissionen sowie der Abrieb der Bremsklötze verringert.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Es wird ein geringer Aufwand für die Implementierung erwartet. Es handelt sich hierbei ausschließlich um Training der Triebfahrzeugführer.

3.2.2 Signalisierung der energiesparenden Fahrweise

Beschreibung der Maßnahme

Diese Maßnahme ist eine Ergänzung zu Punkt 3.2.1, indem man dem Triebfahrzeugführer ein Feedback gibt, ob er gerade energiesparend fährt bzw. welche Aktion erforderlich ist, um energieeffizient zu fahren. Im Buchfahrplan des Triebfahrzeugführers können dazu Abschalt-
punkte für die Fahrmotoren angegeben werden. Dies sind Positionen auf freier Strecke, ab
welchen der Zug alleine durch Ausrollen die Strecke bis zum Bahnhof bewältigt.

Dies kann, wie es bei NSR (Nederlandse Spoorwegen Reizigers) im sogenannten „Economy-
meter“ verwendet wird, auch durch ein Zusammenspiel von GPS-Positionsbestimmung, Fahr-
plandaten, Infrastrukturdaten und Fahrzeugdaten funktionieren [3].

Die Linien U1 und U2 der Nürnberger U-Bahn sind mit einem Signalsystem ausgerüstet,
welches über eine Geschwindigkeitssignalisierung jedem Zug die optimale Geschwindigkeit
zum Erreichen der nächsten Station vorgibt, wodurch die Anzahl der Beschleunigungs- und
Bremsvorgänge reduziert wird [4].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

In einem Nahverkehrsnetz können mit dieser Methode rund 6% an Traktionsenergie
eingespart werden [3].

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Durch das gezielte Abschalten der Antriebs wird die Geräuschemission des Motors und somit
des Gesamtsystems reduziert.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Hier wird das Fahrkonzept optimiert, wobei ein geringer technischer Aufwand für die Imple-
mentierung (Installation von Energieüberwachungselektronik) erwartet wird.

3.2.3 Optimierung des Fahrplanes und des Verkehrsflusses

Beschreibung der Maßnahme

In einer Optimierung des Fahrplanes, Reduktion der Stehzeiten in den Stationen und eine
moderne Steuerungs- und Sicherungstechnik (ETCS, LZB, GSM - R) besteht ein erhebliches
Reduktionspotential. Ziel dessen soll es sein, möglichst wenige Brems- und
Beschleunigungsvorgänge zu erzeugen und rein fahrplanbedingte Bremsungen überhaupt zu
vermeiden.

Die Erstellung eines „Schattenfahrplanes“ der auf dem Papier kürzere Stationshaltezeiten aus-
weist, bringen dem Triebfahrzeugführer eine Zeitreserve und helfen, den anschließenden
Beschleunigungsvorgang auf ein energetisches Optimum zu reduzieren [2].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Bei dieser Fahrstrategie wird weniger beschleunigt und gebremst als bei konventioneller Fahrweise, was den Energiebedarf um bis zu 5% verringert.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Durch Reduktion der Intensität und der Anzahl der Bremsvorgänge werden die Bremsgeräuschemissionen sowie der Abrieb der Bremsklötze verringert.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Die Kosten für die Implementierung eines „energieoptimierten Fahrplanes“ selbst sind gering. Man muss aber in vielen Fällen davon ausgehen, dass es betriebliche Hindernisse, etwa Kapazitätsengpässe, bei der Implementierung eines „energieoptimierten Fahrplanes“ gibt, deren Beseitigung z. T. massive Eingriffe und Änderungen in die Infrastruktur und die Sicherungsanlagen erfordert, was seinerseits hohe Investitionskosten verursacht.

3.2.4 Maximale Ausnutzung der Rekuperationsbremse

Beschreibung der Maßnahme

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

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Basierend auf den Informationen der Literatur können nach eigenen Abschätzungen durch die Verwendung einer Rekuperationsbremse etwa 2% der Bremsenergie eingespart werden.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Keine sonstigen negativen Umweltwirkungen.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Diese Maßnahme ergibt beim Einbau in neue Fahrzeuge kaum zusätzliche Kosten.

3.2.5 Energieverbrauch für Komforteinrichtungen

Beschreibung der Maßnahme

- Vorheizen der abgestellten Züge:
Dazu zählt einerseits ein Energiemanagement zur Beheizung von über Nacht

abgestellten Zügen. Entsprechend der Außentemperatur während der Nacht muss entschieden werden, ob der Zug die ganze Nacht über beheizt werden soll, oder erst am morgen vor Betriebsbeginn aufgeheizt wird. Bis zu einer Temperatur von -5°C sollte keine Beheizung während der Nachtstunden erfolgen [5].

- Belüftung während des Betriebes:
In Abhängigkeit vom Besetzungsgrad der Züge kann die Beheizungs- und Belüftungseinrichtung entsprechend geregelt werden. Dies wird durch eine Messung der CO_2 Konzentration im Wagen und einen Steuerungsmechanismus geregelt. Bei zu geringem Besetzungsgrad wird somit nicht mehr unnötig viel Frischluft zugeführt bzw. geheizt [2].

Ein weiterer Punkt ist eine bessere Isolierung und Wärmedämmung der Wagenkästen.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Verringerung der Heizkosten für Reisezugwagen.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Keine sonstigen negativen Umweltwirkungen.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Es ist von einem guten Standard bei neuen Fahrzeugen auszugehen. Wärmedämmende Maßnahmen per se bedingen massive Eingriffe in die Wagenkonstruktion.

3.3 Infrastruktur - Konstruktion

3.3.1 *Trassierungsparameter*

Beschreibung der Maßnahme

Der Steigungswiderstand ist neben dem geschwindigkeitsabhängigen Luftwiderstand die wichtigste Widerstandskenngröße in der Zugkraftgleichung. Dies insbesondere wegen seines Streckenbezuges, also seiner Bedeutung bezüglich der auftretenden Streckenlänge. Wenngleich Eisenbahnstrecken in der Regel in beiden Fahrtrichtungen etwa symmetrischen Betrieb aufweisen und rechnerisch eine Kompensierung des Steigungswiderstandes wegen seines wechselnden Vorzeichens einzutreten scheint, verbleiben innerhalb des meist durch Zwangspunkte vorgegebenen Trassierungsbandes im Längenschnitt Gestaltungsmöglichkeiten zur Optimierung desselben:

Trassierung im Längenschnitt:

1. Die Längsneigung einer Rampe sollte keinesfalls größer sein, als die Bremsneigung. Ansonsten müssten bergab fahrende Züge ebenfalls bremsen, was einer energetisch optimalen Trassierung widerspricht, da somit sowohl bei der Bergfahrt, als auch bei der Talfahrt unnötig viel Energie verbraucht würde!

2. Bremskurve bei unterirdischen Nahverkehrsanlagen: Wird eine unterirdische Nahverkehrsanlage im Längenschnitt so trassiert, dass die Strecke zwischen den Haltestellen jeweils einen Tiefpunkt hat, dann wird das Fahrzeug bei der Ausfahrt aus der Station durch das Gefälle (zusätzlich) beschleunigt, um vor der Einfahrt in die nächste Station durch die Steigungsstrecke wieder (zusätzlich) abgebremst zu werden.

Bogentrassierung:

3. Überhöhungsrampen können entsprechend der gewählten Trassierung verschiedene Rampenformen aufweisen. Rampen haben die Aufgabe, die durch die Krümmungszunahme beim Übergang von der Geraden auf den Kreisbogen steigende Seitenbeschleunigung durch eine Überhöhung der Außenschiene wieder abzubauen (Trägheitsgesetz, Bogenwiderstand). Hinsichtlich der Rampenform bleiben dem planenden Ingenieur einige Freiheiten. Zu erwähnen sind hierbei die lineare, die geschwungene, die Sinus- und die Bloss-Rampe.
4. Übergangsbögen: Der Übergangsbogen hat die Aufgabe, die Krümmung im Übergang zwischen Gerade und Kreis stetig zu verändern. Früher wurde im Eisenbahnbau aus Gründen der einfachen rechnerischen Behandelbarkeit die kubische Parabel verwendet. Bei der kubischen Parabel nimmt die Krümmung mit der Projektion der Bogenlänge auf die Abszisse zu. Mit der Umsetzung der HL-Richtlinien nimmt die Klothoide Einzug in die Eisenbahntrassierung. Bei der Klothoide nimmt die Krümmung linear mit der Bogenlänge zu. Neue Formen von Übergangsbögen und eine schwerpunktsabhängige Trassierung, wie sie in der Form des „Wiener Bogens“ entwickelt wurde, sollten Eingang in die Planung finden [48]. Hierbei unternimmt der Zug eine Kurvenfahrt in der gleichen Art wie ein Motorradfahrer, der knapp vor der Kurveneinfahrt kurz gegenlenkt, um die Schwerpunktsbahn während der Kurvenfahrt möglichst wenig zu beeinflussen. Es wird also von einer fiktiven Schwerpunktstrassierung ausgegangen, die mathematisch auf die reelle Gleisebene transformiert wird.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Von den hier aufgezählten Maßnahmen ist keine dramatische Energieeinsparung zu erwarten. Es kann mit einem geringen, in der Größenordnung von 1 % liegenden Ersparnis gerechnet werden.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Durch Reduktion der Intensität und der Anzahl der Bremsvorgänge werden die Bremsgeräuschemissionen sowie der Abrieb der Bremsklötze verringert.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Die Implementierung derartiger Trassierungselemente verringert den auftretenden Verschleiß, sowohl am Gleis, als auch am Fahrzeug. Es reduziert sich dadurch der Aufwand für die Erhaltung des Gleiskörpers. Einige Maßnahmen, wie der Wiener Bogen, können auch nachträglich, bei bestehenden Gleisanlagen im Zuge der laufenden Erhaltung kostengünstig angewendet werden.

Insgesamt gesehen sind die Energiekosten nicht so hoch, dass eine Verlegung von Bahnhöfen lohnenswert wäre. Bei der Neutrassierung von Strecken sollte man die verbesserten fahrdynamischen Randbedingungen in den Planungen jedoch berücksichtigen.

3.4 Infrastruktur - Betrieb

3.4.1 Netzseitige Maßnahmen zur Energiespeicherung

Beschreibung der Maßnahme

Maßnahmen zur Energiespeicherung können nicht nur an den Triebfahrzeugen selbst, sondern auch netzseitig im Unterwerk angeordnet werden. Hier können die Einrichtungen größer ausgeführt werden, und damit effizienter sein. Es bestehen wieder 4 Möglichkeiten zur stationären Energiespeicherung:

- Batteriespeicher
- Supraleitende Spulen
- Drehmassenspeicher
- Kondensatoren

Ein Drehmassenspeicher kann im Unterwerk, wechselweise mit dem Gleichrichter die Netzspannung bei Bedarf stützen [6],[7], [8], [21].

Eine weitere mögliche Maßnahme ist die Erhöhung der Netzspannung, wodurch Verbraucher in einem größeren Umkreis vom rückspeisenden Triebfahrzeug profitieren [5].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Die nicht genutzte, in Abwärme umgewandelte Bremsenergie bei allen Nahverkehrsbahnen Deutschlands beträgt rund 1 TWh/a (Wert des Jahres 2000) [9].

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Einige der aufgezählten Speichertechnologien verwenden Stoffe, welche aus Sicht des Umweltschutzes und der Entsorgung nicht unbedenklich sind. Hier muss im Einzelfall für jede Technologie eine Umweltbilanz erstellt werden und der positive Nutzen zur Einsparung von Primärenergie den sonstige Umweltwirkungen gegenübergestellt werden.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Für die Kosten und den Energieaufwand für die Implementierung konnten leider keine einschlägigen Hinweise und Abschätzungen in der Literatur gefunden werden.

3.5 Energienutzung außerhalb des Bahnsystems

3.5.1 Nutzung der warmen Tunnelluft

Beschreibung der Maßnahme

Beim Schweizer Großen St. Bernhard Straßentunnel wird nicht das drainierte Wasser sondern die Warmluft des Tunnels energetisch genutzt [18]. Mit der gewonnenen Wärme wird die Steuerzentrale mit den Betriebseinrichtungen beheizt. Im Heizungskeller der Steuerzentrale ist eine Wärmepumpe mit einer Wärmeleistung am Kondensator von 36kW installiert. Sie bezieht die Wärme für den Verdampfungskreislauf aus einem Luft-Wärmetauscher, der im Lüftungskanal in der Kalotte in einer Entfernung von 1500m vom Tunnelportal angebracht ist. Ab dieser Entfernung vom Tunnelportal aus unterliegt die Tunnelluft nur mehr geringen saisonal bedingten Schwankungen im Gegensatz zur Außentemperatur.

In der Periode von Jänner bis Oktober 2001 lieferte die Anlage 13,9MWh an thermischer Energie.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Die mittlere Leistungszahl des Gesamtsystems, also das Verhältnis der abgegebenen Nutzwärmeleistung zur aufgenommenen elektrischen Antriebsleistung der Kompressoren, Umwälzpumpen, Ventilatoren und Wärmetauscher beträgt 3,72 [47].

Da diese Anlage eine Pilotanlage ist, können nur schwer Rückschlüsse auf Einsparungspotentiale bei einer großtechnischen Anwendung gezogen werden.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Es können keine sonstigen Umweltwirkungen abgeschätzt werden. Erwähnenswert bleibt die Einsparung an CO₂ Äquivalent durch die Nutzung der Abwärme der Fahrzeuge im Tunnel an Stelle von Heizöl.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Die Investitionskosten für die Installation der Anlage betragen 105.758,14 €[47].

3.5.2 Oberflächennahe Erdwärmenutzung

Beschreibung der Maßnahme

Eisenbahnbauwerke stehen, bedingt durch ihre große Längserstreckung (Tunnel, Bahnhöfe und Dämme), mit einer großen Fläche von Boden- bzw. Felskörper in Berührung. Der Untergrund unterliegt ab einer Tiefe von 15 m nicht mehr den durch den Einfluss der Oberflächentemperatur entstehenden saisonalen Temperaturschwankungen. Somit ist der Bodenkörper als Wärmespeicher unter Verwendung einer Wärmepumpe nutzbar. Im Winter kann dem Boden im Niedertemperaturbereich Wärme entzogen werden, welche den Bahnhofsgebäuden, den Bahnsteigen, sowie weiteren angrenzenden Gebäuden über Niedertemperaturheizanlagen (großflächiger Heizkörper, Fußbodenheizung) zugeführt

werden kann. Im Sommer hingegen kann dem Boden Wärme zugeführt werden, womit das System die Wirkung einer Klimaanlage hat. Bisher war die Erschließung dieses Erdkörpers immer mit Bohrungen, und damit mit einem zusätzlichen finanziellen Aufwand verbunden. Werden die Geothermiesonden, die dem Boden die Wärme entziehen bzw. zuführen, vor dem Betoniervorgang in den Sohlbeton des Tunnels oder in Großbohrpfähle eingesetzt, und dann einbetoniert, erschließt man einen großen Erdkörper. Dies erfordert nur wenig zusätzlichen Aufwand bei der Errichtung.

Absorberleitungen können auch in die Dichtungsfolie im Anschluss an die Spritzbeton-Außenschale eines Tunnels eingelegt werden. Diese Konstruktion wird „Energievlies“ genannt. Sie bietet die Möglichkeit, die Erdwärme auch an Tunneln, die in bergmännischer Bauweise errichtet wurden, zu nutzen. Dieses Verfahren wurde in einer Kooperation der SCHIG, HL-AG, TU Wien Institut für Grundbau und Bodenmechanik und der Firma Polyfelt entwickelt [10], [11], [12], [13], [14], [15].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Die Ausrüstung eines 100 m langen Tunnelabschnittes in Deckelbauweise mit Energiepfählen bringt eine über die gesamte Heizperiode entziehbare Heizwärme von 280 MWh, die im Dauerbetrieb entziehbare Heizleistung beträgt 140kW. Dieser Energiemenge entsprechen etwa 27.780 Liter Heizöl Extraleicht oder 28.680 m³ Erdgas. Diese Energie kann vom Infrastrukturbetreiber an die Anrainer veräußert werden oder zur Beheizung eigener Anlagen verwendet werden [13].

Aus dem Energievlies können zum Vergleich pro 150 m ausgerüsteter Tunnellänge 375 Wohnungen beheizt werden. Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen ist das Vorhandensein von Verbrauchern in der Nähe der Tunneltrasse, um den Bau langer und teurer Versorgungsleitungen zu vermeiden [15].

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Die Erdwärme ist eine nachhaltige, „saubere“ Energiequelle die uns während der Betriebsdauer eines Eisenbahnbauwerks unbegrenzt zur Verfügung steht. Deren Nutzung ist ein Beitrag zum Klimaschutz und ein Mittel zur Steigerung der Akzeptanz eines Verkehrsbauwerks.

Es entsteht beim langfristigen Heizbetrieb eine geringfügige Absenkung der Grundwassertemperatur, was der anthropogen bedingten Erwärmung durch Bauwerke, warmes Abwasser etc. entgegenwirkt.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Für die Errichtung einer oben beschriebenen Anlage, bei der auf einer Tunnellänge von 150 m etwa 375 Wohnungen mit einer Größe von 55m² bei einem Durchschnittsverbrauch von 100kWh pro m² und Jahr beheizt werden können, muss mit Investitionen von 970.000 € gerechnet werden [16]. Das entspricht einer durchschnittlichen Investition pro Wohnung von etwa 2.600 €

3.5.3 Nutzung der hydrothermalen Geothermie

Beschreibung der Maßnahme

Die Nutzung der hydrothermalen Geothermie bleibt auf Tunnelbauwerke mit hoher Überdeckung beschränkt, an welchen die geothermische Tiefenstufe bereits zu tragen kommt. Dadurch fällt je nach Überdeckung Bergwasser mit einer Temperatur von 10 – 24 °C bis zu für den Gotthard Basistunnel prognostizierten 40 – 45 °C an. Dieses kann in eine Drainageleitung eingeleitet und außerhalb des Tunnels einer zentralen Wärmepumpe zugeführt werden. Beispiele für die Anwendung dieses Systems finden sich bei beim Furka, Hauenstein und Ricken Eisenbahntunnel sowie beim Mappo-Morettina Straßentunnel in der Schweiz [17], [18].

Die senkrechten Erschließungsschächte für tiefliegende Basistunnel sind zur Nutzung im Rahmen des Hot Dry Rock (HDR) oder Deep Heat Mining Verfahrens geeignet.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Aus dem 16 km langen Furka Eisenbahntunnel, der die Ortschaften Reap und Oberwald in der Schweiz verbindet, werden die anfallenden warmen Tunnelwässer mit Hilfe einer Wärmepumpe von 16 °C auf 6 °C abgekühlt, was einer entziehbaren Heizleistung 3600 kW_{th} entspricht. Die derzeit installierten Kapazitäten betragen 942 kW_{th}. [18], [19].

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Bei tiefliegenden Tunneln führt das Anfallen warmer Thermalwässer zu wasserrechtlichen Problemen, da derartig warmes Wasser (bis über 40 °C) nicht ohne vorherige Behandlung in den Vorfluter eingeleitet werden darf. Es müssten Maßnahmen zur Kühlung dieser Wässer getroffen werden. Eine Installation einer Wärmepumpe führt zu Synergieeffekten sowohl in wirtschaftlicher, als auch in umweltpolitischer Hinsicht.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Die Investitionskosten des Verteilsystems für die Ortschaften betragen im Jahre 2003 750.000 SFr, was beim damaligen Kurs einem Wert von 495.000 €entspricht. Eine Amortisation dieser Kosten wird bei einer installierten Kapazität von 1200 kW_{th} erreicht [18].

3.5.4 Nutzung der Photovoltaik an Betriebsgebäuden

Beschreibung der Maßnahme

Ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen besitzt eine Anzahl von Gebäuden mit großer Dachfläche. Eine Ausrüstung der Dächer der Bahnhofsgebäude mit Photovoltaik-Anlagen liefert eine Quelle zur Energiegewinnung und einen Beitrag zum Klimaschutz.

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Die Photovoltaikanlage auf dem Dach des Berliner Hauptbahnhofs (1870m²) wird jährlich 160 MWh an Energie liefern [20].

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Es können keine sonstigen Umweltwirkungen abgeschätzt werden.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Photovoltaik-Anlagen sind von ihrer Energiebilanz, d.h. vom Verhältnis der für ihre Herstellung, Nutzung und Entsorgung erforderlichen Primärenergie zur während der Lebenszeit abgegebenen Energie, nicht ganz unumstritten. Tabelle 5 zeigt, dass – je nach Bauart und Standort (=Sonnenstunden) der Photovoltaik-Anlagen – in Mitteleuropa mit der fünf- bis zwanzigfachen Ausbeute an eingesetzter Primärenergie rechnen kann. In diesem Zusammenhang muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass Windkraft und Solarthermie deutlich höhere Energieausbeute liefert.

Die Implementierung wird auf Grund der hohen Preise der Photovoltaik-Anlagen nur für Neubauten und als Umrüstung nur für große Bahnhöfe als rentabel erachtet.

Tabelle 5: Energiebilanz von Photovoltaik-Anlagen (Quelle: www.volker-quaschnig.de)

Energetische Amortisationszeit verschiedener Anlagen in Monaten				
Technologie	Photovoltaik Deutschland	Photovoltaik Südeuropa	Windkraft	Solarthermie (Brauchwasser)
Spanne der Amortisationszeit in Monaten	15 - >100	7 - 76	3 - 23	5 - 32
Gewählte realistische Amortisationszeit in Monaten	mono-Si: 55 poly-Si: 38 amorph: 28 CIS: 15	mono-Si: 28 poly-Si: 19 amorph: 14 CIS: 8	5	10

Erntefaktor verschiedener regenerativer Anlagen				
Technologie	Photovoltaik Deutschland	Photovoltaik Südeuropa	Windkraft	Solarthermie (Brauchwasser)
Erntefaktor	mono-Si: 5,5 poly-Si: 8 amorph: 11 CIS: 20	mono-Si: 11 poly-Si: 16 amorph: 21 CIS: 38	48	24

Energet. Amortisationszeit: Zeit, in der die Anlage den für die Herstellung benötigten kumulierte Energieaufwand abgibt.

Erntefaktor = Zahl, die angibt, wie oft die Anlage während ihrer Lebenszeit die eingesetzte Energie wieder abgibt

3.6 Systemansatz Modal-Split

3.6.1 Dieselleichttriebwagen, „gummibereifte Straßenbahn“, Anrufsammeltaxi

Beschreibung der Maßnahme

Für die Erschließung von Außenbezirken und Randbereichen von Städten sind flexible Bedienungsformen notwendig. Eine elektrisch betriebene Straßenbahngarnitur mit 175 Plätzen ist bei guter Auslastung ein energieeffizientes Verkehrsmittel, nicht jedoch, wenn zu Schwachlastzeiten nur 5 Fahrgäste befördert werden. Hier sind alternative Beförderungs-

formen vorzuziehen. Der fast leere Dieseltriebwagen auf der Nebenbahn ist ebenfalls nicht sehr energieeffizient und umweltfreundlich.

Neue Fahrzeugtechnologien, wie zum Beispiel die gummibereifte Straßenbahn (oder auch Spurbus) erlauben es, in der Stadt als Schienenfahrzeug zu verkehren, in den Randbereichen jedoch den Schienenstrang zu verlassen und flexible Bedarfsrouten nach dem Rufbus-System anzusteuern [29], [30], [31], [32].

Noch flexibler sind freilich die bekannten Flächenerschließungssysteme wie das Anruf-Sammeltaxi im Verbund mit der Regionalbahn (auch Tarifverbund) [33], [34], [35].

Der Einsatz moderner Dieselleichttriebwagen kann die Umweltverträglichkeit bestehender Regionalbahnen erhöhen [36].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Eine generelle Zahl für das Energie- und natürlich auch Betriebskosteneinsparpotenzial kann nicht angegeben werden. Die Energieeinsparung ist abhängig von der Zahl der beförderten Fahrgäste. Je weniger Fahrgäste mit einem schweren, großen Fahrzeug befördert werden, desto höher ist die Energieverschwendung und das Einsparpotenzial. Hier muss jeder Einzelfall für sich untersucht und beurteilt werden.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Verzicht auf alte Dieseltriebwagen, die mit einer unwirtschaftlich geringen Anzahl an Fahrgästen verkehren. Durch eine flexible Bedienung der Haltestellen wird auch die Nutzung des öffentlichen Personennahverkehrs gesteigert und die Anzahl der PKW-Fahrten reduziert.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Kosten fallen vor allem in der Umstrukturierung und in der Information der Bürger an. Verglichen mit dem Einsparungspotential können diese Kosten vernachlässigt werden.

3.6.2 Nutzung des innerstädtischen ÖPNV für Gütertransporte

Beschreibung der Maßnahme

Der öffentliche Verkehr im städtischen Raum verfügt über Kapazitäten im Güterverkehrsbereich. Straßenbahnfahrzeuge (oder U-Bahnfahrzeuge) können zu Güterstraßenbahnen umgerüstet werden und dadurch den LKW-Verkehr in der Stadt reduzieren. Anwendungsbeispiele hierzu sind Abfalltransporte oder Warenlieferungen zu Betrieben mit eigenem Anschlussgleis [26], [27], [28].

Abschätzung des Energie- und Kosteneinsparungspotentials

Die Maßnahme bringt eine Ersparnis an Kraftstoff und an Investitionen in den Fuhrpark. Eine Güterstraßenbahn nach dem Vorbild der CarGo Tram in Dresden kann 60t Zuladung aufnehmen, damit ersetzt sie mit jeder Fahrt 3 LKW-Fahrten durch die Stadt. Sie fährt mit einer kurzen Unterbrechung während der Nachtstunden im 40min. Takt.

Abschätzung der sonstigen Umweltwirkung

Reduktion des innerstädtischen Schwerverkehrs und damit eine Verringerung der Lärmbelastigung.

Abschätzung der Kosten und des Energieaufwands für die Implementierung

Kosten fallen vor allem für Investitionen in geeignete Schienenfahrzeuge, die für den Gütertransport auf dem Straßenbahn- bzw. U-Bahnnetz geeignet sind, an. Die volkswirtschaftlichen Kosten und Nutzen können nicht generell angegeben werden. Je nach konkreter Situation können Investitionen in die Infrastruktur des Schienennetzbetreibers, etwa für Ausweitung der Netzkapazität oder für Umschlaganlagen, notwendig sein. Auf der anderen Seite kann in einer Situation, in welcher das Straßennetz ohne Kapazitätsausweitung nicht mehr in der Lage ist, den Straßengüterverkehr zu bewältigen, durch die Verlagerung auf den ÖPNV der Straßenausbau überflüssig werden.

4 BEURTEILUNG & EMPFEHLUNG

Die Recherche im Rahmen dieser Studie hat gezeigt, dass es im Eisenbahnwesen eine Reihe von Möglichkeiten gibt, den Energieverbrauch im Bahnsystem selbst zu senken bzw. Verluste und erneuerbare Energien zur Substitution von Primärenergieeinsatz außerhalb des Eisenbahnsystems zu nutzen. Leider werden die aufgezeigten Potenziale heute noch sehr wenig genutzt. Hier dürfte das generelle Image des Eisenbahnverkehrs, nämlich generell umweltfreundlicher und energiesparend zu sein, innovationshemmend zu sein. Denn warum sollte man etwas verbessern, wenn man bereits heute als umweltfreundlicher als beispielsweise der LKW oder Flugverkehr gilt.

Entsprechender öffentlicher und politischer Druck scheint in der Vergangenheit ein gutes Instrument zur Förderung von Innovation sowie von Maßnahmen zur Energieeinsparung und Erhöhung der Umweltfreundlichkeit gewesen zu sein. Dem Straßen- und Flugverkehr haftet bis heute der Nimbus des Umweltverschmutzers an. Wiewohl man auch heute noch nicht davon sprechen kann, dass alle technischen und organisatorischen Möglichkeiten zur Senkung der Umweltbelastung und des CO₂-Ausstoßes ausgeschöpft sind, wurden von den betroffenen Sektoren im letzten Jahrzehnt eine Reihe von Maßnahmen zur Hebung der Umweltfreundlichkeit gesetzt. Der Eisenbahnsektor lässt beim Umwelt-, Lärm- und Klimaschutz den nötigen Innovationswillen vermissen.

Hier beginnt auch die Schwierigkeit bei der Umsetzung der Maßnahmen zur Energieeinsparung im Eisenbahnwesen. So lange die Betroffenen, nämlich die Eisenbahnverkehrsunternehmen, Fahrzeugeigentümern, Logistiker und Eisenbahnindustrie, das Kosteneinsparpotenzial von Energiesparmaßnahmen nicht bewusst ist, wird es wenig Fortschritt geben. Viele der untersuchten Maßnahmen stellen wesentliche Eingriffe in altbekannte Betriebsabläufe dar oder erfordern die Implementierung neuer Abläufe und Konzepte. Nur durch Information und intensive Diskussion mit den Entscheidungsträgern wird man hier vorwärts kommen.

Die größten Chancen für eine rasche Umsetzung werden den folgenden Maßnahmen attestiert, da sie einen offensichtlichen betriebswirtschaftlichen Nutzen für die Betroffenen besitzen:

Einsatz von fahrzeugseitigen Energiespeichern in Nahverkehrssystemen: diese Maßnahme hilft dem Betreiber Primärenergie und damit Betriebskosten zu sparen.

Abwärmennutzung für Komforteinrichtung: es existieren Konstruktionen für eine Klimaanlage, welche die Bremsenergie zur Kühlung bzw. Beheizung des Fahrzeuges nutzt. Eine großindustrielle Anwendung fehlt allerdings noch.

Energiesparende Fahrweise (ESF) und Signalisierung der energiesparenden Fahrweise: Diese beiden Maßnahmen sind relativ einfach umzusetzen. Moderne Triebfahrzeuge besitzen heute schon eine entsprechende On-board-Elektronik, welche die notwendigen Informationen für die Signalisierung der optimalen Fahrweise hinsichtlich Energieverbrauch und Streckenleistungsfähigkeit erfasst. Entsprechende Auswertelgorithmen mit der erforderlichen großindustriellen Soft- und Hardware müssen allerdings noch entwickelt werden.

Oberflächennahe Erdwärmennutzung: Die oberflächennahe Erdwärme eignet sich sehr gut zur Beheizung von Weichen, Stiegen und Bahnsteigen. Sie ist wartungsarm und hilft, den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen. Die Wiener Lokalbahn Baden (WLB) bereitet zur Zeit einen Prototypversuch mit einer Weichenheizung mit Erdwärme vor.

Schwieriger als diese Maßnahmen, deren betriebswirtschaftlicher Nutzen rasch und eindeutig abgelesen werden kann, ist die Implementierung jener Maßnahmen, deren Nutzen nicht so klar ersichtlich ist bzw. die einen massiven Eingriff in und eine Änderung von gewachsenen Strukturen und Abläufen bedingen.

Die Rollende Landstraße ist die unwirtschaftlichste und energieaufwändigste Form der Güterbeförderung auf der Schiene. Dennoch wird es sehr schwierig sein, auf effizientere Systeme umzustellen. Die Rollende Landstraße ist ein logistisch einfaches System. Man braucht keine aufwendigen Verladegeräte, man braucht keine Logistik für die Annahme und Abgabe der beförderten Behältnisse, weil Straßenzugmaschine und Fahrer ja immer mit ist usw. Diese Einfachheit erklärt auch den Erfolg der Rollenden Landstraße gegenüber Systemen wie den Trailerzug oder Containerzug, welche für den Erfolg eine aufwändige Logistik benötigen. Das Problem der Logistik ist mit IT lösbar. Hier wird aber der öffentliche Entscheidungsträger durch Förderungen und Anreizsysteme regelnd eingreifen müssen.

Schließlich gibt es die Nutzung der Erd- und Abwärme von Tunnelbauwerken, eine Maßnahme welche gerade die Gemeinde Wien stark fördern kann, zumal dieser Maßnahme ein großes Umsetzungspotenzial besitzt. Bei Planung und Bau von U-Bahnen und Eisenbahntunnel (z.B. Lainzer-Tunnel) sollte die Nutzung von Erdwärme bzw. der Betriebsabwärme künftig ein integraler Bestandteil des Projektes sein. Da die entsprechenden Anlagen zur Wärmenutzung beim Bau der Verkehrsanlage zusätzliche Investitionen erfordern, ist es unbedingt erforderlich, dass die notwendigen Randbedingungen geschaffen werden, dass diese Investitionen auch tatsächlich getätigt werden. Diese Förderung kann beispielsweise mittels Zinszuschüssen oder zinsenlosen Darlehen an den Errichter einer Wärmenutzungsanlage erfolgen.

Bearbeiter:

Institut für Eisenbahnwesen,
Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

psiA – Consult
Umweltforschung und Engineering GmbH

.....
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. N. Ostermann

.....
Dipl.-Ing. Dr.techn. M.T. Kalivoda

.....
Dipl.-Ing. A. Oberhauser

.....
Dipl.-Ing. M. Bukovnik

Wien, am 30. Juli 2004

5 LITERATUR

- [1] Beucker, K.: Das Talgo-System – Bewährte Schienenfahrzeugtechnologie aus einer Hand, in: Eisenbahntechnische Rundschau 48/1999, Heft 5, S.315-324
- [2] o.V. online <http://railway-energy.org> gelesen 24.2.2004
- [3] van Dongen, L.; Fiechter, W.: Einsparung von Zugförderenergie bei NS Reizigers; eb Elektrische Bahnen(98) 11-12/2000 S.448-452 R. Oldenbourg Verlag
- [4] o.V.: U-Bahn Nürnberg spart Bahnenergie; el Elektrische Bahnen (98) 11-12/2000 S.469-469 R. Oldenbourg Verlag
- [5] Kähler, S.: Energiesparmassnahmen im Stadtbahnnetz der üstra; eb Elektrische Bahnen (100) 8-9/2002 S.335-340 R. Oldenbourg Verlag
- [6] Moninger, F.: Drehmassenspeicher in Nahverkehrssystemen; eb Elektrische Bahnen (96) 8/1998 S.257-260 R. Oldenbourg Verlag
- [7] Briest, R.; Kähler, S. et al.: Einsatz rotierender Energiespeicher im Fahrleitungsnetz der üstra
- [8] o.V.: Energiepeicher Powerbridge; ZEV + DET Glas. Ann. (125) 3/2001 S.96-96 Georg Siemens Verlagsbuchhandlung
- [9] Gunselmann, W.; Höschler, P.: Energiespeichereinsatz im Stadtbahnnetz Köln; eb Elektrische Bahnen (98) 11-12/2000 S.463-468 R. Oldenbourg Verlag
- [10] Adam, D., Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 1: Theoretische Grundlagen.; ÖIAZ, 147.Jg., Heft 4/2002
- [11] Adam, D., Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 2: Experimentelle Untersuchungen und Computersimulationen.; ÖIAZ, 147.Jg., Heft 5/2002
- [12] Adam, D., Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 3: Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen.; ÖIAZ, 148.Jg., Heft 1/2003
- [13] Hofinger, J.: „Nutzung geothermischer Energie und Umweltwärme auf niedrigem Temperaturniveau mittels Erdberührter Bauteile“; Diplomarbeit TU Wien, Dezember 2000.
- [14] Brauner, M.: „Oberflächennahe Nutzung der Geothermischen Energie: Analyse ihrer Umweltauswirkungen und der rechtlichen Rahmenbedingungen im internationalen Vergleich“; Diplomarbeit TU Wien, Dezember 2002.

- [15] Lampl, W.: „Betriebswirtschaftliche Nutzung oberflächennaher Geothermie beim Bau von Verkehrsbauwerken – Pilotprojekt Lainzer Tunnel“; Diplomarbeit Universität Wien, 2003.
- [16] iC Consulanten ZT GmbH, Wien
- [17] Rybach, L.: (1995): Thermal waters in deep alpine tunnels. Geothermics 24, 631-637.
- [18] Wilhelm, J., Rybach, L.: „The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels“, Geothermics 32 (2003) 557-568, Pergamon.
- [19] Rybach, L.: (1993): Das geothermische Wärmepotential der NEAT-Tunnels. Mittg. Schweiz. Ges. für Boden- u. Felsmech. 127, 19 p.
- [20] o.V.: Photovoltaikanlage auf dem Berliner Hauptbahnhof; eb Elektrische Bahnen (101)
- [21] Henning, E.; Stephanblome, T.: Speichertechnologien für die elektrische Energieversorgung; eb Elektrische Bahnen (98) 11-12/2000 S.459-462 R. Oldenbourg Verlag
- [22] o.V. online http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html
Gelesen. 8.9.2003
- [23] o.V.: Statischer Energiespeicher auf Stadtbahnfahrzeugen; eb Elektrische Bahnen (101) 10/2003 S.487-487 R. Oldenbourg Verlag
- [24] Scholten, J.; Steiner, M.: Energiespeicher auf Gleichstrom-Schienenfahrzeugen; eb Elektrische Bahnen (101) 12/2003 S.533-538 R. Oldenbourg Verlag
- [25] Anthes, R.; Klahn, V. et al.: Berechnung des Traktionsenergiebedarfs für ein verbraucherseitiges Energiemanagement beim Geschäftsbereich Traktion der Österreichischen Bundesbahnen; ZEV + DET Glas. Ann. (128) 5/2004 S.210-216
- [26] Müller-Eberstein, F.; Franke, M.: Projekt CarGo Tram in Dresden; ZEV + DET Glas. Ann. (124) 5/2000 S.337-340 Georg Siemens Verlagsbuchhandlung
- [27] o.V.: "Gütertram" in Dresden; ZEV + DET Glas. Ann. (124) 2-3/2000 S.270-270 Georg Siemens Verlagsbuchhandlung
- [28] o.V.: Testfahrt der CarGoTram in Dresden; ZEV + DET Glas. Ann. (125) 2/2001 S.77-77 Georg Siemens Verlagsbuchhandlung
- [29] Schöber, J.: TRANSLOHR STE: Ein neues innovatives Fahrzeugkonzept, in: Nahverkehrs-Praxis 11-2000, S.12-16
- [30] Hondius, H.: Translohr – eine gummibereifte Straßenbahn?, in: Stadtverkehr 10/2000 (45. Jahrgang), S.6-15
- [31] Schreiber, R.: Civis, Citaro & Co ,in: Nahverkehrs-Praxis 3-2000, S.12-16

- [32] o.V.: online. <http://www.apts-phileas.com/> Gelesen. 22.9.2003
- [33] Wilhelm, S.: Planungsinstrumente für flexible Betriebsweisen im ÖPNV des ländlichen Raumes; Lehrstuhl für Verkehrs- und Stadtplanung, TU München(13) 8/2002
- [34] Posch, T.: Anrufsammeltaxis in Österreich - Analyse der Nachfrage und Wirtschaftlichkeit; IVS - Schriften, TU Wien, Inst. für Verkehrssystemplanung (Band 2) 1998 Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
- [35] Löcker, G.; Jähnichen, W. et al.: Differenzierte Bedienungsweisen - Nahverkehrs-Bedienung zwischen großem Verkehrsaufkommen und geringer Nachfrage; Verband Deutscher Verkehrsunternehmen 1994 S.26-57
- [36] Esnault, P.: Autorails légers et lignes secondaires - Histoire de l'X74500; Revue Générale des Chemins de Fer , 11/2002 S.29-35
- [37] Mangear, P.: Modalohr - Ein Konzept für den Trailertransport von europäischer Dimension; Vortrag ÖVG Kolloquium: Rollende Landstraße nach der EU-Erweiterung, Auslaufmodell oder Zukunftsprodukt? 2/2004
- [38] o.V.: La route roulante française devient une réalité; Revue Générale des Chemins de Fer , 10/2002 S.37-40
- [40] Beucker, K.: Das Talgo-System – Bewährte Schienenfahrzeugtechnologie aus einer Hand, in: Eisenbahntechnische Rundschau 48/1999, Heft 5, S.315-324
- [40] Perren Brian: der TGV - mit hoher Geschwindigkeit zum Erfolg. Minirex, Luzern 2003r
- [41] Riechers Daniel: ICE - Neue Züge für Deutschlands Schnellverkehr. Transpress, Stuttgart 2001
- [42] Koschinski Konrad, Krolop Michael: Neigetechnik in Europa. Eisenbahn Journal, Special-Ausgabe 4/2001
- [43] Kle Wolfgang: Die ICE Familie. Eisenbahn Journal, Special 5/99
- [44] Carstens Stefan: Die Güterwagen der DB-AG, Stand 1998. MIBA exklusiv Buch, 1998
- [45] Deutsche Bahn: Der Trailerzug, Vorteile und Chancen. München/Hannover 1990
- [46] Frederich, F.: Die Zukunft der Eisenbahn – Wünsche, Wege, Wirklichkeit. ZEV-Glas. Ann. (110) 5/1986 , S.124 – 134
- [47] Routier, A.: Tunnel du Grand-St-Bernard, Analyse du rendement de la production de chaleur. Programme Géothermie; Office fédéral de l'énergie, 12/2001
- [48] Presle, G. ; Haßlinger H.: Entwicklung und Grundlagen neuer Gleisgeometrie. ZEV+DET Glas. Ann. (122) 9-10/1998 , S.579 – 586
- [51] o.V.: <http://www.railpower.com/>, gelesen 28. Juni 2004

Abbildung 5-1: Jacobs-Drehgestelle bei TGV (links) und TGV-Duplex (rechts): Jeder Wagenkasten ruht jeweils zur Hälfte auf einem Drehgestell



Abbildung 5-2: Personenverkehrssystem Talgo Pendular. Die Wagenkästen stützen sich an den Enden auf achslose Fahrwerksrahmen (Losradfahrwerk) ab. (Quelle: www.talgo.com)

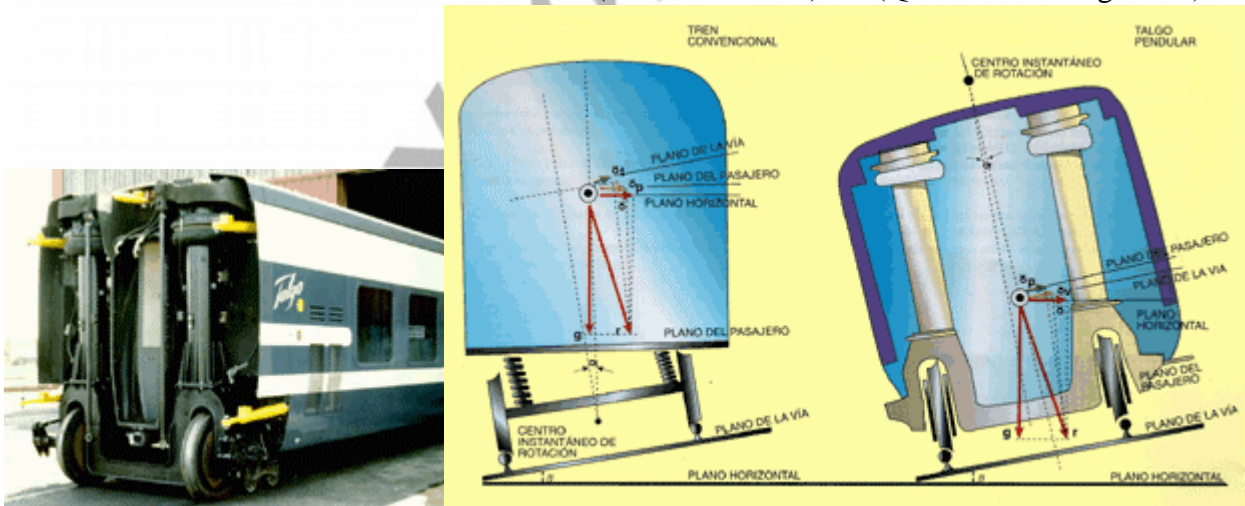


Abbildung 5-3: Doppelstock-Triebzug Talgo 22 (Quelle: www.talgo.com)

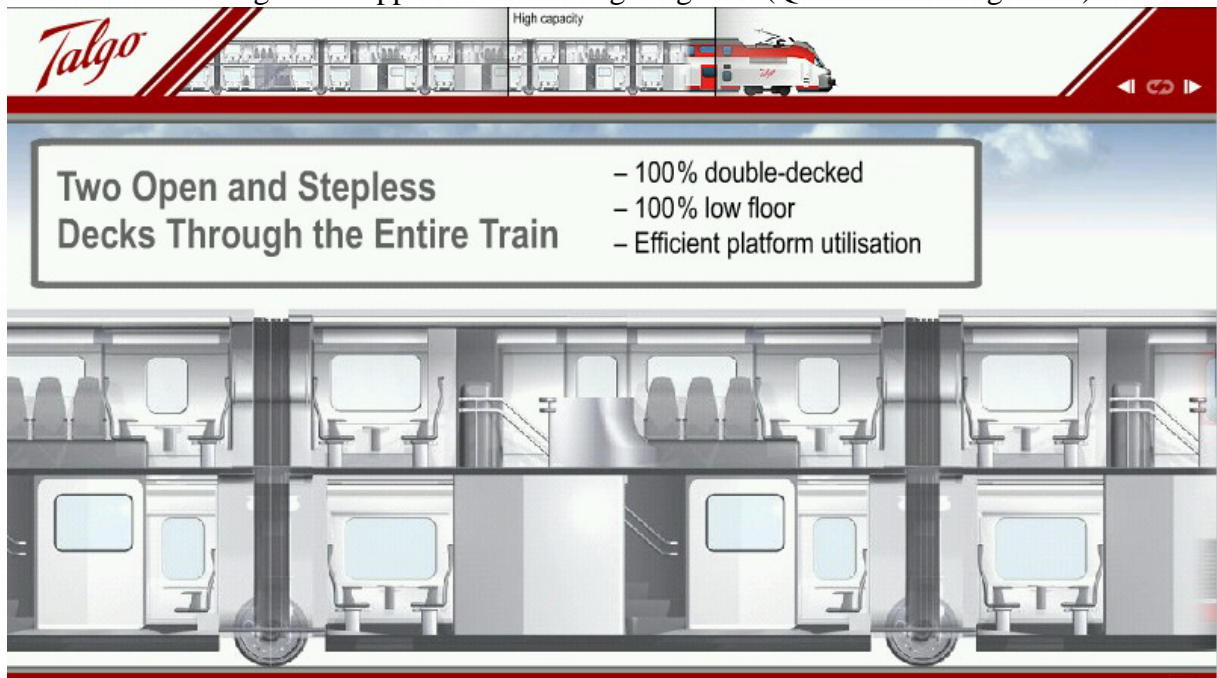


Abbildung 5-4: Güterverkehrssystem Trailerzug; Funktionsweise (Quelle: [45])

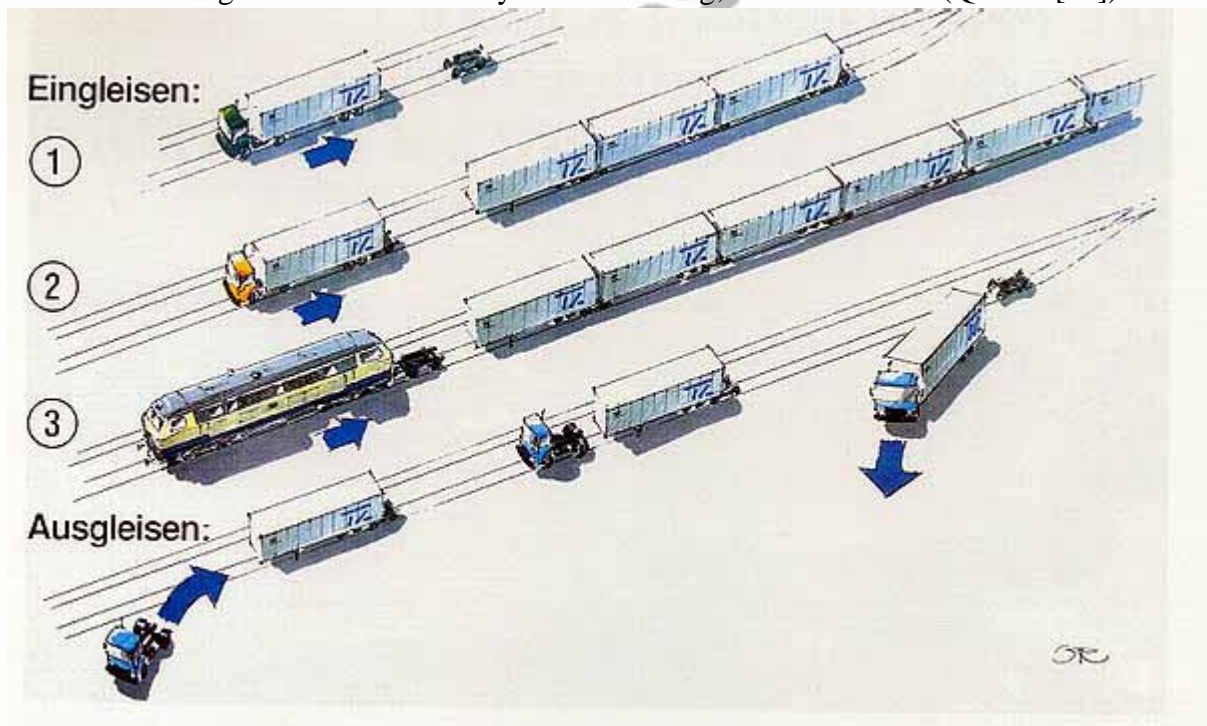


Abbildung 5-5: Güterverkehrssystem Trailerzug; Drehgestell und Sattelaufleger (Quelle: [45])

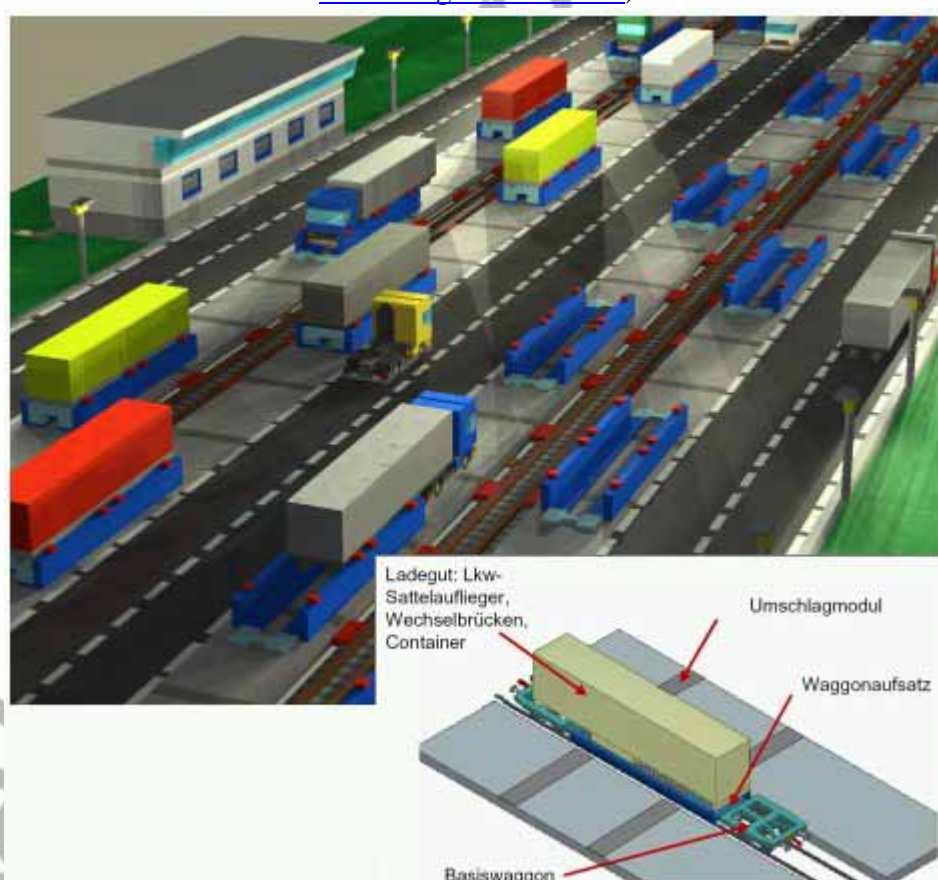
Abbildung 5-6: Güterverkehrssystem CargoBeamer; Systemübersicht (Quelle: www.cargobeamer.com)

Abbildung 5-7: Güterverkehrssystem CargoBeamer; Funktionsweise [www.cargobeamer.com]

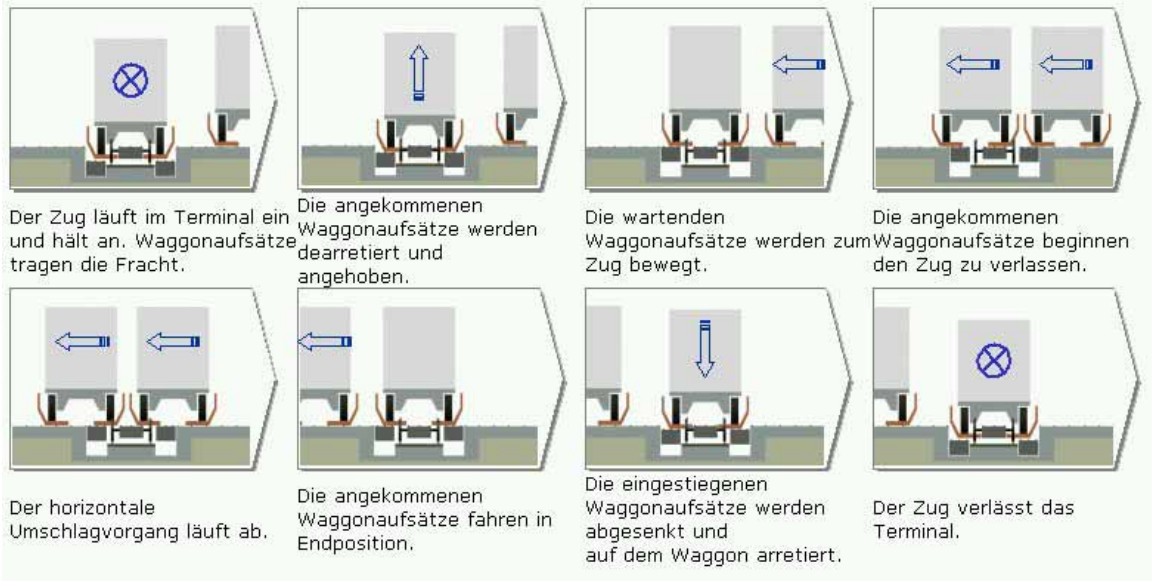


Abbildung 5-9: Konstruktionsprinzipien von Fahrgestellen mit radial einstellbaren Radsätzen

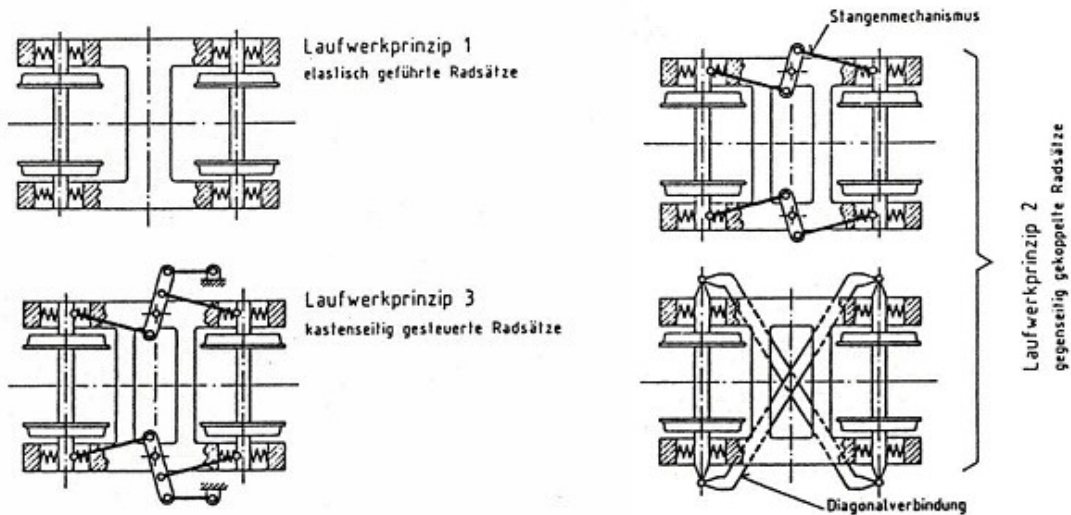


Abbildung 5-10: Railpower „Green Goat“ Hybrid-Lokomotive (Quelle: www.railpower.com)

