

Systemeigenschaften der Eisenbahn

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fengler

Professur für Gestaltung von Bahnanlagen

Technische Universität Dresden

E-Mail: wolfgang.fengler@tu-dresden.de; URL: <http://www.bahnanlagen.tu-dresden.de>

Einleitung

Bahnen sind spurgeführte Verkehrsmittel. Je nach Art der Bahn ist die technische Realisierung der Spurführung wie auch anderer grundlegender technischer Prinzipien unterschiedlich. Die Systemeigenschaften der Eisenbahn lassen sich widerspruchsfrei auf diese Prinzipien zurückführen.

In dem vorliegenden Beitrag werden zunächst grundlegende systemtechnische Aspekte von Bahnen untersucht, um darauf aufbauend die Systemmerkmale der Eisenbahn aus diesen abzuleiten.

Systemtechnische Aspekte von Bahnen

Landverkehrsmittel lassen sich danach unterscheiden, auf welche Art und Weise die Kräfte in den drei Koordinatenrichtungen vom Fahrzeug auf die Fahrbahn übertragen werden. Als positive x-Richtung wird dabei die Fahrtrichtung bezeichnet, die Richtung horizontal quer zur Fahrbahn ist die y-Richtung und senkrecht nach unten die z-Richtung. Den Achsen des Koordinatensystems entsprechen

- das Tragprinzip (z)
- das Führungsprinzip (y)
- das Antriebsprinzip (+x) und das Bremsprinzip (-x)

Bahnen unterscheiden sich von den anderen Landverkehrsmitteln dadurch, dass an der Führung der Fahrzeuge, d.h. der Kraftabtragung in y-Richtung, sowohl Einrichtungen des Fahrzeugs als auch der Fahrbahn beteiligt sind. Dieser Umstand wurde von dem englischen Eisenbahnpionier George Stephenson schon Anfang des 19. Jahrhunderts mit der trefflichen Formulierung zum Ausdruck gebracht, dass Rad und Schiene bei der Eisenbahn „two parts of a machine“ seien, oder genauer: der Spurkranz des Rades und die innere Flanke des Schienenkopfes. Man kann es auch anders ausdrücken: Bahnen unterscheiden sich von anderen Landverkehrsmitteln dadurch, dass zur Übertragung der Führungskräfte Formschluss, nicht Kraftschluss, genutzt wird. Formschluss ist die Kraftübertragung durch Normalkräfte¹ zwischen stabilen Körpern, während beim Kraftschluss tangential (Reibungs-) Kräfte zwischen (nicht notwendigerweise formstabilen) Kontaktpartnern wirken (siehe Abbildung 1). Auch Bahnen mit berührungsfreier Kraftübertragung, z. B. Magnetschwebbahnen, gehorchen diesem Schema: im Regelbetrieb wirken die ab-

stoßenden oder anziehenden Führungskräfte normal, also senkrecht, zur Führungseinrichtung der Fahrbahn, im Versagensfall wirkt berührender Formschluss.

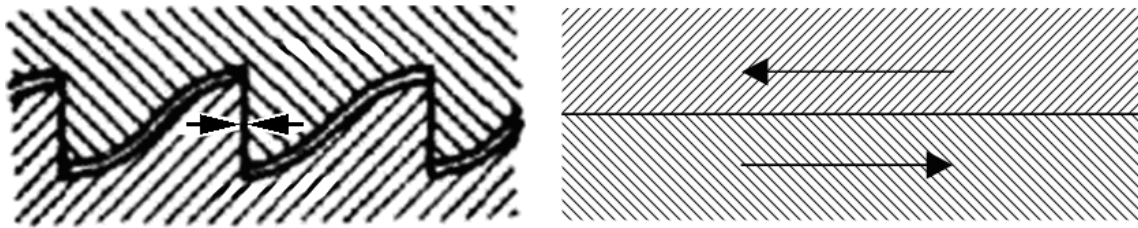


Abbildung 1: Formschluss (links) und Kraftschluss (rechts)

Die formschlüssige Führung hat zur Folge, dass der Wechsel der Fahrspur nur an bestimmten Stellen möglich ist und dort besondere Einrichtungen – Weichen – erforderlich sind. Das macht die Kurssteuerung von Bahnen vergleichsweise aufwendig, sie kann dadurch aber auch sehr sicher gestaltet werden. Der konstruktive Aufwand der Weichen ist davon abhängig, wie die Trag- und Führeinrichtungen der jeweiligen Bahn gestaltet sind: Bei kombinierter Trag- und Führungsfunktion können die Weichen mit vergleichsweise wenig konstruktivem Aufwand als Zungenweiche ausgebildet werden. Ist die Führungsfunktion solitär, d.h. getrennt von der Tragfunktion realisiert, gerät die Fahrwegverzweigung u.U. zu einer recht aufwendigen Einrichtung (z.B. Transrapid: Biegeweiche, stehende Einschienenbahn: Schiebe- oder Biegeweiche). Allerdings ist bei Bahnen mit speziellen Führeinrichtungen deren Versagen weniger wahrscheinlich als bei kombinierter Trag-/Führeinrichtung in Form eines Spurkranzrades, welches aufklettern kann, d.h. ihre Entgleisungssicherheit ist bei zweckmäßig gestalteter spezieller Führeinrichtung größer.

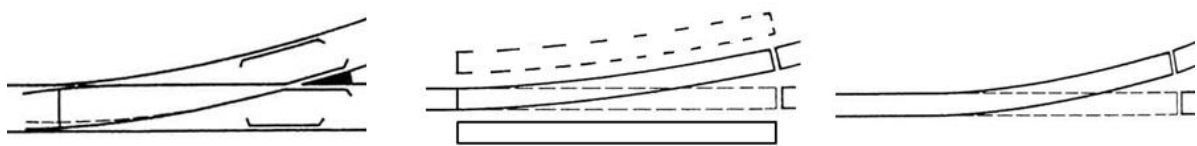


Abbildung 2: Zungenweiche – Schiebeweiche – Biegeweiche (von links)

In diesem Spannungsfeld ist die gummibereifte (Pariser) Metro ein interessanter Exot, an welchem der Unterschied zwischen kombinierter Trag-/Führeinrichtung und spezieller Führeinrichtung anschaulich demonstriert werden kann: Im verzweigungsfreien Gleis werden die Fahrzeuge gummibereift getragen und formschlüssig durch separate, ebenfalls gummibereifte Führungsräder geführt, die jeweils entlang einer vertikalen Stahlplanke laufen (siehe Abbildung 3). An Verzweigungsstellen (und auch im Fall von Druckverlust der Tragreifen) sinkt das Fahrzeug auf die Schienen, und als Folge davon wechselt das Führungs-, Trag- und Antriebsprinzip auf die herkömmliche stählerne Rad-Schiene-Technologie mit dem Effekt, dass zur Fahrwegverzweigung herkömmliche Eisenbahn-

weichen verwendet werden können. Die Fahrzeuge sind „Zwitter“ mit Gummi- und Eisenbahnrädern auf einer gemeinsamen Radsatzwelle.

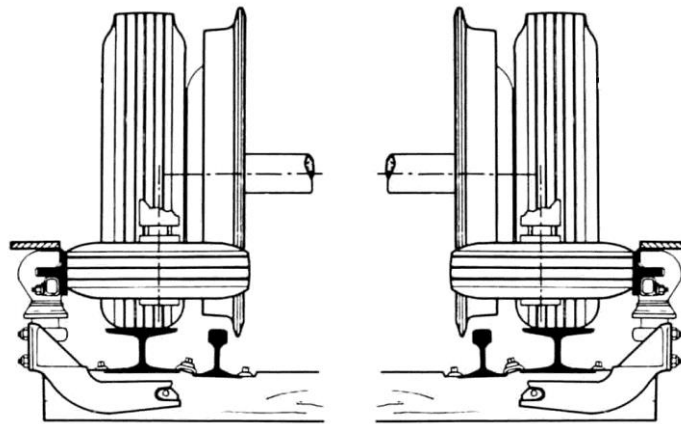


Abbildung 3: Fahrwerk der gummiereiften Métro

Es ist also das formschlüssige Führungsprinzip, welches allen Bahnen gemeinsam ist. Bei der Eisenbahn ist dieses übrigens nicht nur durch den Spurkranz umgesetzt, sondern auch durch die Konizität der Radlaufflächen und die entsprechend nach innen geneigten Fahrflächen der Schienen, die in der Geraden den stabilisierenden Wellenlauf durch Selbstzentrierung der Radsätze bewirken und im Bogen einen gewissen „Mitlenkeffekt“ der auf die Radsatzwelle aufgeschraubten und deshalb mit gleicher Umdrehungszahl rotierenden Räder.

Führung von Fahrzeugen			
	Prinzip	Fahrzeug-technologie	Fahrzeug
	kraftschlüssig	Reifen	Kraftfahrzeug
Bahnen (d.h. Führung formschlüssig)	formschlüssig mit spezieller Führeinrichtung	Führungsräder, Führungsrollen	z.B. Alweg-Bahn, Hängebahn Flughafen Düsseldorf, gummiereifte Métro ¹⁾
	formschlüssig mit kombinierter Trag-/ Führeinrichtung	Spurkranzrad	Schienenbahnen (Eisenbahn, Straßenbahn)
		Doppel-spurkranzrad	Wuppertaler "Schwebbahn" (=Hängebahn)
	berührungsfrei, magnetischer Formschluss ²⁾	Magnetfeld	Magnetschwebbahn

1) in Weichen: formschlüssig-kombiniert

2) mit spezieller Führeinrichtung. Bei Versagen berührender Formschluss.

Abbildung 4: Führung von Landfahrzeugen

Im Unterschied zum Prinzip der formschlüssigen Führung sind das Tragprinzip wie auch das Antriebs- bzw. Bremsprinzip bei den verschiedenen Arten von Bahntechnologien auf vielfältig unterschiedliche Weise gestaltet: Das Tragprinzip als *stehende* oder *hängende Bahn*, dabei *berührend* bei herkömmlichen Bahnen sowie als Rückfallebene für den Störfall der im Regelbetrieb (stehend) *berührungsfrei schwebenden* Magnetbahnen. Sogar Luftpolster werden für das berührungsfreie Tragen von Bahnen genutzt (Dorf-U-Bahn Serfaus). Das Antriebs- und Bremsprinzip wird realisiert durch *Kraftschluss Stahl auf Stahl* (Schienenbahnen), *Gummi auf Stahl* (gummibereifte Métro) oder *Gummi auf Beton* (Alweg-Bahn) sowie durch *Formschluss Stahl gegen Stahl*² bei Zahnradbahnen. Bei Magnetschwebbahnen werden für das Antreiben und Bremsen *berührungsfreie elektromagnetische Kräfte* genutzt, beim Bremsen jedoch mit einer *berührenden Rückfallebene Stahl auf Beton*³ für den Versagensfall. Versuchsweise kam als berührungsfreier Antrieb sogar *Luftverdrängung* per Propeller (Kruckenberg-Zug), ja sogar *Düsenantrieb* zum Einsatz⁴.

Eine entsprechende Systematik für unterschiedliche Arten von Bahnen zeigt Abbildung 5.

		Führungsprinzip				Tragprinzip				Antriebsprinzip				
		Bahnen			magne- tischer Form- schluss	berührend		berührungsfrei						
		kraft- schlüssig	form- schlüssig mit spezieller Führein- richtung	form- schlüssig mit kombi- nierter Trag-/ Führein- richtung		stehend	hängend	magne- tischer Form- schluss	Luft- polster	kraft- schlüssig	form- schlüssig		berührungsfrei	
										Rei- bung	Zahn- rad	Seil	magne- tischer Kraft- schluss	Pro- peller
Bahnen	Kraft- fahrzeug	x				x				x				
	Schienen- bahnen			x		x				x				
	Alwegbahn		x			x				x				
	gummiber. Métro		x	x (nur in Weichen)		x				x				
	Zahnrad- bahnen			x		x					x			
	Hänge- bahn		x 5)	x 3)4)			x			x 3) 5)		x 4)		
	Stand- seilbahn			x		x						x		
	Luftseilbahn			x (nur am Mast)			x			x 2)		x 1)		
	Dorf-U-Bahn Serfaus		x			x*)			x (s)			x		
	Magnetbahn Transrapid		x*)		x	x*)		x (s)		x*) Bremsen			x	
	Krucken- berg-Zug			x		x								x

x*) im Versagensfall

(h) hängend

(s) stehend

1) Pendelbahn

2) Umlaufbahn

3) Wuppertal

4) Dresden

5) Flughafen Düsseldorf

Abbildung 5: Führungs-, Trag- und Antriebsprinzipien von Bahnen

Systemeigenschaften der Eisenbahn

Welche Systemeigenschaften eine spezielle Bahntechnologie hat und wodurch sich diese von anderen Bahnen unterscheiden, wird entscheidend davon beeinflusst, auf welche Art und Weise das Trag-, Führungs- und Antriebs- (einschließlich Brems-) Prinzip realisiert sind. Im Folgenden wird dies für die wichtigste Bahntechnologie, die Eisenbahnen, mit ihren grundlegenden Eigenschaften eines spurgeführten Systems dargestellt. Dabei lässt sich zeigen, dass sich alle wesentlichen technischen Ausprägungen des Eisenbahnsystems auf seine grundlegenden Systemmerkmale der Spurführung und der Reibpartner „Stahl auf Stahl“ zurückführen lassen (Gesamtdarstellung siehe Abbildung 20).

Teilgraph „Führen und Fahren“

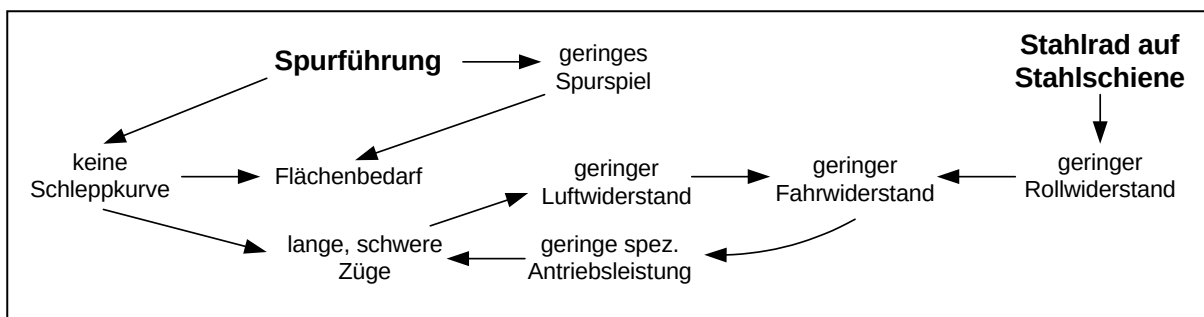


Abbildung 6: Teilgraph „Führen und Fahren“

Bei allen Bahnen begrenzen Spurführungseinrichtungen das Seitenspiel der Fahrzeuge auf der Fahrbahn auf sehr geringe Werte. So darf das seitliche Spiel der Radsätze im Gleis laut EBO⁵ zwischen 4 mm und 60 mm betragen. Dies legt die Annahme nahe, dass der Schienenfahrweg im Vergleich zur Straße mit ihrer Schleppkurve (s.u.) weniger Breite benötigt. Der Brutto - Breitenbedarf eines Autobahn-Fahrstreifens beträgt zwischen den Böschungskanten ca. 7,50 m (z.B. RQ 29,5 – vierstreifig), der analoge Breitenbedarf eines Gleises ca. 5,50 m (z.B. zweigleisige DB-Strecke – ab 10,60 m). Allerdings kann die Straße wegen höherer Steigfähigkeit der Kraftfahrzeuge dem Gelände besser folgen, so dass deren durchschnittliche Höhe von Dämmen bzw. Tiefe von Einschnitten und damit deren Breite am Übergang zum unbeeinflussten Gelände geringer ist. Das relativiert den Breitenvorteil der Eisenbahn bei der Fahrwegbreite zwischen den Böschungskanten. Bezieht man die Kapazitäten beider Verkehrsträger in die Betrachtung ein, zeigt sich, dass wegen der Vielzahl der Einflussgrößen kaum ein Vergleich möglich ist, der nicht mit guten Argumenten sofort in Zweifel gezogen werden könnte. Der in Abbildung 7 gleichwohl angestellte Vergleich geht von einer gut ausgelasteten zweistreifigen Autobahn mit einem Durchsatz von 50.000 Kraftfahrzeugen pro Tag aus und stellt dem eine mit acht Zügen pro Stunde gut ausgelastete Mischverkehrsstrecke der Eisenbahn entgegen. Es liegt auf der Hand, dass die Auslastung der Transportgefäße einen großen Einfluss auf das Ergebnis des Vergleichs ausübt. So liegt der Durchsatz der Autobahn bei durchschnittlicher Auslastung der Transportgefäße etwas über dem Durchsatz der Eisenbahnstrecke, aber

nur deshalb, weil die schlechte Auslastung des Regionalverkehrs das Ergebnis der Eisenbahn nach unten drückt. Bei voller Auslastung der Transportgefäße ist der Durchsatz von Autobahn und Eisenbahnstrecke etwa gleich groß. Interessant ist die – wenn auch nur theoretische – Feststellung, dass der Durchsatz der Autobahn auch bei voller Gefäßauslastung unschlagbar wäre, wenn auf der Autobahn nur Busse verkehren würden (siehe Abbildung 8). Alles in allem lässt sich ein gewisser Flächenvorteil der Eisenbahn feststellen – vor allem bei aufgeständerter Führung in Hochlage bzw. bei Tieflage in einem Trog.

BAB 2-streifig - Infrastruktur gut, Gefäße durchschn. ausgelastet (50.000 Kfz beide Richtungen)							
		Kfz/d/Ri	LE / Kfz			LE/d/Ri	
Pkw	87,5%	21.875	1,5	P/Pkw		32.813	P
SV ¹⁾	12,5%	3.125	1,6	TEU/Lkw		5.000	TEU

Eisenbahn-Mischverkehrsstrecke - Infrastruktur gut, Gefäße durchschn. ausgelastet (1 Richtung)							
		LE / Zug	Züge / h	h / Tag	LE/d/Ri	LE/d/Ri	
ICE/IC/ECE	280	P / Zug	3	18	15.120	19.440	P
RE/RB/IRE	80	P / Zug	3	18	4.320		
G am Tag	60	TEU / Zug	2	18	2.160	5.040	TEU
G nachts	60	TEU / Zug	8	6	2.880		

BAB 2-streifig - Infrastruktur gut, Gefäße voll ausgelastet (50.000 Kfz beide Richtungen)							
		Kfz/d/Ri	LE / Kfz			LE/d/Ri	
Pkw	86,5%	21.625	4	P/Pkw		86.500	P
SV ¹⁾	13,5%	3.375	2	TEU/Lkw		6.750	TEU

LE: Leistungseinheit

Eisenbahn-Mischverkehrsstrecke - Infrastruktur gut, Gefäße voll ausgelastet (1 Richtung)							
		LE / Zug	Züge / h	h / Tag	pro	LE/d/Ri	
ICE/IC/ECE	900	P / Zug	3	18	48.600	81.000	P
RE/RB/IRE	600	P / Zug	3	18	32.400		
G am Tag	80	TEU / Zug	2	18	2.880	6.720	TEU
G nachts	80	TEU / Zug	8	6	3.840		

LE: Leistungseinheit SV: Schwerverkehr TEU: twenty-foot-unit (Container)

SV: Schwerverkehr, ca. 10 %. Hier zum Vergleich so eingestellt, dass TEU (Straße) ≈ TEU (Schiene)

Abbildung 7: Vergleich Durchsatz Autobahn – Eisenbahn (Mischverkehr)

Eisenbahnstrecke artrein P, gut ausgelastet (1 Richtung)							
		LE / Zug	Züge / h	h / Tag		LE/d/Ri	
ICE/IC/ECE	900	P / Zug	8	24		172.800	P
BAB 2-streifig, gut ausgelastet, nur Busse (20.000 Busse beide Richtungen)							
		Kfz/d/Ri	LE / Kfz			LE/d/Ri	
Bus		10.000	50	P/Pkw		500.000	P

Abbildung 8: Vergleich Durchsatz Autobahn (Bus) – Eisenbahn (Personenverkehr)

Im Straßenverkehr wird die Länge von Lastkraftwagen durch ihre Schleppkurve auf 20 bis 25 m begrenzt. Bei der Eisenbahn ist dagegen die Spurführung mit ihrem geringen Sei-

tensspiel die wesentliche Voraussetzung dafür, Züge bilden zu können, die – abhängig von anderen Voraussetzungen – durchaus mehrere Kilometer lang und bis zu ca. 20.000 Tonnen schwer sein können⁶. Obwohl bei sehr langen Zügen mehrere Lokomotiven zum Einsatz kommen, die zur Begrenzung der Zughakenlast auch im Zug oder am Zugschluss laufen, können diese prinzipiell von einem Triebfahrzeugführer von der Spitze aus gesteuert werden. In dieser Personaleinsparung, seien es nun ein oder auch zwei Triebfahrzeugführer, liegt ein großer Systemvorteil der Eisenbahn. Die Zugbildung wirkt sich durch den geringen Fahrzeugabstand auch günstig auf den Luftwiderstand aus, insbesondere dann, wenn der Zug aus geschlossenen Wagen gleicher Bauart besteht. Ein nachteiliger Effekt der Zugbildung ist das Auftreten von Zerrungen im Zug vor allem beim Bremsen, bedingt durch die immer etwas unterschiedliche Wirkung der Bremsen in den einzelnen Wagen sowie durch das zeitlich verzögerte Ansprechen der Bremsen mit zunehmendem Abstand eines Wagens zur Lokomotive. Der letztgenannte Effekt entsteht, weil sich die Luftdruckänderung in der Hauptluftleitung bestenfalls mit Schallgeschwindigkeit fortpflanzt, dabei gebremst durch die Reibung an den Innenwänden der Hauptluftleitung, so dass die Bremszylinder des letzten Wagens eines langen Zuges erst nach mehreren Sekunden ansprechen. Vermeiden lässt sich dies durch elektronische Ansteuerung der Bremsen, die aber eine elektrische Leitung durch den Zug erforderlich macht. So oder so: Beim Bremsen entstehen Längskräfte im Zug, die über die Puffer in die benachbarten Fahrzeuge eingeleitet und durch deren Längsträger aufgenommen werden müssen. Dies erfordert, neben anderen Einflüssen (z.B. Rangierstöße, Massenkräfte der Radsätze, Crashfestigkeit), eine entsprechend robuste Auslegung der Fahrzeuge. Im Personenverkehr mit seiner geringen „Nutzlast“ ist das nachteilig für die Eisenbahn, weil dadurch Leichtbau wie beim Automobil nur begrenzt möglich ist. Die Folge davon ist, im Vergleich zu Pkw und Bus, ein etwa doppelt so hohes Totlast / Nutzlast – Verhältnis⁷. Vor allem im Nahverkehr, wo bei den häufigen Haltbremsungen unter Beteiligung der Reibungsbremsen gebremst und dann stark beschleunigt wird, ist das energetisch kontraproduktiv. Mit Doppelstockwagen lassen sich Lastverhältnisse auf Pkw-Niveau erreichen.

Der große Vorteil der Reibungspartner der Eisenbahn „Stahl(rad) auf Stahl(schiene)“ besteht im sehr geringen Rollwiderstand, der mit ca. 1 bis 1,5 % etwa zehnmal niedriger ist als im Straßenverkehr. In Summe mit dem geringen Luftwiderstand (s.o.) ergibt sich ein niedriger Fahrwiderstand, der bei gemischten Güterzügen bei 100 km/h ca. 5 % beträgt und damit etwa halb so viel wie bei einem Lastkraftwagen. Deshalb kommen Züge (in der Ebene, s.u.) mit einer vergleichsweise geringen spezifischen Antriebskraft aus. Sie beträgt z.B. bei einem mit einer Diesellok (2.000 kW Leistung) gezogenen 1.000 t – Zug 2 kW je Tonne, dagegen bei einem 40-Tonner-Lkw etwa 5 bis 8 kW je Tonne. Anders liegen die Dinge im Hochgeschwindigkeitsverkehr wegen des quadratisch mit der Geschwindigkeit ansteigenden Luftwiderstands: In einem ICE 3 sind je Sitzplatz 18 kW Leistung installiert, d.h. nicht weniger als in einem Pkw der unteren Mittelklasse. Der Energieverbrauch im Personenverkehr der Eisenbahn ist jedoch nicht nur von der Höchstgeschwindigkeit abhängig, sondern auch vom Haltabstand, wie sich mit dem „Umweltmobilcheck“ im Online-Buchungssystem der DB AG überprüfen lässt: Im Hochgeschwindigkeitsverkehr be-

trägt das verbrauchte Benzinäquivalent je Personenkilometer etwa ein Drittel, im Nahverkehr dagegen zwei Drittel vom Verbrauch eines Pkw⁸ – eine Folge der kurzen Haltabstände, aber auch der geringeren Auslastung im Nahverkehr außerhalb der Ballungsräume⁹. Nahverkehr mit 160 km/h und mehr ist unter diesem Blickwinkel durchaus fragwürdig.

Teilgraph „Traktion und Nachhaltigkeit“

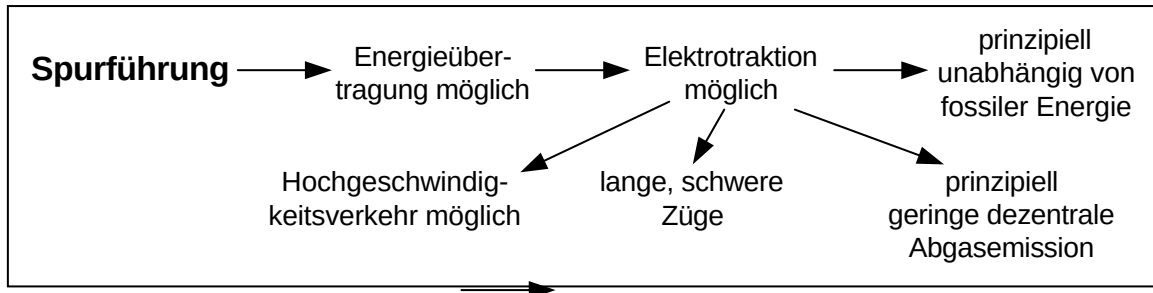


Abbildung 9: Teilgraph „Traktion und Nachhaltigkeit“

Einer der bedeutendsten Entwicklungssprünge der Eisenbahnen stellt die elektrische Traktion dar, u.a. weil es dadurch möglich wurde, die installierbare spezifische Leistung auf heute bis zu ca. 20 kW / t etwa zu verdoppeln¹⁰, eine wesentliche Bedingung für den Hochgeschwindigkeitsverkehr. Auch dafür ist die Spurführung Voraussetzung, denn eine Übertragung hoher Leistung auf das Fahrzeug ist anders nicht möglich. Mit der stählernen Schiene als Rückleiter genügt eine vergleichsweise einfache einphasige Ausführung der Fahrleitung. Man mag einwenden, dass auch im Straßenverkehr die leitungsgebundene Energieübertragung möglich ist, wie die Oberleitungsbusse beweisen. Dem ist allerdings entgegen zu halten, dass auch die Oberleitungsbusse nicht ohne Spurführung auskommen, und zwar realisiert in der Oberleitung! Wozu sonst bräuchte der Stromabnehmer eine Seitenführung (Rolle mit Doppelspurkranz oder Schleifstück mit Seitenwangen) und die Oberleitungsanlage an Verzweigungsstellen sog. „Luftweichen“, die für Spitzbefahrung sogar stellbar sein müssen? Entsprechend komplex ist die (wegen des fehlenden Rückleiters in der Fahrbahn außerdem zweiphasige) Oberleitungsanlage, und sog. „Abdrahtungen“ (Entgleisungen des Stromabnehmers) sind nichts Ungewöhnliches, obwohl die maximale Geschwindigkeit auf etwa 70 km/h begrenzt ist.

Es ist zwar eine Phrase, dass die Eisenbahn seit einem Jahrhundert „elektromobil“ ist – wahr ist es trotzdem. 90 % der Beförderungsleistungen der DB AG werden elektrisch gefahren. Sie sind damit technologisch unabhängig von fossilen Energieträgern und zumindest lokal Abgas-emissionsfrei, für die Anwohner elektrifizierter Eisenbahnstrecken ein Segen. Die Bahn als Verkehrsträger profitiert, und das unterscheidet sie von der Straße, automatisch und selbst ohne eigenes Zutun vom zunehmenden Anteil nachhaltig erzeugter Energie, während für den Straßenverkehr dafür erst noch eine praxistaugliche technologische Basis geschaffen werden muss, die auch Fernverkehrs-tauglich wäre. Ob dies jemals für den (schweren) Straßengüterfernverkehr gelingen wird, bleibt abzuwarten. Wenn, dann spricht einiges dafür, dass man dabei nicht um eine (zumindest virtuelle) Spurführung zwecks Energieübertragung herumkommen wird, weil die notwendigen Energievorräte, wie schwere Lkw sie benötigen, auf absehbare Zeit nicht auf dem Fahr-

zeug speicherbar sein dürften und deshalb nicht wie Kraftstoff mitgeführt werden können. Wobei sich dann allerdings die Frage stellt, ob nicht der kombinierte Verkehr Lkw – Eisenbahn, wie wir ihn heute kennen oder, besser noch, in innovativer Ausgestaltung (mit Schnellumschlaganlagen für Container-Linienzüge und z.B. der Cargobeamer¹¹-Technologie für den Transport von Sattelaufliegern) das wäre, was eher auf der Hand liegt als leitungsgebunden auf Autobahnen verkehrende 40-Tonnen-Lkw?

Teilgraph „Bremsen und Beschleunigen“

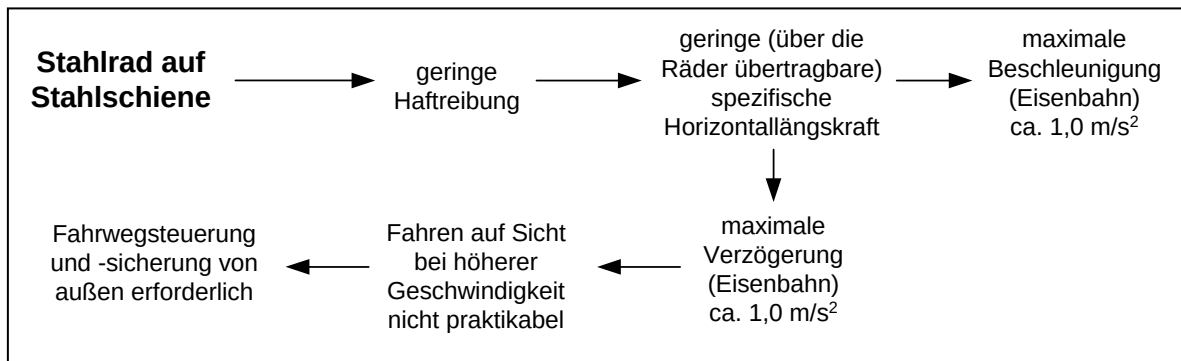


Abbildung 10: Teilgraph „Bremsen und Beschleunigen“

Ist einerseits die geringe Rollreibung eine sehr vorteilhafte Systemeigenschaft von Schienenbahnen, so ist andererseits die damit einhergehende (etwa einhundert Mal höhere und trotzdem geringe) Haftreibung verantwortlich für ihre entscheidenden systembedingten Nachteile. Der Haftreibungskoeffizient Stahlrad auf Stahlschiene beträgt, je nach Zustand der reibenden Oberflächen, zwischen etwa 0,35 (trocken, rau) und 0,1 (glatt, nass); letzterer entspricht etwa dem Haftreibungskoeffizienten eines Autoreifens auf Eis. Wegen ansteigender Vibrationen und sich damit verschlechternder Kontaktbedingungen zwischen Rad und Schiene sinkt der Haftreibungskoeffizient mit zunehmender Geschwindigkeit ab.

Die horizontale Längsbeschleunigung berechnet sich zu:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\mu_{\text{Haft}} \cdot G}{m} = \mu_{\text{Haft}} \cdot g$$

a: horizontale Beschleunigung, G: Gewichtskraft, F: Horizontalkraft, m: Masse, g: Erdbeschleunigung, μ : Haftreibungskoeffizient

Für die Berechnung der Fahrzeit von Zügen kann nicht von idealen Umständen ausgegangen werden, sondern es muss ein Ansatz gewählt werden, der nicht allzu häufig (bei schlechtem Wetter, Laubfall) verletzt wird. Sind alle Räder eines Zuges angetrieben, beträgt die maximal erreichbare Beschleunigung bei nassen Schienen nach obiger Formel:

$$a = \mu_{\text{Haft}} \cdot g = 0,1 \cdot 9,81 \approx 1,0 \text{ m/s}^2$$

Überwiegend ist nur ein kleiner Anteil der Achsen eines Zuges angetrieben: bei lokbespannten Zügen je nach Komposition etwa 10 bis 20%, beim ICE 3 etwa 50 %; eine Ausnahme sind die S-Bahn-Züge mit (fast) 100 % angetriebenen Achsen (BR 420, BR 423)¹². Proportional zum Anteil angetriebener Achsen verhält sich die maximale Beschleunigung,

wobei der Triebfahrzeugführer den Haftreibungskoeffizienten gezielt durch „Sanden“ der Treibachsen verbessern kann. Faustwerte für mittlere Anfahrbeschleunigungen sind: Reisezüge 0,2 – 0,5 m/s², Güterzüge: 0,05 – 0,2 m/s², Stadtschnellbahnen: 1,0 – 1,2 m/s² ¹³. Ein Pkw, der aus dem Stand nach 10 Sekunden 100 km/h erreicht, beschleunigt im Mittel mit 2,8 m/s².

Gleiche Kontaktverhältnisse zwischen Rad und Schiene gelten beim Bremsen. Bei einer Verzögerung von 1,0 m/s² beträgt der rechnerische Bremsweg aus einer Geschwindigkeit von 160 km/h

$$s = \frac{v^2}{2a} = \frac{(160/3,6)^2}{2 \cdot 1,0} = 988 \approx 1000 \text{ m}$$

Bremswege in einer Größenordnung von mehreren hundert Metern können vom Triebfahrzeugführer nicht per Augenschein überwacht werden, d.h. ein Fahren auf Sicht wie auf der Straße ist bei der Eisenbahn (außer beim Rangieren sowie bei Abweichung vom Regelbetrieb mit niedriger Geschwindigkeit) nicht möglich. Deshalb wird bei der Eisenbahn schon seit ihrer Frühzeit im sogenannten „festen Raumabstand“ gefahren. Bei diesem Prinzip der Abstandshaltung wird jedem Zug ein exklusiver Streckenabschnitt zugeteilt, für den vor Einfahrt des Zuges streckenseitig (durch Personal oder automatisch) sichergestellt wird, dass er frei von Fahrzeugen und gesichert ist. Ist dies nicht der Fall, wird dem Zug durch ein ortsfestes Hauptsignal am Beginn des Streckenabschnitts mitgeteilt, dass die Einfahrt in den Streckenabschnitt nicht gestattet ist. Allerdings benötigt der Triebfahrzeugführer diese Information schon am Beginn des (für ihn nicht zweifelsfrei übersehbaren) Bremswegs weit vor dem Hauptsignal. Er erhält sie durch das Vorsignal, welches im sogenannten „Bremswegabstand der Strecke“ vor dem Hauptsignal steht (bei 160 km/h Streckenhöchstgeschwindigkeit im Regelabstand 1000 m) und ihm dessen Stellung anzeigt. Die sichere Erkennung der Vorsignalstellung ist folglich für die Sicherheit der Eisenbahn von sehr großer Bedeutung, weshalb das Vorsignal durch drei Vorsignalbaken (in 250m, 175 m und 100 m Abstand davor) angekündigt wird. Bei Geschwindigkeiten oberhalb von 160 km/h reicht der Vorsignalabstand von 1000 m nicht mehr aus, was durch größere Abstände zwischen Vor- und Hauptsignal ausgeglichen werden könnte. Es leidet jedoch auch die Erkennbarkeit der Signale durch den Triebfahrzeugführer, so dass die Deutsche Bahn oberhalb von 160 km/h an Stelle der optischen die sogenannte „elektrische Sicht“ ohne Streckensignale anwendet, bei der die notwendigen Informationen über Leiterschleifen oder per Funk auf das Fahrzeug übertragen werden. Es sind also letztlich die Haftreibungsverhältnisse, die bei der Eisenbahn eine Fahrwegsteuerung und -sicherung von außen erforderlich machen, realisiert durch Signale, Blockeinrichtungen, Stellwerke und heute auch durch Fahrzeug – Fahrweg - Kommunikation.

Ein Pkw, der aus 100 km/h einen Bremsweg von 40 Metern benötigt, verzögert mit knapp 10 m/s². Für im Straßenverkehr mitschwimmende Straßenbahnen verlangt die BOStrab¹⁴ eine nachgewiesene Bremsverzögerung von mindestens 2,73 m/s² aus 70 km/h. Diese kann allein über die Räder oft nicht auf die Schienen gebracht werden. Straßenbahnen haben deshalb sog. „tief hängende“ Magnetschienenbremsen. Dies sind

zwischen den Rädern angeordnete Elektromagnete, die wegen ihrer tiefen Aufhängung direkt über den Schienenköpfen bei Einschalten des Erregerstroms ohne Zeitverzug in Kontakt mit der Schiene kommen. Sie erzeugen dabei eine zusätzliche, von den Rädern unabhängige Bremskraft, deren reibungsabhängiger Anteil dem Produkt aus elektromagnetischer Anpresskraft an die Schiene und dem Haftreibungskoeffizient entspricht. Hinzu kommt ein Anteil aus Wirbelstrominduktion. Beide Anteile an Bremsarbeit haben eine Erwärmung der Schiene zur Folge. Auch bei der Eisenbahn kommen Rad-unabhängige Bremssysteme in Form von (hoch aufgehängten) Magnetschienenbremsen zum Einsatz¹⁵. Diese werden im Netz der DB AG schon ab einer Geschwindigkeit von 140 km/h verlangt, weil sonst bei einer Bremsung aus Höchstgeschwindigkeit mit Bremsbetätigung (erst) am Vorsignal unter Berücksichtigung von Tot- und Bremsaufbauzeiten der Vorsignalabstand von 1000 m bei ungünstigen Bedingungen zu gering wäre. Vom Haftreibungskoeffizienten zwischen Rad und Schiene unabhängige Bremsen, so auch die Wirbelstrombremse des ICE 3, geben dem Triebfahrzeugführer zusätzliche und vom Wetter unabhängige Sicherheit bei Schnellbremsungen.

Teilgraph „Anpassung an das Gelände“

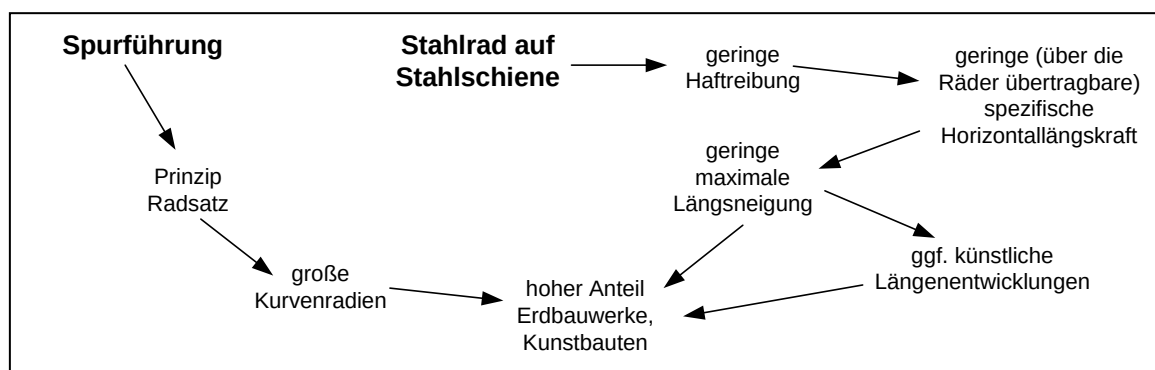
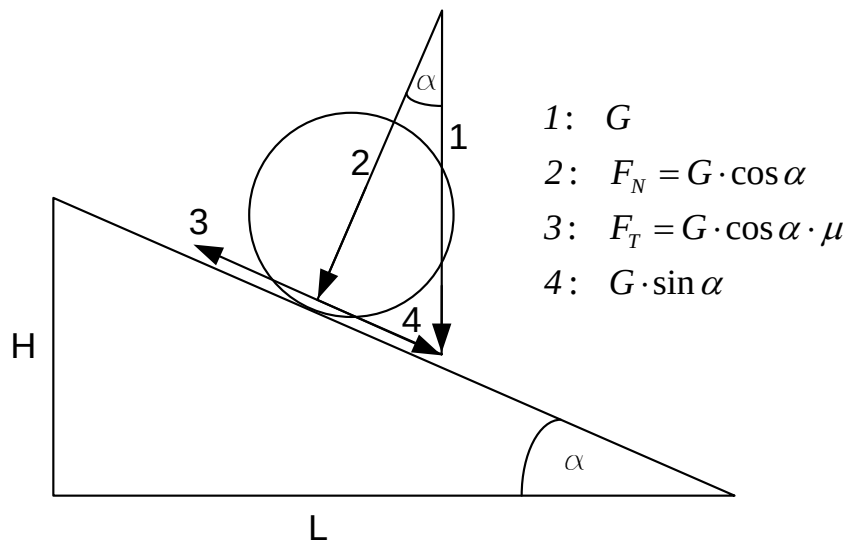


Abbildung 11: Teilgraph „Anpassung an das Gelände“

Besonders hinderlich ist die geringe Haftreibung zwischen Rad und Schiene beim Befahren von Steigungen. Die maximal über die Räder zu bewältigende Steigung kann wie folgt berechnet werden:



$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{G \cdot \cos \alpha \cdot \mu}{G \cdot \cos \alpha} = \frac{G \cdot \sin \alpha}{G \cdot \cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{H}{L}$$

F_T : Antriebskraft F_N : Gewichtskraft

Abbildung 12: maximale Längsneigung von Eisenbahnen

Werden alle Räder angetrieben, beträgt demnach bei einem Haftreibungskoeffizienten von 0,1 und maximaler Steigung das Verhältnis H / L ebenfalls 0,1, d.h. die überwindbare Steigung 100 Promille. Angesichts der Tatsache, dass bei Güterzügen der Anteil angetriebener Achsen 10 Prozent und weniger betragen kann, gibt die EBO als Sollwert¹⁶ für die maximale Längsneigung auf Hauptbahnen 12,5 % vor, für Nebenbahnen 40 %. Die TSI INS HS¹⁷ der Europäischen Union erlaubt heute für interoperable, eigens für Hochgeschwindigkeitszüge und mindestens 250 km/h gebaute Strecken maximal 35 % Längsneigung auf begrenzter Länge sowie unbegrenzt 25 % Längsneigung. *Hauptbahnen* mit 40 % Längsneigung im Netz der DB sind z.B. einige S-Bahn-Strecken sowie – als im Sinne der TSI permanenter Sonderfall – die Schnellfahrstrecke Köln – Frankfurt am Main, deren Realisierung bei Erlass der TSI bereits so weit fortgeschritten war, dass eine Verringerung der Längsneigung nicht mehr in Frage kam. Einige ältere Strecken sind noch steiler, so z.B. die Höllentalbahn im Schwarzwald mit bis zu 57 % Längsneigung. Für Autobahnen gelten als Höchstlängsneigung 4 Prozent, die Brennerautobahn hat eine maximale Steigung von 6 Prozent.

Mit derartig geringer Längsneigung vor allem für Güterzug-geeignete Strecken stellt die Überwindung von Höhenhindernissen für die Eisenbahn ein gewaltiges Problem dar. In der Frühzeit der Eisenbahn, als noch die Längen der Tunnel aus Gründen der verfügbaren Bautechnologie begrenzt bleiben und diese deshalb als Scheiteltunnel¹⁸ angelegt werden mussten, war es notwendig, die Bahnstrecke mit Hilfe „künstlicher Längenentwicklungen“ an die hoch gelegenen Tunnelmündungen oder die Passhöhe heran zu führen. Dabei hatte die Eisenbahn nicht – wie die Straße – die Möglichkeit, mit 180°-Haarnadelkurven die Berghänge zu erklimmen; dem stehen die Umlenkkräfte im Zug und die schlechte Bogengängigkeit der Radsätze mit ihren aufgeschrumpften Rädern entgegen, die durch enge Bögen mehr gleiten als rollen. Deshalb soll der Bogenradius gemäß EBO auf Haupt-

strecken nicht weniger als 300 m, auf Nebenstrecken nicht weniger als 180 m betragen. Als Trassierungselemente für künstliche Längenentwicklungen kamen Spitzkehren¹⁹, Bogenkehren und Schlingen, ggf. in Kombination mit dem Ausfahren von Seitentälern, in Betracht (siehe Abbildung 13). Um den dafür ohnehin schon immensen Bauaufwand nicht noch höher zu treiben, mussten neben den für Eisenbahnverhältnisse kleinen Radien grenzwertige Steigungen trassiert werden, die noch heute die fahrbaren Güterzuglasten begrenzen und zum Beispiel am Gotthard schon bei 1000 t-Zügen Mehrfachtraktion erforderlich machen (siehe Abbildung 14). Gleichfalls sehr niedrig sind die fahrbaren Geschwindigkeiten (60 bis 80 km/h), die in Verbindung mit der künstlichen Streckenverlängerung die Luftlinien-Reisegeschwindigkeit immens nach unten drücken.

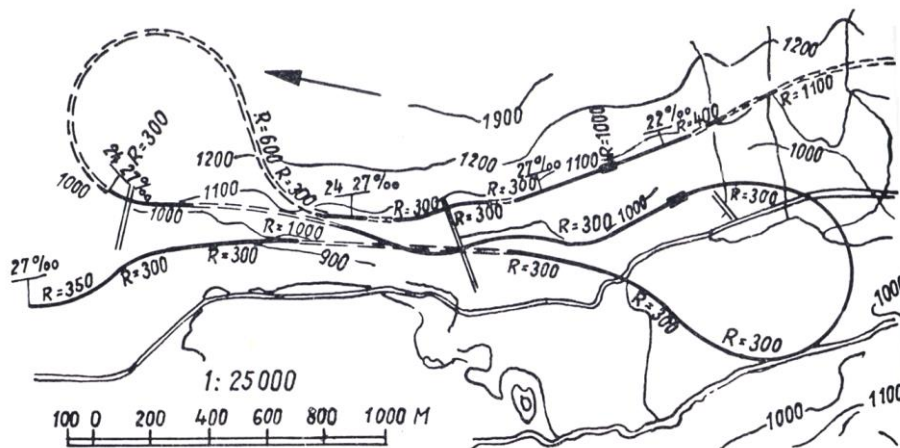


Abbildung 13: Bogenkehren der Lötschbergbahn²⁰

	größte Steigung	kleinster Radius
Semmeringbahn (Inbetriebnahme: 1854)	25 ‰	190 m
Gotthardbahn (Inbetriebnahme: 1882)	27 ‰	280 m
Arlbergbahn (Inbetriebnahme: 1884)	31 ‰	250 m

Abbildung 14: maßgebende Trassierungsparameter früher alpenquerender Bahnen

Derartige Eisenbahnstrecken sind – bei aller Schönheit – heute, zumindest im Zuge von Eisenbahnmagistralen, unzeitgemäß. Um im Wettbewerb der Verkehrsträger konkurrenzfähig zu bleiben, war deshalb der Bau von flachen und mit hoher Geschwindigkeit befahrbaren sogenannten „Basistunneln“ eine, wenn auch extrem teure, Notwendigkeit. Seit 2007 (teilweise einröhrig) in Betrieb ist der Lötschberg-Basistunnel zu Baukosten von 4,3 Mrd sFr mit einer 27 km langen Weströhre, einer 35 km langen Oströhre und 230 km/h Entwurfsgeschwindigkeit bei einer Längsneigung zwischen 3 und 13 ‰. Die Fertigstellung des etwa 12 Mrd sFr teuren Gotthard-Basistunnels mit 57 km Länge, 4 bis 7 ‰ Längsneigung und 250 km/h Entwurfsgeschwindigkeit wird für das Jahr 2017 erwartet.

	SFS Hannover - Würzburg	SFS Frankfurt am Main
minimaler Bogenradius	5.100 m	3.500 m
maximale Längsneigung	12,5 ‰	40 ‰
Tunnel	36%	19%
Einschnitt	25%	34%
Brücke	10%	3%
Damm	24%	24%
ebenerdig	5%	20%

Abbildung 15: Bauwerksanteile auf deutschen Schnellfahrstrecken

Den großen Einfluss der Längsneigung in Kombination mit dem Gleisbogenradius auf die erforderlichen Erd- und Ingenieurbauwerke macht der Vergleich der für Güterzüge geeigneten Schnellfahrstrecke Hannover – Würzburg (max. Längsneigung 12,5 ‰) mit der reinen Personenverkehrs-Schnellfahrstrecke Köln – Frankfurt am Main (max. Längsneigung 40 ‰) deutlich, die durch ähnliches Gelände deutlich bodennäher geführt ist, aber nur von den stark motorisierten Hochgeschwindigkeitszügen ICE 3 befahren werden kann (siehe Abbildung 15).

Teilgraph „Geschwindigkeit und Sicherheit“

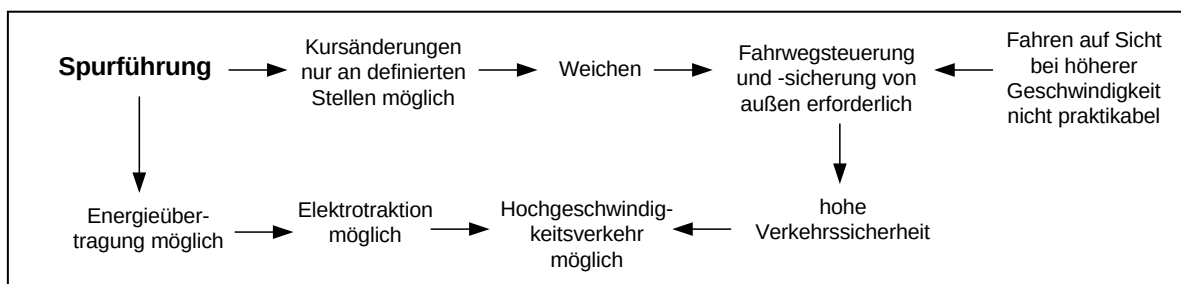


Abbildung 16: Teilgraph „Geschwindigkeit und Sicherheit“

Die formschlüssige Führung der Eisenbahn erfordert für den Wechsel in ein anderes Gleis zwingend Weichen. Diese können, wie bei der Straßenbahn, beim Fahren auf Sicht vom Fahrer gestellt werden. Beim Fahren im festen Raumabstand muss die Weiche als Element einer sog. Fahrstraße gestellt und gesichert sein, bevor die Fahrt in den betreffenden Gleisabschnitt durch Hauptsignal freigegeben werden kann. Das Stellen der Weichen ist somit ein Bestandteil der Fahrwegsteuerung und –sicherung von außen. Diese wiederum ist in Form des technisch gesicherten Fahrens der Eisenbahn im festen Raumabstand in Kombination mit der technischen Fahrstraßensicherung die Grundlage der im

Landverkehr einzigartigen Verkehrssicherheit des Systems Eisenbahn (siehe Abbildung 17).

	getötete Reisende	verletzte Reisende
	je Personenkilometer im Verhältnis	
im Zug	1	1
im Bus	4,6	27,7
im Pkw	67,2	101,0

Abbildung 17: Sicherheit der Landverkehrsträger im Vergleich²¹

Das hohe Maß an Verkehrssicherheit der Eisenbahn ist eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg, ja allein schon für die Verantwortbarkeit von Hochgeschwindigkeitsverkehr auf der Schiene. Auch wenn Menschen bereit sind, bei (vermeintlicher) Selbstbestimmung durchaus erhebliche Risiken einzugehen (Beispiel: Motorradfahrer) – bei Fremdbestimmung ist die Risikoakzeptanz um Größenordnungen geringer. Anders formuliert: Öffentlicher Hochgeschwindigkeitsverkehr auf dem Sicherheitsniveau des Straßenverkehrs ist nicht vorstellbar. Deshalb ist im bodengebundenen Verkehr Spurführung die Voraussetzung für ein verantwortbares Geschwindigkeitsniveau von 200 km/h und mehr.

Die technologische Geschwindigkeitsgrenze alltagstauglicher Bahntechnologien wird durch die Hochgeschwindigkeits-Tauglichkeit der wesentlichen Systemfunktionen gesetzt: des Trag- und Führungssystems, des Antriebs- und Bremssystems. Die Obergrenze dürfte dabei von der installierbaren Leistung limitiert werden, denn diese begrenzt die Höchstgeschwindigkeit der, was die technische Realisierung der Systemfunktionen angeht, am besten für Hochgeschwindigkeit geeigneten Bahntechnologie auf etwa 600 km/h: der Magnetschwebetechnik mit ihrem berührungsfreien Trag-, Führ-, Antriebs- und Bremssystem, mit ihrer nur linienhaften und deshalb geringen Fahrwegbeanspruchung sowie ihrem Fahrwegmotor, der die Übertragung von Antriebsleistung auf das Fahrzeug überflüssig macht. Der Bahn-Geschwindigkeitsweltrekord wurde mit 581 km/h von der japanischen Magnetschwebebahn MLX aufgestellt, dicht gefolgt vom französischen Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitszug TGV (train à grande vitesse) mit 574,8 km/h (allerdings erst nach aufwendiger Hochrüstung des Fahrzeugs, der Fahrbahn und der Oberleitung²²). Allein Magnetschwebebahnen könnten eine solche Geschwindigkeit auch im Regelbetrieb fahren. Dabei ist, abgesehen vom erforderlichen Verkehrsaufkommen, allerdings immer auch zu bedenken, dass sich die Gesetze der Physik nicht außer Kraft setzen lassen: Fahrwiderstand und somit Energieverbrauch steigen linear mit dem Luftdruck (der am Boden am größten ist) und quadratisch mit der Geschwindigkeit, die zu installierende Antriebsleistung wächst mit der 3. Potenz der Geschwindigkeit und die Schädigung der Systemkomponenten nimmt exponentiell mit der Geschwindigkeit zu. Bei der Eisenbahn wird die vertretbare Regel-Höchstgeschwindigkeit durch den an der Grenze der materiellen Möglichkeiten beanspruchten punktförmigen mechanischen Kontakt zwischen Rad und Schiene mit dem damit verbundenen Verschleiß sowie durch die berührende Strom-

abnahme auf die heute erreichte Höhe von 350, vielleicht 400 km/h begrenzt. Mehr ist nicht drin. Welche Höchstgeschwindigkeit letztlich wirtschaftlich sinnvoll ist, hängt vom Einzelfall ab. Für Deutschland jedenfalls mit seiner dichten Besiedlung und eher dezentraler Bevölkerungsverteilung scheint sich die Erkenntnis durchzusetzen, dass 250 km/h als Eisenbahn-Höchstgeschwindigkeit ausreichend sind. Angesichts kurzer Halteabstände lohnt der geringe Fahrzeitgewinn den Aufwand einer noch höheren Geschwindigkeit nicht²³.

Teilgraph „Lärm“

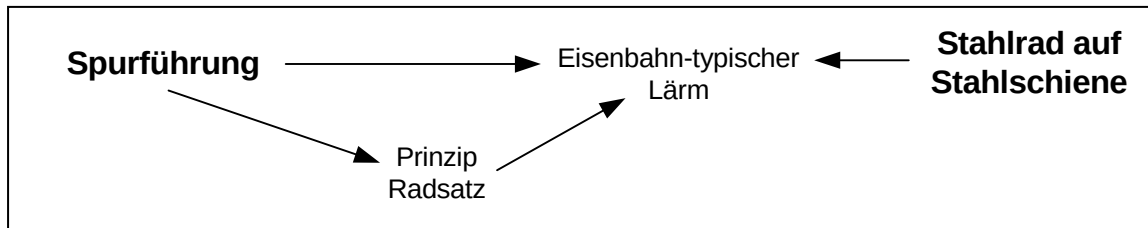


Abbildung 18: Teilgraph „Lärm“

Es liegt auf der Hand, dass ein Stahlrad auf einer Stahlschiene andersartigen Lärm verursacht als ein Gummirad auf einer Asphalt- oder Betonstraße, denn die stählernen Kontaktpartner verformen sich praktisch nicht und schwingen deshalb mit höherer Frequenz. Die für den Schienenverkehr typischen hohen pfeifenden, auch kreischenden Geräusche kennen wir vom Straßenverkehr mit seiner eher dumpfen Lärmabstrahlung nicht. Abgesehen von örtlich begrenzten Schallquellen wie z.B. Weichen oder Stahlbrücken ohne Schotterbett sind die Hauptursachen des Schienenverkehrslärms das Rollgeräusch sowie im höheren Geschwindigkeitsbereich aerodynamische Geräusche. In Kurven mit einem Radius unterhalb von etwa 500 Metern werden diese überlagert durch ein brummendes, dröhnendes Geräusch, dessen Ursache das durch Gleitvorgänge überlagerte Rollen der sich mit gleicher Umdrehungszahl drehenden Räder ist: Der reine Rollweg des bogeninneren Rades ist zu lang, so dass es gleichzeitig rückwärts gleitet, analog gleitet das bogenäußere Rad beim Vorwärtsrollen zusätzlich vorwärts; dadurch werden Rad und Schiene zu Schwingungen angeregt. Hinzu kommt in engen Kurven ein Zischen und Quietschen, verursacht durch das Anlaufen der Spurkränze an den Schienenkopfflanken. Ein weiterer, kennzeichnender Unterschied von Straßen- und Schienenverkehrslärm sind deren unterschiedliche Pegelverläufe. Abbildung 19 macht dies deutlich: Bei gleichem Mittelungspegel, d.h. bei im Mittel gleicher abgestrahlter Energie, ist der Schienenverkehrslärm gekennzeichnet durch einzelne, klar voneinander abgegrenzte Pegelspitzen bei der Zugdurchfahrt sowie längeren Ruhephasen dazwischen. Beim Straßenverkehr unterscheiden sich dagegen die Spitzenpegel deutlich weniger vom Mittelungspegel, d.h. die Spitzen sind niedriger, allerdings ohne nennenswerte Ruhephasen dazwischen.

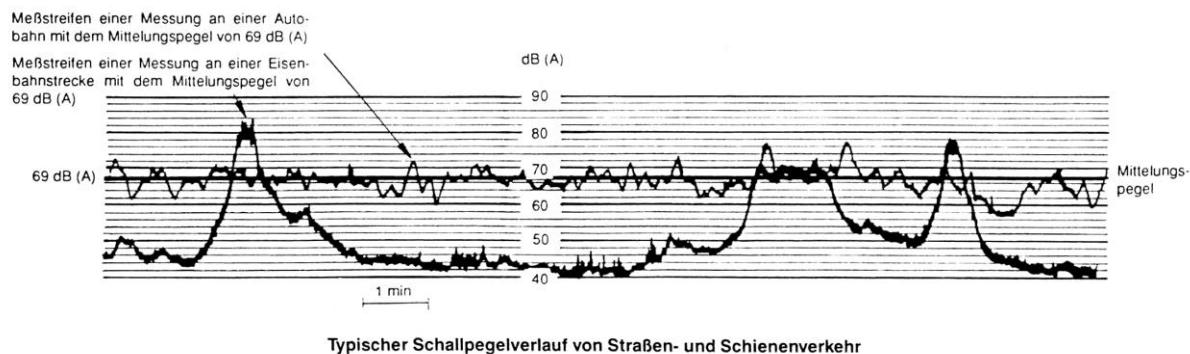


Abbildung 19: Typischer Schallpegelverlauf von Straßen- und Schienenverkehr²⁴

Internationale Untersuchungen haben gezeigt, dass Schienenverkehrslärm vom Menschen bei gleichem Mittelungspegel weniger lästig empfunden wird als Straßenverkehrslärm, und dies gilt selbst bei hoher Zugdichte und hoher Geschwindigkeit. Bei der Auslegung von Lärmschutzmaßnahmen wird deshalb den Bahnen in verschiedenen Ländern ein sog. „Schienenbonus“ zuerkannt; in Deutschland beträgt dieser 5 Dezibel (dB(A)), mit Wirkung vom 1. Januar 2015 wurde er abgeschafft.²⁵

Ein Problem der Eisenbahnen sind die absoluten Höhen der Mittelungspegel an dicht befahrenen Eisenbahnstrecken, insbesondere Güterverkehrsstrecken. Der durch Güterzüge, die mit herkömmlichen Bremssohlen aus Grauguss gebremst werden, verursachte Lärm liegt um mindestens 10 dB(A) höher als bei Verwendung von Bremsklötzen aus Kunststoff oder als bei Zügen mit Scheibenbremsen, und zwar dauernd – nicht nur beim Bremsen! In der menschlichen Empfindung sind mit modernem Material gebremste Züge nur halb so laut. Ursache dafür ist, dass Bremssohlen aus Grauguss die Radlaufflächen aufrauen und diese als Folge davon auch die Schienenfahrflächen. Das verursacht hochfrequente Schwingungen von Rad und Schiene mit entsprechender Schallabstrahlung. Das Problem lässt sich durch Fahrzeugumrüstung lösen, ohne an grundlegenden Systemmerkmalen der Eisenbahn zu rütteln. Entsprechende Programme sind in verschiedenen Ländern auf dem Weg.

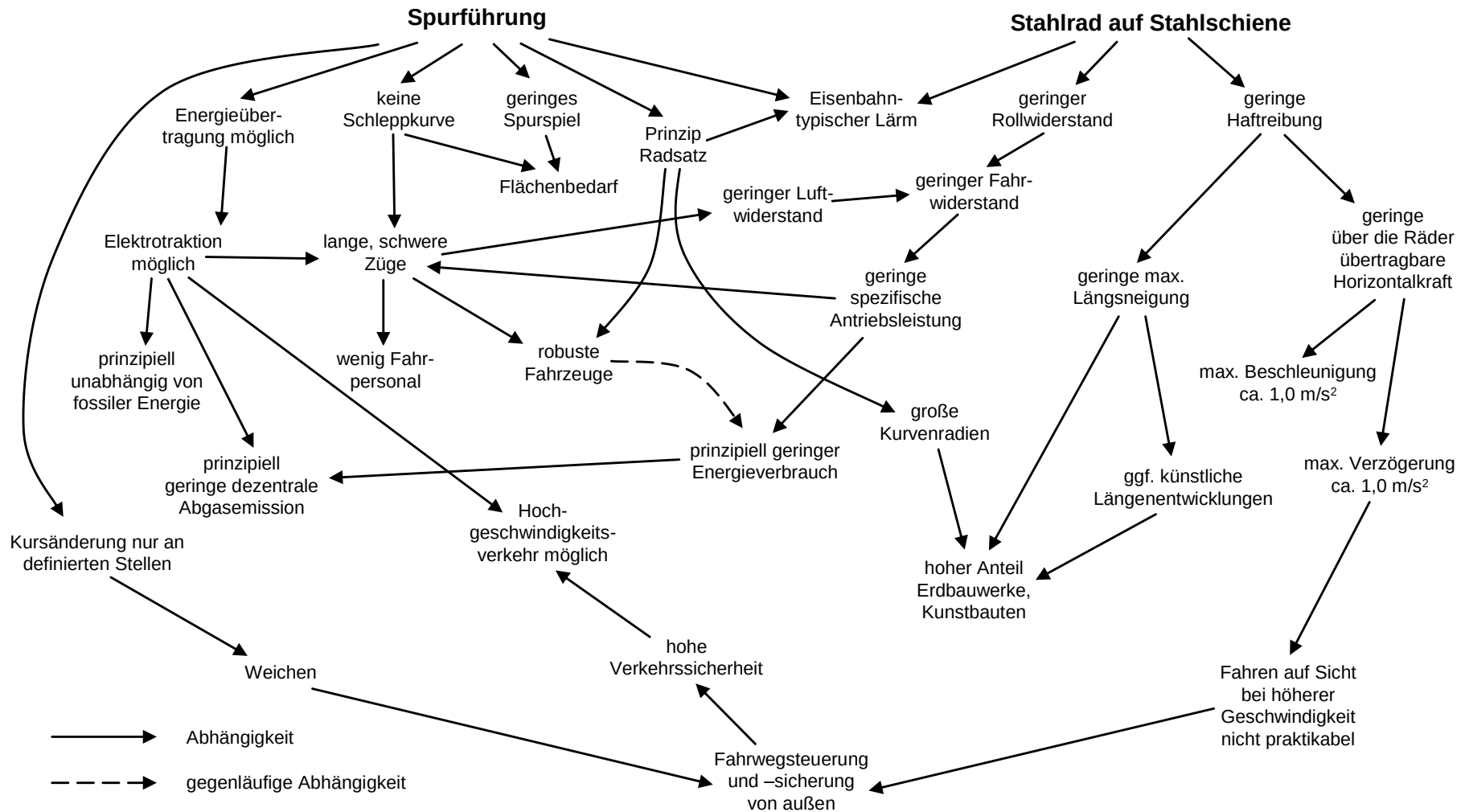


Abbildung 20: Abhängigkeitsgraph der Systemeigenschaften der Eisenbahn

¹ Normalkraft: senkrecht auf eine Fläche wirkende Kraft

² Als Bremsprinzip: elektrische Bremse

³ Beim Transrapid: Gleitkufen auf Fahrbahnträger

⁴ Physikalisch: reaktive Antriebe. Der mit einem Flugzeugmotor und Propeller angetriebene Kruckenberg-Zug erreichte 1931 zwischen Hamburg und Berlin 230 km/h. Düsenantrieb: Versuchszug der Dnjepropetrowsker Eisenbahnuniversität (für $v_{\max} = 250$ km/h, 1975), Quelle: Frischmann, M.A.: „So arbeitet das Gleis unter den Zügen“, Verlag Transport, Moskau, 1975

⁵ EBO: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

⁶ Zum Beispiel USA, Class1-Bahnen: mittlere Güterzuglänge 3137 m (Quelle: Eisenbahntechnische Rundschau 12 / 2009 S. 725)

⁷ ICE 1: 1106 kg / Sitzplatz, ICx: 827 kg / Sitzplatz (Quelle: Eisenbahnrevue International 8-9/2011 S. 375); DESIRO (BR 642): 68.200 kg / 123 = 555 kg / Sitzplatz (Quelle: Siemens Produktinformationsblatt), VW Golf TSI 77 kW: 1233 kg / 4 = 308 kg / Sitzplatz (Quelle: Produktbroschüre „Der Golf, Technik und Preise (Modelljahr 2013)“); Reisebus: 13.100 / 48 = 273 kg / Sitzplatz (MAN FRH 422, Quelle: <http://www.weserbahn.de/7272.php>, 18.5.2012)

⁸ www.bahn.de (28.04.2012): Hannover Hbf – Hamburg Hbf mit ICE: 3,1 Liter Benzinäquivalent, mit Nahverkehr (Metronom): 9,5 Liter, mit Pkw: 11,5 Liter. Nürnberg Hbf – München Hbf mit ICE: 4,3 Liter, mit Nahverkehr (RE): 8,1 Liter

⁹ Im Umweltmobilcheck unter www.bahn.de sind folgende Auslastungen hinterlegt: ICE 48,6 %, RE/RB/IRE: 23,1%

¹⁰ Dieseltraktion, z.B. ICE TD: 10,3 kW/t (de.wikipedia.org: „ICE TD“, 19.05.2012)

¹¹ www.cargobeamer.com

¹² BR 423: Achsfolge Bo' (Bo') (2) (Bo') Bo' BR 420: Achsfolge Bo'Bo'

¹³ Quelle: Fiedler „Bahnwesen“, Werner Verlag 2005

¹⁴ BOStrab: Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen

¹⁵ Bei einer vollständigen Entlüftung der Hauptluftleitung wird die sich im Ruhezustand innerhalb der Fahrzeugumgrenzungslinie befindliche Magnetschienenbremse auf die Schienen abgesenkt und eingeschaltet.

¹⁶ Die Verwendung des Wortes „sollen“ in einer Rechtsvorschrift bedeutet, dass die Vorschrift im Regelfall beachtet werden muss, wenn nicht besondere Umstände ein Abweichen von der Regel rechtfertigen (Quelle: BVerwG, Urteil vom 25. Juni 1975, BVerwGE 49,16).

¹⁷ Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems

¹⁸ z.B. Gotthardtunnel: Länge 15.003 m, Nordportal in 1106 m, Südportal in 1142 m über NN

¹⁹ Spitzkehren kommen den Serpentina von Alpenstraßen nahe: Im Umkehrpunkt wird allerdings keine enge Kurve gefahren, sondern die Fahrtrichtung gewechselt („Kopf gemacht“), was betrieblich aufwendig ist und die Fahrzeit verlängert. Auf der Strecke zwischen Fulda und Frankfurt am Main wurde die Spitzkehre Elm bei Schlüchtern im Jahr 1914 durch den 3574 m langen Distelrasentunnel entbehrlich gemacht.

²⁰ Wlaikoff "Linienführung der Eisenbahn", Transpress Berlin 1965

²¹ Deutschland, Durchschnitt der Jahre 2004 bis 2010. Quelle: Allianz pro Schiene

²² Die theoretische Geschwindigkeitsgrenze von Schienenbahnen mit Antrieb über die Räder liegt dort, wo nicht mehr genügend Vortriebskraft auf die Schiene übertragen werden könnte, um den Laufwiderstand (Summe aus Fahrwiderstand und Streckenwiderstand) zu überwinden. Bei einem Haftreibungskoeffizienten μ von 0,1 und Allachsantrieb liegt diese Grenze in der Ebene bei etwa 700 bis 800 km/h. Beim ICE 3 mit 50 % angetriebenen Rädern und $\mu = 0,1$ würden die Treibachsen bei 570 km/h durchdrehen.

²³ Die Fahrzeit über der Geschwindigkeit hat einen hyperbolischen Verlauf ($t = s/v$): Je höher die Ist-Geschwindigkeit über eine konstante Entfernung ist, desto so geringer ist der Fahrzeitgewinn durch eine Geschwindigkeitserhöhung.

Beispiel (Halteabstand 80 km, Beschleunigung: 0,4 m/s², Verzögerung: 0,8 m/s²):

Geschwindigkeitserhöhung von 150 auf 200 km/h: Fahrzeitverkürzung: 454 sec

Geschwindigkeitserhöhung von 250 auf 300 km/h: Fahrzeitverkürzung: 166 sec

²⁴ Quelle: Eisenbahntechnische Rundschau 7-8 / 1992 S. 486

²⁵ Angesezte Lästigkeitsunterschiede Straße / Schiene zugunsten der Schiene in dB(A): Schweiz bis zu 15, Niederlande 7, Österreich 5, Deutschland 5, Frankreich 3. (Quelle: Eisenbahntechnische Rundschau 7-8 / 2003 S. 473, Eisenbahnrevue International 6/2013 S. 274)