



# Hochgeschwindigkeits- verkehr in Deutschland



WILLIBALD-  
GYMNASIUM  
EICHSTÄTT

Eine Gemeinschaftspublikation des  
**Willibald-Gymnasiums Eichstätt**  
in Zusammenarbeit mit der

**DB Systemtechnik**



# Vorwort

Das Willibald-Gymnasium Eichstätt freut sich über die Möglichkeit, mit der Deutschen Bahn im Rahmen des P-Seminars der gymnasialen Oberstufe zusammenzuarbeiten.

14 Schülerinnen und Schüler des P-Seminares Physik der Oberstufe unserer Schule bekamen die großartige Chance, bei der Erstellung einer Farbbroschüre über die Hochgeschwindigkeitsneubaustrecken mit dem externen Partner Deutsche Bahn AG zusammenzuarbeiten.

Das eigenverantwortliche Arbeiten der Schülerinnen und Schüler war eingebettet in Alltag und Realität eines großen Konzerns. Dadurch erhielt die vertiefte Teamarbeit im Rahmen des Praxisteils des Seminars einen hautnahen Bezug zur konkreten Arbeitswirklichkeit. Für jeden Teilnehmer wurden mit zunehmender Projektdauer immer detailreichere Facetten der einzelnen Themenschwerpunkte erkennbar. Die Schülerinnen und Schüler erhielten so wertvolle Einblicke in die Prozessabläufe des Berufslebens, was ohne die intensive und fruchtbare Kommunikation mit den Ansprechpartnern der Deutschen Bahn nicht möglich gewesen wäre. Für deren kompetente, geduldige und hilfreiche Beratung und Begleitung sage ich im Namen der Schule ein großes Dankeschön.

Es ist nicht selbstverständlich, so gut aufgenommen und motiviert zu werden, so dass man das Gefühl bekommt, mitten im Geschehen zu sein. Ganz besonderer Dank sei daher an dieser Stelle auch Herrn Dipl.-Ing. Josef Rixner für die Initiierung des Projektes und die Kontaktherstellung gesagt, sowie Herrn Alfred Hechenberger für Betreuung und Koordination der technischen Abläufe. Möglicherweise wurde durch das große Engagement der Verantwortlichen der DB auch die Grundlage dafür gelegt, dass der eine oder die andere sogar Anregungen für die eigene Berufswahl bekam. Viele Mosaiksteinchen bilden am Ende das Gesamtbild, viele Personen tragen zum Gelingen des Werkes bei.

Ein besonderes Dankeschön darf ich aber dabei unserem Seminarleiter, Herrn Kollegen Reichenwallner sagen, der mit Geduld, Humor und Hartnäckigkeit dafür sorgte, dass das Ziel des Projektes nie aus den Augen verloren wurde und so trotz der begrenzten Zeit nun ein beachtliches Ergebnis vorgelegt werden konnte.

---

**Allen zusammen, besonders den Schülerinnen und Schülern,  
spreche ich meinen Respekt, meine Anerkennung und meinen  
Glückwunsch aus!**

**Claus Schredl**  
Oberstudiendirektor



WILLIBALD-  
GYMNASIUM  
EICHSTÄTT





# Inhalt

Vorwort Willibald-Gymnasium	Seite	3
Vorwort DB Systemtechnik	Seite	5

---

## Oberbau

1. Fahrbahn	Seite	6
2. Schiene	Seite	16

## Oberleitung

1. Energieversorgung	Seite	20
2. Tragwerk	Seite	24
3. Kettenwerk	Seite	28
4. Stromabnehmer	Seite	31

## Leit- und Sicherungstechnik

1. Gleisschaltmittel und Gleisfreimeldetchnik	Seite	32
2. Zugsicherung/Zugbeeinflussung	Seite	33
3. ETCS	Seite	34
4. GSM-R	Seite	36
5. Ausblick	Seite	37

## Akustik

1. Innenakustik	Seite	38
2. Außengeräusche	Seite	39
3. Lärmdämmungsmaßnahmen	Seite	41

## Aerodynamik

1. Aerodynamische Lasten auf die Umgebung	Seite	42
2. Aerodynamische Aspekte im Tunnel	Seite	43
3. Tunnelknall	Seite	44
4. Sicherheit bei Seitenwind	Seite	45

## HGV in Deutschland

Historischer Rückblick	Seite	48
------------------------	-------	----

---

Danksagung	Seite	50
Das Team der DB Systemtechnik	Seite	51
Quellen und Autoren	Seite	51

# Vorwort DB Systemtechnik

Was alles zusammenpassen muss, damit auf den Schienen in Deutschland Züge fahren können.

Im System Bahn müssen Infrastruktur und Fahrzeuge gemeinsam funktionieren, der operative Betrieb muss immer gewährleistet sein.

Dieser Frage sind 14 Schüler des Willibald-Gymnasiums Eichstätt unter der Leitung ihres Lehrers Marcus Reichenwallner im P-Seminar 2015 nachgegangen und haben diese Publikation erstellt. Wir als DB Systemtechnik unterstützen dieses Projekt, damit mit dieser Broschüre den Erstellern wie den Lesern die Komplexität des technischen Systems Bahn nähergebracht werden kann.

Fachleute der DB Systemtechnik, dem Ingenieurbüro der Deutschen Bahn, haben die Schüler ebenso unterstützt, wie die Experten der DB Netz. In vielen gemeinsamen Terminen wurde der Redaktionsplan erarbeitet, die Themeninhalte festgelegt, die Rechercheergebnisse besprochen und nach Textfertigstellung fanden die Korrekturphasen statt. Die Schüler lernten neben den technischen Einzelheiten und aller seiner begleitenden Themen auch die redaktionelle Arbeit für solch eine Fachpublikation kennen, das Erstellen von Literaturquellen oder Bildnachweisen.



---

Wir hoffen, dass diese Broschüre auf großes Interesse stößt und bei vielen Fragestellungen der Eisenbahntechnik helfen wird.

**Alfred Hechenberger**  
DB Systemtechnik GmbH  
Leiter Marketing

# Oberbau

Als Oberbau bezeichnet man die Schiene und das Gleisbett darunter. Der Oberbau wird in verschiedene Schichten unterteilt, die je nach Bauart variieren. Er muss an die unterschiedlichen Anforderungen an die Fahrbahn angepasst werden. Die Herausforderung beim Fahrbahnbau besteht nun darin, dass sowohl Qualität als auch hohe Umweltverträglichkeit unter den steigenden finanziellen Hindernissen zu gewährleisten sind. Dazu ist es notwendig, den Oberbau bedarfsgerecht zu dimensionieren. In die Umsetzung des Oberbaus fließen mehrere Faktoren ein, wie zum Beispiel die Belastung, die durch das Fahrzeug, dessen Geschwindigkeit und die äußeren Einflüsse z. B. Wetter entstehen.

## 1. Fahrbahn

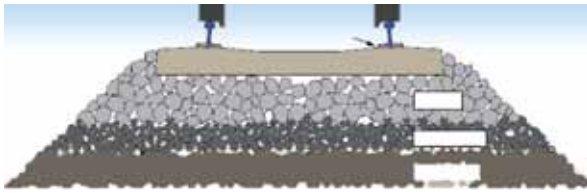
Zur Umsetzung einer HGV-Strecke bieten sich grundsätzlich zwei Fahrbahnarten an – nämlich entweder der Schotteroberbau oder die Feste Fahrbahn.

### 1.1. Schotteroberbau

Der Schotteroberbau hat sich bereits über viele Jahrzehnte wirtschaftlich bewährt und ist zu einem essenziellen Bestandteil des Eisenbahnbaus geworden.



Von unten nach oben baut sich ein Schotteroberbau aus einer Frostschutzschicht, einer Planumsschutzschicht und dem Schotter auf. Darauf liegen die Spannbeton-schwellen. Die Planumsschutzschicht verhindert, dass sich der Schotter mit der darunter liegenden Schicht vermischt. Dem Schotter kommt die wichtige Aufgabe zu, die Lagestabilität des Gleisrostes – Schienen und Schwellen – zu gewährleisten und das anfallende Wasser abzuleiten. Über den Schotter müssen sowohl vertikale als auch longitudinale und laterale Kräfte abgetragen werden. Das Fahrzeuggewicht und die zusätzlichen dynamischen Kräfte aus den Gleislagefehlern erzeugen vertikale Druckspannungen im Schotterbett. Longitudinale Kräfte entstehen hauptsächlich durch Temperaturänderungen in den Schienen und durch Anfahren und Bremsen. Laterale Kräfte treten überwiegend im Bogen durch die unausgeglichene Querbeschleunigung auf (siehe Kapitel 2.3). Die physikalischen Eigenschaften hängen von der Form und der Güte des Schottermaterials ab.



In vereinfachter Darstellung könnte man modellhaft den sogenannten inneren Reibungswinkel als einen Wert zur Beurteilung der Schotterqualität heranziehen. Er kann durch Großschergeräte erfasst werden und setzt sich aus dem Quotienten der Widerstands-/ Scherkraft, der Scherfläche und der Vertikalspannung zusammen:

$$\tan(\varphi) = \frac{F_w}{A \cdot \sigma}$$

- $\varphi$ : Innerer Reibungswinkel [°]
- $F_w$ : Widerstandskraft in der Scherfuge [kN]
- $A$ : Scherfläche [cm<sup>2</sup>]
- $\sigma$ : Vertikalspannung [kN/cm<sup>2</sup>]

Ein hoher innerer Reibungswinkel (und damit ein großer Tangenswert) wird angestrebt. Aus dieser Gleichung folgt, dass eine höhere Widerstandskraft der Scherfuge den inneren Reibungswinkel erhöht, jedoch eine größere Scherfläche (d.h. abgerundeter Schotter) und Vertikalspannung (mehr Last) jenen Winkel verringern. Durch die hohen dynamischen Beanspruchungen können am Schotter Verschleißerscheinungen auftreten. Infolge von Fahrflächenunebenheiten auf der Schiene (z.B. Riffel, Schlupfwellen, ausgefahrene Schienenschweißstöße) werden hochfrequente Schwingungen in den Schotter eingeleitet, die sich negativ auf den Zustand des Schotters auswirken. Die Schottersteine reiben gegeneinander, verschleifen und verlieren ihre Scharfkantigkeit.



Die gegenseitige Verzahnung der Schottersteine wird schwächer und es können Hohllagen unter der Schwelle entstehen, die zu Gleislageveränderungen führen. Deshalb muss das Schotterbett regelmäßig instandgesetzt werden, denn nur bei regelkonformem Schotter können sich dessen Kanten optimal verzahnen. Diese Wartung geschieht beispielsweise durch Stopfen des Schotters und Richten der Gleise mit Hilfe von Stopfmaschinen. Im Rahmen von Gleiserneuerungen wird anstelle der Betriebsbelastung mit dem sogenannten Dynamischen Gleisstabilisator (DGS) die Konsolidierung des Schotters vorweggenommen.

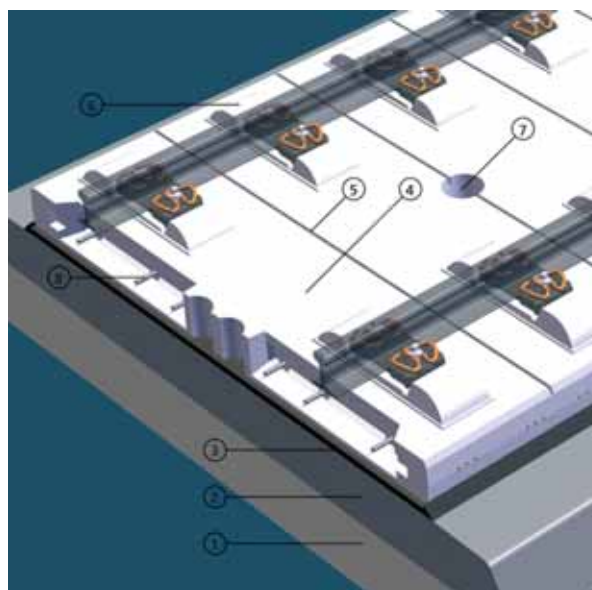
Des Weiteren kann der Schotter durch Verschmutzung seine Eigenschaften verlieren und dadurch die sichere Gleislage gefährdet werden. Anders als beim Verbrauch durch Abrieb besteht die Möglichkeit, denselben Schotter wieder seiner alten Güte (mit einem hohen inneren Reibungswinkel) anzunähern, indem er gewaschen und gebrochen wird. Auch ist die deutliche Besserung nach abgeschlossener Reinigung sichtbar.



### 1.2 Feste Fahrbahn

Mit einer Festen Fahrbahn (FF) kann der Instandhaltungs- und Erneuerungsaufwand langfristig gesenkt werden.

Es gibt verschiedene konstruktive Ausführungen der FF, die sich in der Praxis bewährt haben. Bei der Bauart „Rheda“ sind die Schwellen in die Tragplatte eingegossen, bei anderen Bauformen liegen die Schienenstützpunkte direkt auf einer festen Tragschicht auf.



- (1) Frostschuttschicht (FSS)
- (2) Hydraulisch geb. Stagschicht (DGS), d = 30 cm
- (3) Unterguss
- (4) Fertigschleifplatte
- (5) Schienenstützpunkt
- (6) Vergussöffnungen
- (7) GEFW-Stahl

Fotos: DB AG/Christian Bedeschinski, DB Netz AG, Wikipedia

Bei fast allen Bauweisen befindet sich unter der Tragplatte eine hydraulisch gebundene Tragschicht, unter der wiederum eine Frostschuttschicht verbaut ist. Gegenüber dem Schotteroberbau bietet die feste Fahrbahn mehrere Vorteile:

- I Dadurch, dass keine Gleislagekorrekturarbeiten anfallen, weist eine Feste Fahrbahn eine höhere Verfügbarkeit auf und ist zuverlässiger.
- I Eine Feste Fahrbahn bietet einen besseren Fahrkomfort, da durch die hohe Fertigungsgenauigkeit eine sehr gute und nachhaltige Gleislage erzielt wird.
- I Eine lange Nutzungsdauer ist gewährleistet.

Ein Nachteil der Festen Fahrbahn ist, dass sie erheblich teurer ist als der Schotteroberbau, was aber durch einen geringeren Instandhaltungsaufwand teilweise kompensiert wird. Außerdem kann sie den Effekt des Tunnelknalls verstärken, da sie durch ihre glatte betonierte Oberfläche eine schnellere Ausbreitung von Schallwellen begünstigt (siehe Kapitel „Akustik, Transmission“).

### 1.3 Bögen

*Vorbemerkungen:* Umweltschutz ist in der öffentlichen Wahrnehmung ein immer wichtiger werdender Aspekt im Zusammenhang mit Wirtschaft und Globalisierung. Die Menschen wollen möglichst schnell weite Strecken zurücklegen (Vernetzung zwischen verschiedenen Städten), dabei aber auch ressourcenschonend agieren. Die Hochgeschwindigkeitsneubaustrecke benötigt im Vergleich zu Autobahnen wesentlich weniger Landfläche und auch der Verbrauch von Brennstoffen ist natürlich günstiger (größere Personenzahl in einem Gefährt).

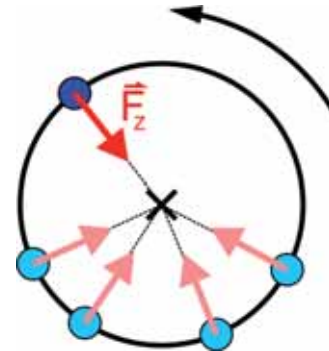
Wie viel Landfläche muss aber nun theoretisch für einen Bogen eingeplant werden und mit welcher Geschwindigkeit kann er durchfahren werden?

Im folgenden Kapitel wird versucht, die reale Situation der Konstruktion und des Baus von Bögen mit Hilfe der Schulphysik nachzuzeichnen und mit der realen Situation zu vergleichen. Im Schulunterricht betrachtet man bewegte Objekte häufig „von außen“ in einem unbewegten Bezugssystem; die Ingenieure der Deutschen Bahn arbeiten hingegen zumeist mit dem bewegten Bezugssystem „Fahrzeug“ bzw. Waggon. Beide Sichtweisen sind gleichwertig, verwenden aber für Kräfte und Beschleunigungen leicht abweichende Bezeichnungen.

Im Folgenden soll nun eine stark vereinfachte Betrachtung den groben Platzbedarf für Gleisbögen erörtern. Die dafür wichtige Größe für uns ist die sog. Zentripetal-

kraft (im äußeren Bezugssystem – im Zuginneren erlebt man eine „Zentrifugalkraft“, die aufgrund der Trägheit der nicht fixierten Insassen entsteht). Als Kind hat wohl jeder einmal einen Stein oder etwas Vergleichbares an einer Schnur kreisen lassen.

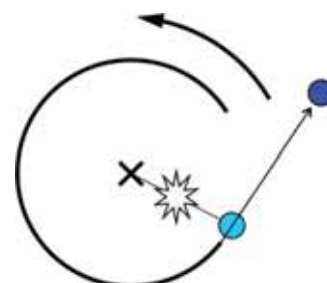
[Abb. 1: Stein an Schnur von oben]



Nun muss man wissen, dass in unserem Universum alle Gegenstände ohne äußere Kräfteinwirkung ihren aktuellen Bewegungszustand beizubehalten trachten – d.h. sie bewegen sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit (die Alltagserfahrung scheint dem zu widersprechen, werden doch alle Dinge um uns herum langsamer und stoppen schließlich). Dies ist aber nur eine Folge der allgegenwärtigen Reibungskräfte, welche die Gegenstände bremsen.

Um also einen Gegenstand auf eine Kreisbahn zu „zwingen“, braucht es eine Kraft, welche die Physiker Zentripetalkraft  $\vec{F}_z$  nennen (der kleine Pfeil zeigt an, dass es sich um eine physikalische Größe mit einer Richtung handelt). Diese Situation ist in Abbildung 1 dargestellt. In Abbildung 2 ist der Faden beispielsweise durch zu große Zugspannung gerissen, die Zentripetalkraft also entfallen, und der Stein bewegt sich geradlinig weiter.

[Abb. 2: Schnur reißt - tangentielle Bewegung]



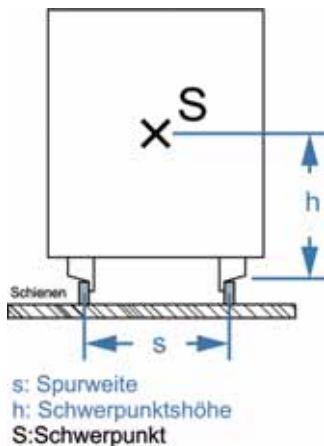
Bei diesen Überlegungen liegt eine typische Idealisierung der Physik vor: Man stellt sich die gesamte Masse des betrachteten Gegenstandes in einem Punkt zusammengedrängt vor (Massenpunkt) - dies ist zwar bei Eisenbahnwaggon wegen ihrer Ausdehnung nicht mehr möglich, aber den Schwerpunkt als Angriffspunkt für die Gewichtskraft kann man betrachten.



1.3.1 Bögen ohne Überhöhung  
(Schulphysikalisch betrachtet)

Zunächst soll ein einzelner leerer Waggon im Querschnitt betrachtet werden. Der Einfachheit halber sei er quaderförmig. Der Abstand der beiden Schienen  $s$  wird als Spurweite bezeichnet (in Deutschland sind das 1435 mm). Der Schwerpunkt  $S$  befindet sich in einer Höhe  $h$  über den Auflagepunkten (vgl. Abbildung 3).

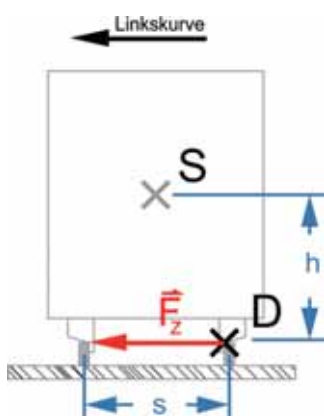
[Abb. 3: Waggon im Stand]



Der Waggon soll nun eine Linkskurve durchfahren. Dazu ist, wie oben gesehen, eine Zentripetalkraft notwendig. Bei Rad- oder Motorradfahrern entsteht sie dadurch, dass sich die Fahrer zur Kurvenmitte hin kippen lassen. Eine Teil-Komponente der jeweils wirkenden Gewichtskraft wird dann zur Zentripetalkraft, wobei das Zusammenspiel von Gummireifen und Straßenbelag die notwendige Haltekraft bewirkt.

Im ebenen Fall wird sie nach Schulwissen bei Schienenfahrzeugen durch die jeweils äußere Schiene aufgebracht und greift, wie in Abbildung 4 zu sehen, im Punkt D an (sie zeigt in Richtung Bogenmittelpunkt).

[Abb. 4: Linkskurve, Momente]



Massebehaftete Objekte haben eine Eigenschaft, die die Physiker „Trägheit“ nennen, sie beschreibt das Beharrungsvermögen eines Körpers in seinem Bewegungszustand und hängt von der jeweiligen Masse des Objekts ab: ein Spielzeugauto lässt sich mit wenig Kraftaufwand anschieben. Bei einem realen Lastkraftwagen sieht das schon schwieriger aus (er hat wegen der größeren Masse auch eine sehr viel größere Trägheit). Das wird hier unter Umständen zum Problem: Für eine sichere Kreisbewegung müsste die Zentripetalkraft in Höhe des Schwerpunktes angreifen (Abbildung 4 zeigt aber, dass das in unserem Modell nicht so ist).

Zur Veranschaulichung: Ein Hundebesitzer führt seinen Hund „Gassi“. Der Hund sieht etwas Interessantes und stürzt los. Verheddert sich die Hundeleine dann in den Füßen des Menschen, zieht es ihm buchstäblich die „Füße weg“, er wird in eine Drehbewegung versetzt.

Etwas Ähnliches kann hier passieren: Der massereiche, träge Waggon möchte geradeaus fahren (Bewegung des Schwerpunktes wird beibehalten) aber erhält am Boden einen seitwärts gerichteten Impuls – im ungünstigen Fall kommt es zu einer „Rollbewegung“ um den Schwerpunkt und tangential aus der Kurve heraus, bzw. um den Drehpunkt D zu einer Kippbewegung (abhängig vom betrachteten System). Man kann sich das mit Hilfe von Drehmomenten vorstellen (Abb. 6): um den Drehpunkt D entstehen hier zwei solche: ein linksdrehendes durch die Gewichtskraft des Waggons (Standmoment,  $F_G$  und  $w_2 = \frac{s}{2}$ ) und ein rechtsgerichtetes (Kippmoment,  $F_{\text{seit}}$  und  $w_1 = h$ ), durch die der Zentripetalkraft entgegenwirkenden Kraft des Waggons (in der Natur treten Kräfte zwischen Körpern immer paarweise auf).

Je nach Geschwindigkeit, Kurvenradius und Masse eines Waggons ändert sich die jeweilige Zentripetalkraft und damit das Kippmoment (Drehmoment = Hebelkraft mal Wirkungsarm)

[Abb. 5: Drehmoment]



Das Standmoment ist nur abhängig von der Spurweite, die zwar in Kurven minimal größer als auf gerader Strecke ist, aber für unsere Überlegungen als quasi-konstant angenommen wird. Ist das Standmoment größer als das Kippmoment, ist alles in Ordnung.

Der umgekehrte Fall ist für alle Beteiligten eher unangenehm. Rechnerisch untersuchen wir den Grenzfall, in dem beide Momente gleichen Betrag haben, also den Fall, in dem der Waggon gerade nicht kippt:

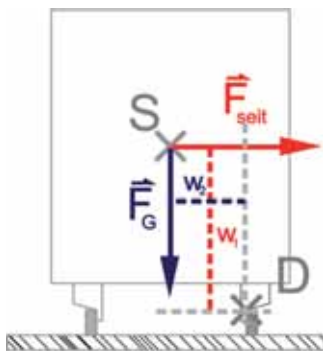
Standmoment:  $M_s = F_G \cdot \frac{s}{2}$  mit  $F_G = m \cdot g$

Kippmoment:  $M_k = F_z \cdot h$  mit  $F_z = m \cdot \frac{v^2}{r}$

Dabei sind:

- $F_G$ : Betrag der Gewichtskraft des Waggons,
- $s$ : Stützweite,
- $m$ : Masse des Waggons,
- $g$ : Erdbeschleunigung,
- $F_z$ : Betrag der Zentripetalkraft,
- $h$ : Höhe des Schwerpunktes über dem Auflagepunkt,
- $r$ : Kurvenradius,
- $v$ : Bahngeschwindigkeit des Waggons

[Abb 6: Drehmomentengleichgewicht]



Ansatz für den Grenzfall: (\*)

$$\begin{aligned}
 M_s &= M_k \\
 F_G \cdot \frac{s}{2} &= F_z \cdot h \\
 m \cdot g \cdot \frac{s}{2} &= m \cdot \frac{v^2}{r} \cdot h \quad | : m \\
 g \cdot \frac{s}{2} &= \frac{v^2}{r} \cdot h \quad | \cdot r \cdot 2 : (g \cdot s) \\
 r &= \frac{2 \cdot v^2 \cdot h}{g \cdot s}
 \end{aligned}$$

Aus dieser Formel sieht man: da Spurbreite und Erdbeschleunigung als konstant angenommen werden können, bestimmen Geschwindigkeit und Höhe des Schwerpunktes die Geometrie des Gleisbogens.

(\*) aus dieser Zeile lässt sich für die Quer-Beschleunigung, die zum Kippen führt, folgender Zusammenhang ableiten:

$$a_{\text{quer}} = g \cdot \frac{s}{2 \cdot h}$$

Diese Gleichung verwendet z. B. die amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) für ihre Kipptests bei der Zulassung neuer PKWs – dabei bezeichnet der Quotient aus halber Spurbreite und Schwerpunktshöhe den Static Stability Factor (SSF).

[Quelle: DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, National Highway Traffic Safety Administration, 49 CFR Part 575, [Docket No. NHTSA-2000-6859], RIN 2127-AC64, Consumer Information Regulations; Federal Motor Vehicle Safety Standards; Rollover Prevention – Chap. V.A: Description of Metrics ]

**Zahlen-Beispiel für eine erste Abschätzung:**

Die Erdbeschleunigung beträgt (laut Schulunterricht für Deutschland) im Schnitt  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , die Stützweite in Deutschland liegt (bei Normalspurweite 1435 mm) bei  $s = 1500 \text{ mm}$ . Gesamthöhe des Schienenfahrzeuges beträgt 3890 mm. Bei einer homogen, d.h. gleichmäßig verteilten Masse wäre der Schwerpunkt auf halber Fahrzeughöhe. Bei ungleicher Massenverteilung (Fahrgestell, Sitzbereich, ...) nehmen wir den Schwerpunkt etwas unterhalb der halben Waggonhöhe an. Unsere Annahme also:  $h = 1800 \text{ mm}$ . Das Schienenfahrzeug soll mit maximaler Geschwindigkeit von  $v = 200 \text{ km/h}$  durch den Bogen fahren können.

mit  $r = \frac{2 \cdot v^2 \cdot h}{g \cdot s}$

$$r = \frac{2 \cdot (200 \cdot \frac{1000}{3600})^2 \cdot 1,80 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,50 \text{ m}} = 7,55 \cdot 10^2 \text{ m} (= 755 \text{ m})$$

Der minimale Radius würde also etwa einen dreiviertel Kilometer betragen. ABER: im obigen Zahlenbeispiel wäre das für die von Passagieren erlebte Quer-Beschleunigung:

$$\begin{aligned}
 a_z &= \frac{v^2}{r} \\
 a_z &= \frac{(200 \cdot \frac{1000}{3600})^2}{545 \text{ m}} = 4,08 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}
 \end{aligned}$$

Dies entspricht immerhin 42% der Erdbeschleunigung. Man würde als Passagier also ca. halb so stark zur Waggonwand „gedrückt“ werden wie auf den Erdboden. Das erinnert eher an eine Achter- denn an eine komfortable Eisenbahnfahrt. Zudem haben Unfallanalysen und Untersuchungen in den 1970er Jahren ergeben, dass allgemein eine Querbeschleunigung von mehr als  $3 \text{ m/s}^2$  nötig wäre, das Schienenfahrzeug aus der Spur kippen zu lassen (so er nicht zuvor entgleist). Würde die Deutsche Bahn den oben bestimmten minimalen Kurvenradius mit der ausgewiesenen Geschwindigkeit befahren, wäre das wohl spektakulär.

Aber die verwendeten Steuerungs- und Sicherungssysteme bremsen einen zu schnellen Zug auf die ungefährlichen Geschwindigkeiten automatisch herunter.



Fotos: DB AG/Volker Emersleben

Nach einer Arbeit der TU Dresden lässt sich für eine angenommene Querbesehleunigung von  $a_{\text{quer}} = 1 \text{ m/s}^2$  folgender Zusammenhang finden:

Kurvenradius in m	Höchstgeschwindigkeit in km/h
1000	114
2000	161
3000	197
4000	228
5000	255
6000	279
7000	301

**Bemerkung:** In der Realität „kippt“ wegen der konischen Form der Räder der Waggon tatsächlich minimal nach innen, sodass streng genommen eher der weiter unten behandelte Fall mit Überhöhung des Bogens vorliegt.

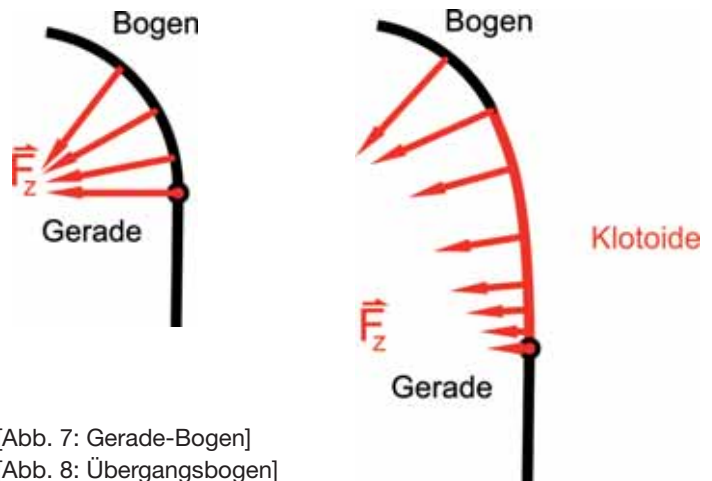
**Reale Anpassungen für die Passagiere**

In der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung von 1967 wurde der Wert für die maximale zulässige Querbesehleunigung aus Komfort- und Sicherheitsgründen auf einen Wert von  $a_{\text{quer}} = 0,85 \text{ m/s}^2$  festgelegt, was bei unserem Rechenbeispiel zu einem Kurvenradius von

$$a_z = \frac{v^2}{r} \Leftrightarrow r = \frac{1}{a_z} \cdot v^2$$

$$r = \frac{(200 \cdot \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}})^2}{0,85 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 3,6 \text{ km}$$

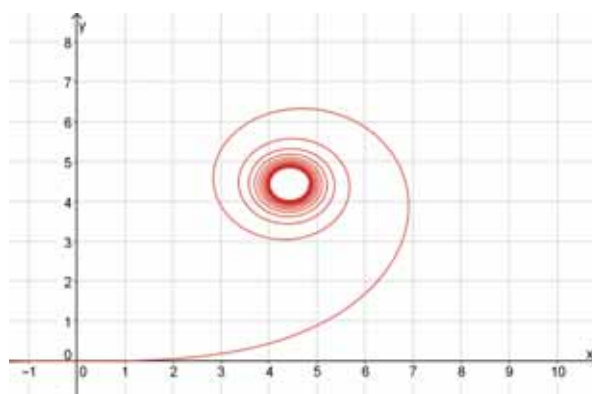
führen würde - Werte zwischen 2 km und 4 km entsprechen den realen Gegebenheiten.



[Abb. 7: Gerade-Bogen]  
[Abb. 8: Übergangsbogen]

Fährt man zunächst eine gerade Strecke und tritt dann in einen Bogen ein, so wirkt ab dem Eintrittszeitpunkt in denselben die Querbesehleunigung schlagartig und in voller Stärke (vgl. Abb. 7). Von außen als Zentripetalbesehleunigung (bzw. -kraft), die Insassen verspüren in ihrem System eine nach außen gerichtete (Schein-) Kraft, (bzw. -besehleunigung), die Zentrifugalkraft. Angenehmer ist es, wenn sich diese Seitwärtsbesehleunigung allmählich aufbaut: Ein Übergangsbogen führt die Gerade allmählich in einen Kreisbogen über.

In der Praxis wird dieser Übergangsbogen durch eine sog. „Klotoide“ (oder „Klothoide“) bewerkstelligt (vgl. Abb. 8). Dabei handelt es sich um eine besondere mathematische Kurve. Ihre besondere Form kommt anschaulich dadurch zustande, dass ihre Krümmung an jedem Punkt proportional zu der bis dahin zurückgelegten Bogenstrecke ist.



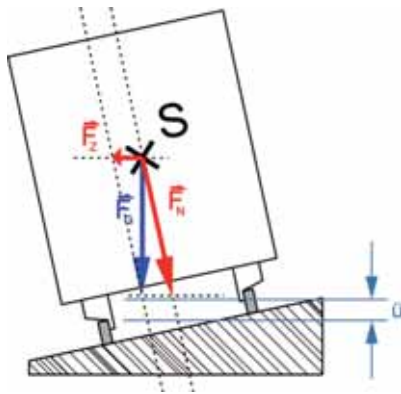
[Abb. 9]

Eine ausführliche mathematische Beschreibung der Klotoide führt an dieser Stelle zu weit – sie kann in einschlägiger Fachliteratur nachgeschlagen werden. Außer der allmählichen Überführung in einen Kreisbogen hat dieser Übergangsbogen außerdem die Funktion, das Gleis langsam zu überhöhen, was im nächsten Punkt behandelt wird.

### 1.3.2 Bögen mit Überhöhung

Zunächst wollen wir hier unsere Überlegungen mit schulphysikalischen Mitteln und dann die tatsächliche Umsetzung durch die deutsche Bahn darstellen. Wie oben schon angeführt, kann die Zentripetalkraft durch „nach innen Kippen“ bei Zweirädern erzeugt werden. Da dies bei vierrädrigen Fahrzeugen schwierig ist, behilft man sich, indem man quasi den Boden kippen lässt.

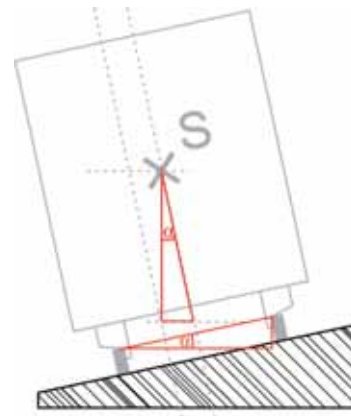
[Abb. 10: Kräfte in der Neigung]



In Abbildung 10 sieht man, dass im Idealfall die Gewichtskraft nun in zwei Teilkomponenten zerfällt: die für die Kreisbewegung notwendige Zentripetalkraft  $\vec{F}_Z$  und diejenige, die den Waggon auf die Unterlage drückt (die Unterlage bringt eine entsprechende entgegengesetzt gerichtete Haltekraft auf, die der Übersichtlichkeit halber weggelassen ist), hier als Normalkraft  $\vec{F}_N$  bezeichnet; sie wirkt bei entsprechender Schienengeometrie senkrecht („normal“ – daher der Name) auf die Unterlage.

„Idealfall“ bedeutet hier, dass zunächst Bogenradius, Fahrgeschwindigkeit und Neigung als genau aufeinander abgestimmt angenommen werden. Für einen vorgegebenen Kurvenradius braucht es einen ganz bestimmten Wert für  $\vec{F}_Z$ , die Gewichtskraft ist konstant. Im Idealfall hat man in dieser Kurve keine sonstigen seitwärts gerichteten Kräfte auf die Gleise und auf die Passagiere. Letztere werden vielmehr auf den – von außen betrachtet – schräg stehenden Wagonboden gedrückt und erfahren aus ihrer Sicht keine Querschleunigung mehr. Diese Situation nennt man ausgleichende oder ausgeglichene Überhöhung. Die Überhöhung  $\ddot{u}$  bestimmt den Neigungswinkel der Ebene und damit auch den Winkel im zugehörigen Kraft- bzw. Beschleunigungsdreieck.

[Abb. 11: Steigungsdreieck]



Wäre der Waggon frei auf der Steigung verschiebbar, könnte er sich durch Seitwärtsrutschen der Bogengeometrie anpassen und damit „seinen“ Bogenradius der gegebenen Neigung angleichen. Ist der Radius fest vorgegeben, müsste man die Neigung (und damit die Überhöhung) verändern.

Es gilt:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{F_Z}{F_G} \\ \tan \alpha &= \frac{m \cdot \frac{v^2}{r}}{m \cdot g} \\ \tan \alpha &= \frac{v^2}{g \cdot r} \\ \Rightarrow v &= \sqrt{\tan \alpha \cdot g \cdot r} \quad \text{mit } \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\ddot{u}}{r}\right) \end{aligned}$$

Die Masse spielt hier keine Rolle mehr: Ein leerer Güterzug wird die gleiche Idealgeschwindigkeit haben wie ein vollbesetzter ICE – allein die Überhöhung und der Kurvenradius bestimmen die Geschwindigkeit. Weitere Kurven können schneller durchfahren werden.

In Deutschland liegt die zugelassene Überhöhung  $\ddot{u}$  bei 150 mm, in Ausnahmefällen darf sie 180 mm betragen – das entspricht einer Neigung von 5° bis 7°.

Zahlen-Beispiel für die ideale Geschwindigkeit:

Der Bogen habe einen Radius von 1000 m und soll mit

$$v = \sqrt{\tan(\sin^{-1}(\frac{150\text{mm}}{1500\text{mm}})) \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1000\text{m}} = 34 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 124 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Der Quotient aus Überhöhung und Stützweite ist in dieser Formel grundsätzlich sehr klein. Physiker verwenden in einem solchen Fall für die Trigonometrischen Funktionen (Sinus, Tangens, Kosinus) eine sog. Kleinwinkelnäherung, d.h. es gilt

Für  $|x| \ll 1$  gilt:  $\sin(x) \approx \tan(x) \approx x$ .

In unserem Beispiel ist  $\frac{180}{1500} = 0,12$ , also kann die Kleinwinkelnäherung verwendet werden, und so erhält man als „Faustformel“ für den Zusammenhang zwischen Bogenradius und Idealgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{180 \text{ mm}}{1500 \text{ mm}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot r \cdot 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$v \approx 3,9 \cdot \sqrt{r}$$

wobei der Bogenradius  $r$  in Metern eingesetzt wird und die Geschwindigkeit  $v$  in km/h herauskommt. Zum Vergleich werden damit nun die Idealgeschwindigkeiten für die Tabelle aus dem vorherigen Kapitel neu berechnet.

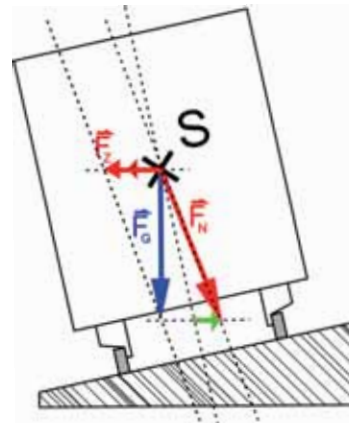
Kurvenradius in m	Höchstgeschwindigkeit in km/h
1000	123
2000	174
3000	213
4000	246
5000	275
6000	302
7000	326

Man sieht, dass die Geschwindigkeiten, mit denen der Bogen durchfahren werden kann nun höher liegen. Bei dieser Geschwindigkeit ist nun auch die Abnutzung der Schienen minimal und vor allem gleichmäßig. Ist die Geschwindigkeit größer, wird die höhergelegene Schiene stärker abgenutzt, fährt er langsamer, die tieferliegende. Fährt ein Zug nicht mit der exakt richtigen Geschwindigkeit durch einen Bogen mit Überhöhung, kommt es zu zusätzlichen seitwärts gerichteten Kräften. Strecken, die nicht nur von einem einzigen Zugtyp genutzt werden, werden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren, so dass man sich dort auf eine für alle Typen geeignete Neigung einigen muss.

Die Idealgeschwindigkeit ist dabei für eine ganz bestimmte Kombination aus Neigung und Bogenradius angelegt. Bei davon abweichenden Geschwindigkeitsbeiträgen kommt es zu sog. Überhöhungsüberschüssen und Überhöhungsfehlbeiträgen. Ist beispielsweise die gefahrene Geschwindigkeit größer als die für die Kurve ideale, fühlt sich der Passagier nach außen beschleunigt, es kommt zu einer „Drehung“ des „Normalkraftvektors“, wodurch eine zusätzliche Kraft nach außen entsteht (in Abb. 12 grün dargestellt). Durch die Geometrie der Steigung wird diese nun wieder in zwei Teilkomponenten ( $\vec{F}_{\text{Quer}}$ ,  $\vec{F}_{\text{Druck}}$ ) zerlegt (vgl. Abb. 13), eine senkrecht zur geneigten Ebene, die andere parallel zum Wagenboden nach außen. (bzw. bei zu kleiner Fahrgeschwindigkeit nach innen), die der Insasse des Waggons erfährt.

Bei entsprechender Fahrgeschwindigkeit und korrespondierender Überhöhung läuft der Wagen stabiler als ohne Kurvenüberhöhung (kein „Herausrollen“ aus der Kurve).

[Abb. 12: zu hohe Fahrgeschwindigkeit]



[Abb. 13: Querbeschleunigung]



Die Trassierung der Fahrstrecke ist aber je nach Gelände mit nicht unerheblichen Kosten verbunden, weswegen als Mittelweg zwischen beiden oben angesprochenen Situationen die Neigetechnik in den Zügen existiert. Die Kippbewegung der Wagen verringert die Querbeschleunigung auf die Fahrgäste, was ihren Fahrkomfort erhöht und die Baukosten für die Strecke verringert.

**Reale Situation**

Im realen Eisenbahnbau ist die Vorgehensweise im Vergleich zu unseren Überlegungen ein wenig anders: Ingenieure betrachten das Problem aus Sicht des Wagens, bzw. dessen Insassen. Für sie wird eine maximale zumutbare Querbeschleunigung mit  $a_{\text{quer}} = 0,85 \text{ m/s}^2$  festgesetzt, womit nach §40.3 (7), Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) folgendes gilt:

„In Gleisbogen darf die Geschwindigkeit betragen

$$v = \sqrt{\frac{r}{11,8} \cdot (u + u_f)}$$

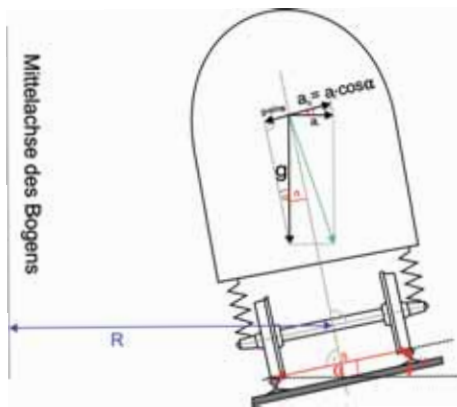
- $v$  = Geschwindigkeit in km/h
- $r$  = Bogenradius in m
- $u$  = Überhöhung in mm
- $u_f$  = Überhöhungsfehlbetrag in mm

Der Überhöhungsfehlbetrag ist in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Oberbaus, von der Bauart der Fahrzeuge sowie von der Ladung und deren Sicherung festzulegen; er soll nicht größer sein als 150 mm.“

§6 (3): „In den Bogen der durchgehenden Hauptgleise muß in der Regel die äußere Schiene höher liegen als die innere (Überhöhung). Die Überhöhung ist in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Oberbaus, von der Bauart der Fahrzeuge sowie von der Ladung und deren Sicherung festzulegen; sie darf unter Einbeziehung der sich im Betrieb einstellenden Abweichungen 180 mm nicht überschreiten.“

Dabei ist die Überhöhung  $u$  diejenige, die durch die bauliche Erhöhung des äußeren Schienenbogens im Vergleich zum inneren entsteht und  $u_f$  wird als „Überhöhungsfehlbetrag“ bezeichnet.

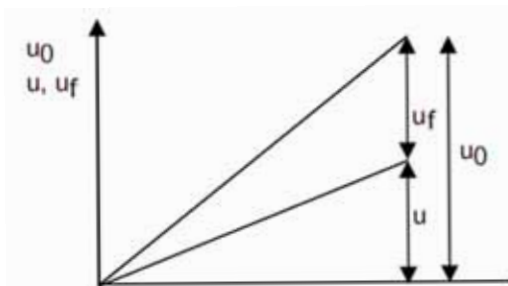
[Abb. 14: Waggon schräg]



Sind die auftretenden Größen Geschwindigkeit  $v$ , Überhöhung  $u$  und Bogenradius  $r$  so aufeinander abgestimmt, dass die resultierende Beschleunigung (in Abb. 14 grün dargestellt) aus Erdbeschleunigung  $g$  und radialer Beschleunigung  $a_r$  senkrecht zur Fahrzeugachse wirkt, nennt man dies „ausgleichende Überhöhung“  $u_0 = u + u_f$ . (Veranschaulichung in Abbildung 16).

Überhöhungsfehlbetrag = Ausgleichende Überhöhung - eingebaute Überhöhung

[Abb. 15: Überhöhung<sup>2</sup>]



Dann sind die senkrecht zur Fahrzeugachse verlaufenden Beschleunigungskomponenten gleich groß und es gilt mit

$$g \cdot \sin \alpha = a_r \cdot \cos \alpha \text{ mit } a_r = \frac{v^2}{r}, \text{ also } g \cdot \sin \alpha = \frac{v^2}{r} \cdot \cos \alpha$$

Damit folgt:

$$r = \frac{v^2 \cdot \cos \alpha}{g \cdot \sin \alpha} = \frac{v^2}{g \cdot \tan \alpha} \quad (*)$$

Nun ist

$$\sin \alpha = \frac{u}{s} = \frac{u}{1500 \text{ mm}}$$

Der Winkel  $\alpha$  ist wegen der max. zulässigen Überhöhung von  $u \leq 180 \text{ mm}$  begrenzt: ,

$$\sin \alpha \leq \frac{180}{1500} = 0,12$$

das entspricht Winkeln  $\alpha \leq 6,89210^\circ$ . Für diese sehr kleinen Winkel gilt

$$\tan \alpha \approx \sin \alpha = \frac{u}{1500 \text{ mm}}$$

(der gemachte Fehler ist vernachlässigbar klein). Das in (\*) eingesetzt ergibt:

$$r = \frac{v^2}{g \cdot \frac{u}{1500 \text{ mm}}} = \frac{v^2}{g \cdot u} \cdot 1500 \text{ mm}$$

In der Praxis werden die Zahlenwerte ohne Einheiten in die Formel eingesetzt, weswegen hier die Umformung erfolgt.

$$r(\text{in m}) = \frac{v(\text{in } \frac{\text{km}}{\text{s}})^2}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot u(\text{in mm})} \cdot 1500 \text{ mm}$$

Nach der Überhöhung aufgelöst ergibt sich für ausgleichende Überhöhung (Einheiten werden weggelassen):

$$u_0 = u_f = \frac{1500}{3,6^2 \cdot 9,81} \cdot \frac{v^2}{r} \approx 11,8 \cdot \frac{v^2}{r}$$

aufgelöst nach  $v$  ergibt sich die Formel aus der EBO:

$$v = \sqrt{\frac{r}{11,8} \cdot (u + u_f)}$$

Diese ausgleichende Überhöhung wird nur für eine bestimmte Geschwindigkeit angenommen. Wird von dieser Geschwindigkeit abgewichen, liegt die resultierende Beschleunigung nicht mehr in der Fahrzeugachse; dann wirkt eine Seitenbeschleunigung  $a_q$  (vgl. Abb. 12).

<sup>1</sup> nach Vortrag zur Beschreibung der Gleisgeometrie, DB Netz AG, Oberbautechnik, I. Npf 11

<sup>2</sup> aus Bahnbau, Volker Matthews, B.G. Teubner Verlag



Fotos: DB AG/Uwe Mieth

Ist die Geschwindigkeit größer als für  $u_0$  nötig, dann ist  $a_q$  zur Bogenaußenseite hin gerichtet:  $u_f$  wird als Überhöhungsfehlbetrag bezeichnet; ist die Geschwindigkeit kleiner, dann ist  $a_q$  zur Bogeninnenseite gerichtet; dann bezeichnet  $u_u$  den sog. Überhöhungsüberschuss.

Im Fall, dass die bauliche Überhöhung  $u$  die Beschleunigung in Gleisebene nicht vollständig ausgleicht, gilt

$$a_q = a_r \cos \alpha - g \sin \alpha$$

$$a_q = \frac{v^2}{r} \cdot \cos \alpha - g \cdot \sin \alpha$$

mit

$$a_r = \frac{v^2}{r}, \sin \alpha = \frac{u}{s}$$

und

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - \left(\frac{u}{s}\right)^2}$$

$$a_q = \frac{v^2}{r} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{u}{s}\right)^2} - g \cdot \frac{u}{s}$$

Geschwindigkeit $v$	$a_q$	Abweichung von $u_0$
größer als für $u_0$ berechnet	positiv (zur Bogenaußenseite hin gerichtet)	Überhöhungsfehlbetrag $u_f$
kleiner als für $u_0$ berechnet	negativ (zur Bogeninnenseite hin gerichtet)	Überhöhungsüberschuss $u_u$

Für den Wurzel-Ausdruck führt man nun eine sog. Taylorreihenentwicklung durch, welche die Berechnung stark vereinfacht und nur zu vernachlässigbar kleinen Abweichungen führt:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{u}{s}\right)^2} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u}{s}\right)^2 + \text{Terme höherer Ordnung}$$

Die Terme höherer Ordnung treten mit den Potenzen 2 und höher auf. Ihre Werte werden, da die Quotienten  $\frac{u}{s}$  sehr klein sind, um ein Vielfaches kleiner und verfälschen das Ergebnis daher kaum. Es folgt:

$$a_q = \frac{v^2}{r} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{u}{s}\right) - g \cdot \frac{u}{s} = \frac{v^2}{r} - \left(g + \frac{v^2}{2r}\right) \cdot \frac{u}{s}$$

$$a_q = \frac{v^2}{r} - \left(g + \frac{v^2}{2r}\right) \cdot \frac{u}{s}$$

Aufgabe:

Wie schnell kann ein Fahrzeug durch einen Bogen mit einem Radius von 500 m bei einer Überhöhung von 150 mm fahren, damit die unausgeglichene Querbeseleunigung nicht mehr als  $1 \text{ m/s}^2$  beträgt? Der Messkreisebenenabstand  $s$  ist 1,5 m.

$$a_q = \frac{v^2}{r} - \left(g + \frac{v^2}{2r}\right) \cdot \frac{u}{s}$$

$$a_q = \frac{v^2}{r} - g \cdot \frac{u}{s} - \frac{v^2}{2r} \cdot \frac{u}{s}$$

$$a_q + g \cdot \frac{u}{s} = \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{u}{s}\right) \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{\left(a_q + g \cdot \frac{u}{s}\right) \cdot r}{\left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{u}{s}\right)} = v^2$$

$$v = \frac{\left(a_q + g \cdot \frac{u}{s}\right) \cdot r}{\left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{u}{s}\right)}$$

$$v = \frac{\left(1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{0,15 \text{ m}}{1,5 \text{ m}}\right) \cdot 500 \text{ m}}{\left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{0,15 \text{ m}}{1,5 \text{ m}}\right)} = 32,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 116 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$



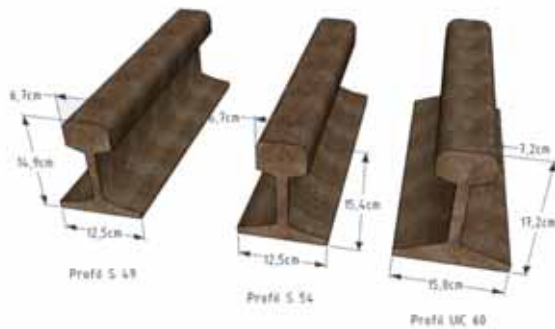
## 2. Schiene

### 2.1 Funktion

Die Schiene ist dazu da, das Fahrzeug zu tragen und zu führen, um so die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs zu gewährleisten. Sie ist zugleich das höchstbeanspruchte Bauteil des Oberbaus.

### 2.2 Die Schienenform

Im Gleisbau ist die Breitfußschiene oder auch Vignolschiene am verbreitetsten. Ihr Querschnitt mit dem breiten Fuß macht sie standhaft und gewährt eine optimale Kraftübertragung auf die darunter liegenden Schichten. Außerdem können am Fuß die Spannklemmen angebracht werden, die die Schiene auf der Schwelle befestigen. Auf dem Fuß steht senkrecht der Steg, der den Schienenkopf trägt. Darauf wird das Rad mit dem Spurkranz geführt. Auf hoch belasteten Gleisen setzt die Deutsche Bahn das Schienenprofil UIC 60 ein.



### 2.3 Schienenherstellung

Am Anfang einer Schiene steht immer ein Stahlblock. Dieser wurde zuvor gegossen und auf die richtige Länge zur Weiterverarbeitung gewalzt. Aus seiner Zusammensetzung geht bereits hervor, was für eine Schiene es später einmal werden soll. Nun muss der Stahlblock in einem Ofen auf über 1000° C erhitzt werden, bevor er bis zu zehnmal gewalzt wird, wobei er immer länger und schmaler wird. Bei jedem Walzdurchgang kommt der Stahlblock seiner charakteristischen Schienenform bis



zu der gewünschten Länge näher. Beim letzten Walzdurchgang erhält die Schiene das Walzzeichen. Es gibt Auskunft über Hersteller, Profil, Erzeugungsjahr und Güte. Als nächstes muss die Schiene auf dem Kühlbett abkühlen. Danach ist sie noch etwas krumm.

Deshalb muss die Schiene im Anschluss gerade gebogen werden, d.h. sie muss auf der Rollenrichtmaschine horizontal und vertikal gerichtet werden. Dabei durchläuft sie mehrere Rollen hintereinander, die sie so nach oben und unten bzw. rechts und links richten, sodass sie gerade wird. Nach dem Richten wird die Schiene schließlich vermessen und geprüft. Sie wird mit Hilfe von Ultraschall auf Innenfehler und Fahrflächenunebenheiten untersucht. Nun kann die Schiene ausgeliefert werden.



## 2.4 Schienenschweißen

Nachdem die Schienen im Gleis abgelegt worden sind, werden die einzelnen Schienenstücke zu einem lückenlosen Gleis verschweißt. Bei mehreren Schweißungen werden die Schienen mit mobilen Abbrennstumpfschweißmaschinen verschweißt. Zuerst müssen die Schienenenden ausgerichtet und eingespannt werden, bevor sie mit elektrischem Strom erwärmt werden. Beim Vorwärmen werden die Enden mehrmals einander zugeführt und wieder getrennt. Ist die Schweißtemperatur erreicht, werden die Schienenenden mit konstantem Druck gegeneinander gepresst. Die dabei entstandene Schweißwulst wird anschließend entfernt und die Schweißung geschliffen.

Das Abbrennstumpfschweißverfahren ist vorteilhaft, da kein schienenfremdes Material an der Schweißstelle benötigt wird und dadurch eine größere Festigkeit erreicht wird. Das ist wichtig, um Schweißbrüche zu vermeiden.



Eine weitere wichtige Funktion der Schienenbefestigung ist die elektrische Isolation der Schiene vom Rest des Gleisrostes. Dies ist notwendig, um Verluste bei den Signalen der Gleisstromkreise zu verhindern. (Siehe Kapitel Leit- und Sicherungstechnik)



## 2.5 Schienenbefestigung

Die Schienenbefestigung hat die Aufgabe, die Belastung über die Schwelle in den Schotter definiert abzuleiten, und dadurch zu verhindern, dass die Spurweite der Schienen sich ändert. Zur Fixierung der Schiene auf der Schwelle wird im Hochgeschwindigkeitsverkehr sowohl auf der festen Fahrbahn als auch beim Schotteroberbau üblicherweise die Spannklemme eingesetzt.

Die Spannklemme wird mit Hilfe von Schrauben und Kunststoffdübeln in der Schwelle befestigt. Unter der Klemme befindet sich eine Druckverteilungsplatte aus Stahl und seitlich von ihr Kunststoff-Winkelführungsplatten, die die Position der Schiene sichern. Der Vorteil der Spannklemme ist die Elastizität, welche aus ihrer W-Form resultiert.





**2.6 Schienenfehler und Instandhaltung**

Unter Schienenfehlern versteht man Schäden, Brüche und Risse an Schienen und an Schienenverbindungsstellen. Im Folgenden werden die häufigsten Schienenfehler dargestellt.

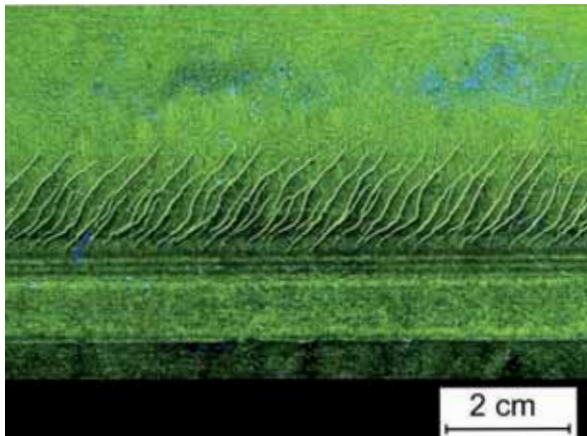
**2.6.1 Head Checks**

Head Checks sind feine Risse in den Schienen, die häufig in bogenäußeren Schienen und an Fahrkanten und Fahrflächen der Schienen auftreten. Es handelt sich dabei um Ermüdungsschäden, die durch den Rollkontakt entstehen. Die Gefahr der Head Checks besteht darin, dass sich die Risse immer weiter ins Schieneninnere ausbreiten. Mit Hilfe von Wirbelstromprüfung können sie schon früh erkannt werden.

höhten dynamischen Beanspruchung der Gleise und Fahrzeuge. Kleinere Riffel bis 0,4 mm Tiefe werden mit Schleifmaschinen beseitigt. Für tiefere Riffel ist profilgerechtes Hobeln mit einem Hobelaggregat notwendig. Bei beiden Verfahren ist ein Ausbau der Schiene nicht erforderlich.

**2.6.3 Belgrospis**

Rissnester, die alle 2 -10 cm erscheinen heißen Belgrospis. Sie kommen nur in Verbindung mit Riffelschäden vor und treten vor allem bei Geschwindigkeiten über 200 km/h auf. Da es sich hier wie bei den Head Checks ebenfalls um Risse im Schienenmaterial handelt, können sie auch mit dem Verfahren der Wirbelstromprüfung erkannt werden.



**2.6.2 Riffel**

Als Riffel werden wellenartige Fehler auf der Schienenoberfläche bezeichnet. Für ihre Entstehung sind Reibung, Schlupf und Schwingungen zwischen Schiene und Rad verantwortlich. Eine Riffelwellenlänge ist zwischen 3 cm und 6 cm lang und die Riffeltiefe beträgt 0,1 – 0,4 mm. Sie wirken sich zwar nicht negativ auf die Sicherheit des Eisenbahnverkehrs aus, führen aber zu einer stärkeren Lärmbelastigung und zu einer er-

**2.6.4 Squats**

Ebenfalls nur bei Geschwindigkeiten über 200 km/h sind Squats zu beobachten. Darunter versteht man v-förmige zur Fahrkante hin offene Risse an der Schienenkopfoberfläche in Zusammenspiel mit einer Ein-senkung im Material. Durch Korrosion nehmen Squats eine dunkle Farbe an.



### 2.6.5 Eindrückungen

Für Eindrückungen sind Fremdkörper wie z. B. Metall- oder Schottersplitter auf Rad oder Schiene verantwortlich. An dieser Stelle beginnt das Material zu korrodieren und es entsteht ein flächenhafter Riss, der unter flachem Winkel in die Schiene hineinwächst.



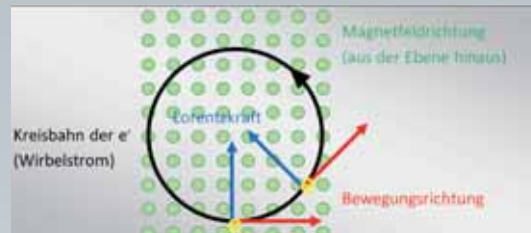
Innovative Technik für modernste Schienepflege bei der DB Netz AG: Die neuen Hochleistungsschienenschleifmaschinen arbeiten mit doppelter Geschwindigkeit.

Fotos: DB AG/Hauke Hass, DB Systemtechnik

## Infobox

### Wirbelstromprüfung

Durch eine Spule wird ein wechselndes Magnetfeld erzeugt, wodurch Wirbelströme in das Schienenmaterial induziert werden. Im Schienenstahl befinden sich Elektronen, also viele kleine negative Ladungen. Bewegt man diese nun senkrecht zu den Feldlinien eines wechselnden Magnetfeldes, so wirkt auf sie die sogenannte Lorentzkraft.



Die Richtung der Kraft ergibt sich bei negativen Ladungen aus der „Dreifingerregel“ der linken Hand.



Durch die Lorentzkraft, die auf die Elektronen wirkt, bilden sich innerhalb der Schiene Wirbelströme aus. Wirbelströme heißen sie deshalb, weil sie kreisförmig und in sich geschlossen sind. Sind nun Risse in der Schiene können sich die Wirbelströme weniger stark ausbilden, da das leitfähige Material durch den Riss unterbrochen ist und somit die Größe der Wirbel begrenzt ist. Da durch die Wirbelströme wieder ein Magnetfeld entsteht, das der Ursache seiner Entstehung entgegengerichtet ist (Regel von Lenz), können so Risse im Schienenstahl identifiziert und gemessen werden.





# Oberleitung

Um einen mehr als 3.000 t schweren ICE auf 330 km/h zu beschleunigen, werden enorme Mengen an Energie in Form von Strom benötigt. Dieser muss von der Oberleitung bereitgestellt werden. Zur Oberleitung gehört aber keinesfalls nur der Fahrdrabt, sondern auch die zugehörige Halterung (der Ausleger), die Masten und der Stromabnehmer, welcher die Verbindung zwischen Oberleitung und Schienenfahrzeug darstellt. Der Strom für die Oberleitung wird aus verschiedenen Kraftwerken gewonnen, welche somit auch einen wichtigen Bestandteil darstellen. Diese Themen und einige Spezialfälle werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

## 1. Energieversorgung

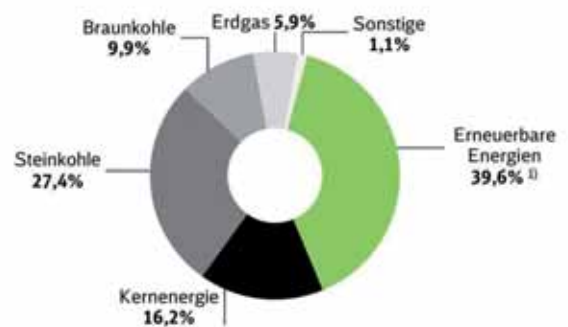
### 1.1 Energiegewinnung

Damit Züge in Bewegung gebracht werden können, benötigt man Energie. Diese wird zumeist in Kraftwerken gewonnen, wobei man im Wesentlichen zwei Arten von Energiegewinnung unterscheiden kann: Einspeisung aus dem öffentlichen Netz durch Umrichter oder Umformer oder aus eigens von der Deutschen Bahn errichteten Kraftwerken direkt ins Bahnstromnetz. Anschließend wird der gewonnene Strom aufgeteilt in das 110 kV starke Bahnenergienetz und Fahrleitungsnetz mit einer Spannung von 15 kV.

Die Deutsche Bahn verwendet für ihre Energiegewinnung ein breites Netz an Kraftwerken und somit an Energiearten wie zum Beispiel Kohle- und Kernenergie, aber auch erneuerbare Energien wie beispielsweise Windkraft. Derzeit stammen 39,6% des Bahnstroms aus erneuerbaren Energieträgern. Bis 2050 will die Deutsche Bahn ausschließlich „grüne“ Energie nutzen.

[Bild 1: Diagramm Energieträger in Prozent]

**Beschaffter Traktionsstrommix der DB Energie in Deutschland im Jahr 2014 in Prozent (%)**



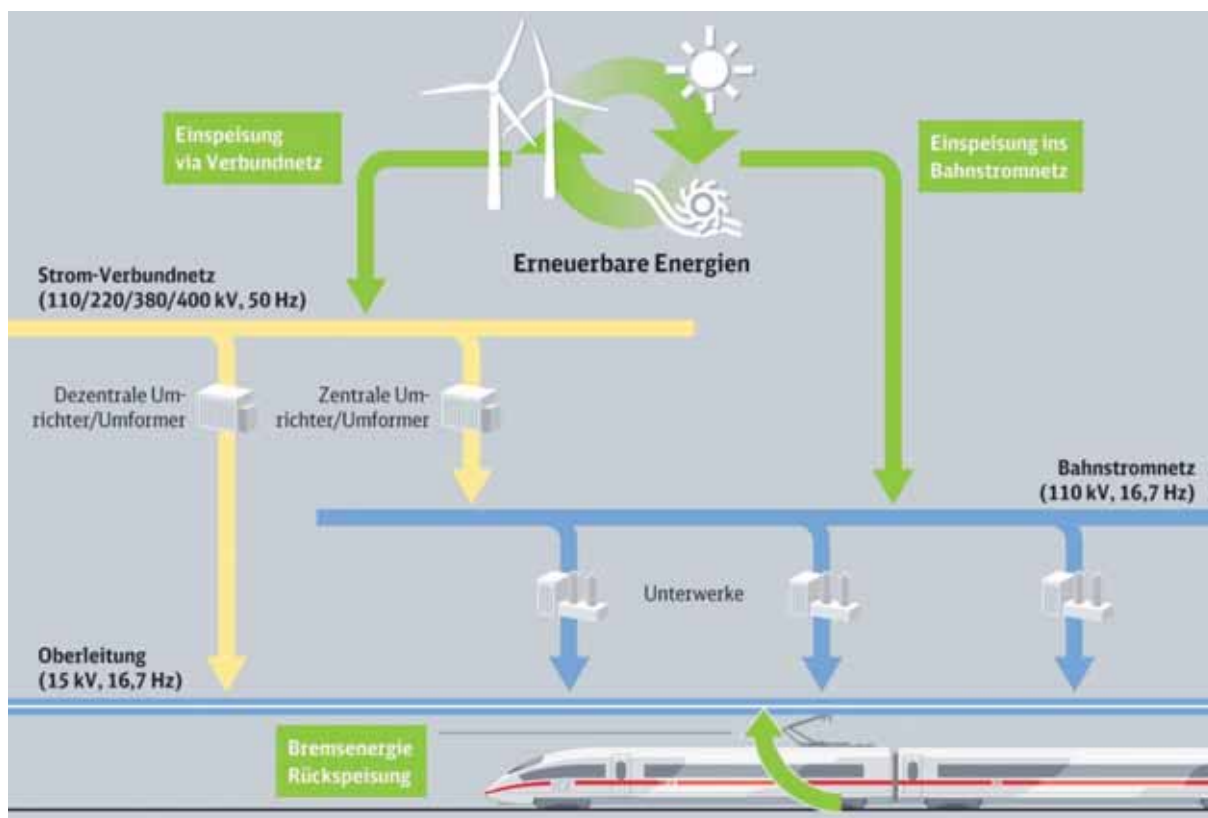
Vorläufige Werte im Hinblick auf die abschließende Berichterstattung gemäß Energiewirtschaftsgesetz  
<sup>1)</sup> Ohne Umwelt-Plus und Eco Plus

In der oben gezeigten Grafik bezüglich der Energieträger erkennt man, dass die Deutsche Bahn den prozentualen Anteil fossiler Brennstoffe verringern konnte, um die Verwendung erneuerbarer Energien zu fördern. Somit hat die Deutsche Bahn ihr vorläufiges Ziel, die Verwendung von erneuerbaren Energien bis 2020 auf 35% zu erhöhen, bereits erreicht und kommt dem nächsten, der Abschaltung der fossilen Kraftwerke und Verwendung von alleine erneuerbaren Energien immer näher.



Wie bereits erwähnt besteht das Stromnetz der Deutschen Bahn sowohl aus eigens gewonnenem, als auch aus vom öffentlichen Netz eingespeistem Strom. Dieser Strom aus dem sogenannten dezentralen Netz wird durch Umrichter- und Umformwerke auf den Strom der Deutschen Bahn angepasst. In diesen Werken werden der 220 - 380 kV starke mit einer Frequenz von 50 Hz schwingende Drehstrom auf einen Einphasen-Wechselstrom von 15 kV und einer Frequenz von 16,7 Hz umgeformt. In der Abbildung werden die verschiedenen Einspeisungswege des Stroms gezeigt.

Die Verwendung einer Frequenz von 16,7 Hz beruht auf einem historischen Hintergrund. Den ersten Elektromotoren war es technisch nicht möglich eine 50 Hz große Frequenz zu verarbeiten. Damals war der exakte Wert  $16 \frac{2}{3}$  und wurde erst im Jahr 1995 auf 16,7 umgestellt. Außerdem wären die Verlustleistungen zu groß geworden. Später entschied man sich aus Kostengründen gegen eine Umrüstung auf 50 Hz Strom. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass man im 16,5 Hz-Bereich einen geringeren Leitungsverlust hat.



Für das Stromnetzwerk der Deutschen Bahn wird ein Einphasen-Wechselstrom mit der Frequenz von 16,7 Hz verwendet. Dieser Strom verläuft phasensynchron, was das Einspeisen von beiden Fahrdrähtenden ermöglicht. Jedoch trennt man hier zentrales und dezentrales Netz, da die Synchronisierung aus dem dezentralen Netz nicht sichergestellt ist. Deshalb sind bei Oberleitungen zwischen synchronem und asynchronem Netz sogenannte Schutzstrecken erforderlich. Somit ist die Trennung beider Netze gewährleistet. Die Phasensynchronität gewährleistet auch eine Stromversorgung aus beiden Enden des Fahrdrahtes. Das ist ein wesentlicher Vorteil dieser Versorgungsart, da die Versorgungssicherheit, falls eine der beiden Speiseleitungen ausfällt, gewährleistet ist.

#### Sonderfall: Kurzschluss:

Bei Kurzschluss wird eine automatische Kurzschlussprüfung durchgeführt. Falls diese einen dauerhaften Kurzschluss ergibt, wird der betroffene Speise- bzw. Schaltabschnitt abgeschaltet. Außerdem muss der Kurzschlussort aufgesucht werden und eventuelle Schäden sind zu reparieren. Auch bei Reparaturen muss der entsprechende Abschnitt abgeschaltet und sichtbar – aus Arbeitsschutzgründen – bahngeerdert werden. Arbeiten an der Oberleitung sind generell nur im geerdeten Zustand erlaubt, da sonst Lebensgefahr besteht z. B. durch induktive Einkopplung in den abgeschalteten Abschnitt aus benachbarten Oberleitungen oder bei versehentlicher Einfahrt eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs in den abgeschalteten Abschnitt.

#### 1.2 Stromnetz - Deutsche Bahn

Das Stromnetz der Deutschen Bahn ist nicht nur durch Messungen vom öffentlichen Netz zu unterscheiden. So erkennt man bereits an den Strommasten zu welchem Netz dieser gehört. Am Bahnstrommasten befinden sich neben dem sogenannten „Erdseil“ an der Spitze des Masten noch zwei Leiterseile oder ein Viel-



Bahnstromleitung



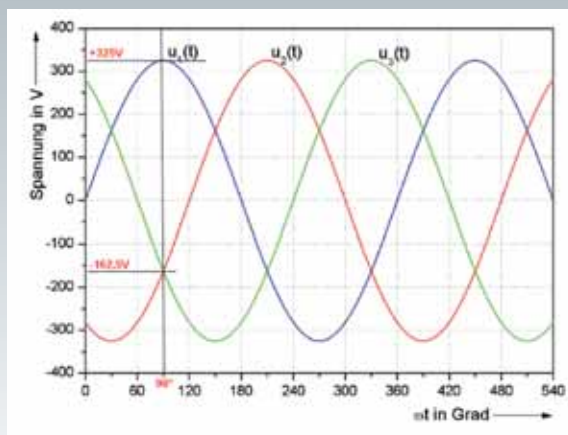
Stromleitung des öffentlichen Landesnetzes

faches davon, am öffentlichen Netz hingegen sind drei Leiterseile oder ein Vielfaches davon angebracht, da die Phasen jeweils um  $120^\circ$  verschoben sind.

#### 1.3 Stromrückführung

Die Stromrückführung erfolgt über das Erdreich. Das Schienenfahrzeug leitet den Strom über die Schienen zurück, welche durch die Räder mit dem Zug verbunden sind. Die Masten wiederum sind über sogenannte „Erdungen“ mit der Schiene verbunden. Über die Mastfundamente wird außerdem eine ausreichende „Erdfähigkeit“, das heißt ein hinreichend geringer Übergangswiderstand zum Erdreich hergestellt.

## Infobox



Der Unterschied zwischen Einphasen-Wechselstrom und Drehstrom (Dreiphasen-Wechselstrom) liegt in der Anordnung der sinusförmigen Phasen. Der Drehstrom besteht aus einem geerdeten Nullleiter und drei Phasenleitern. Jeder dieser drei Leiter trägt eine Spannung von 230 V. Sie sind im Gegensatz zum Einphasen-Wechselstrom um  $120^\circ$  von Phase zu Phase verschoben, sodass eine 400 V große effektive Spannung zwischen zwei Phasen entsteht. Beim Einphasen-Wechselstrom fehlen zwei Phasenleiter, sodass neben dem Nullleiter nur eine sinusförmige Spannungskurve entsteht.

## Überblick über das Bahnstromnetz: 16,7-Hz-Energieerzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungsanlagen in Deutschland



© DB Energie GmbH, Stand: 31.12.2012, Alle Rechte vorbehalten

### Infos:

Das Netz der Deutschen Bahn erfasst ca. 7.800 km und gewann im Jahr 2014 die Energie aus 52 Kraft-, Umformer- und Umrichterwerken sowie aus 185 Unterwerken, die die 110 kV in 15 kV transformieren. Die Länge der verwendeten Spannungskabel erstreckt sich auf über 90.000 km. Der verwendete Kupferfahrdraht, welcher die Kontaktfläche zum Stromabnehmer darstellt, trägt einen Querschnitt von 100 - 120 mm<sup>2</sup> (Zum Vergleich: Der Querschnitt eines Leiters im Haushalt beträgt vergleichsweise nur 1,5 - 2,5 mm<sup>2</sup>).

## 2. Tragwerk

Fundamente, Masten und Ausleger: Diese drei Teile bilden das Herzstück der Oberleitung. Sie sind dafür verantwortlich, dass das Kettenwerk in Position bleibt und müssen allen Umständen und Witterungen standhalten. Gerade bei Hochgeschwindigkeitsstrecken treten die größten Kräfte auf, da für gute Befahreigenschaften des Kettenwerks bei hohen Geschwindigkeiten hohe Spannkkräfte benötigt werden.

### 2.1 Fundamente

Fundamente müssen der gesamten Oberleitung einen sicheren Stand geben und alle Kräfte, die auf die Masten, Ausleger und das Kettenwerk wirken, in den Boden leiten. Die meistverwendeten Methoden sind Pfahl- und Rohrgründungen aus Stahl sowie Blockfundamente aus Beton. Die verschiedenen Arten werden je nach Anwendungsfall, Bodenbeschaffenheit und den abzutragenden Kräften und Momenten ausgewählt. Für viele Anwendungsfälle gibt es im Regelwerk der DB Netz AG Standardlösungen. In Einzelfällen muss diese Belastung mit Hilfe von statistischen Berechnungen bestimmt werden.

#### Pfahlgründung:

Bei diesem Verfahren wird zuerst ein Pfahl aus Stahl in das Erdreich gerammt oder aus Lärmschutzgründen hineinvibriert. Auf diesem Pfahl wird ein Pfahlkopf aus Beton errichtet, der den Rammpfahl umschließt und auf dem später der Mast auf die im Pfahlkopf befindlichen Ankerbolzen aufgesetzt wird. Danach wird der Zwischenraum zwischen Mastfuß und Pfahlkopf mit Mörtel vergossen.

#### Rohrgründung:

Alternativ zur Pfahlgründung kann ein Stahlrohr in das Erdreich gerammt oder gebohrt werden. Anschließend wird der Mast in das Rohr eingesetzt und der verbleibende Zwischenraum zwischen Mast und Rohr mit Beton vergossen.

#### Blockgründung:

Ebenfalls aus Beton werden die Blockfundamente in der Regel in rechteckiger Grundform gefertigt. Die Größe hängt wiederum von den abzutragenden Lasten und der Bodenbeschaffenheit ab. Nur ein kleiner Teil eines Blockfundaments ragt über die Oberfläche hinaus. In das Blockfundament sind wiederum Ankerbolzen eingegossen, auf die dann Stahlmaste aufgesetzt werden können.

### 2.2 Masten

Die Masten müssen allen Kräften, die auf sie wirken, standhalten und diese an das Fundament weiterleiten. Dies sind beispielsweise das Gewicht des Kettenwerks, die Zugkräfte, mit denen das Kettenwerk nachgespannt wird, aber auch die Windkräfte und aerodynamische Belastungen, die auf Kettenwerke und Trageinrichtungen einwirken. Die Zugkräfte entstehen durch die zickzackartige Führung des Fahrdrabtes und die Nachspannvorrichtungen. Direkt am Mast, aber auch an Traversen befestigte weitere Leitungen, bringen zusätzliche Kräfte in den Mast. (vgl. Kettenwerk) Außer diesen Kräften wirken noch zum Beispiel vorbeifahrende Züge auf die Masten ein. Um diese Kräfte zu berechnen, muss man die aerodynamischen Wirkungen des Zuges kennen. (vgl. Aerodynamik)

Die Masten bei der Deutschen Bahn lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, die sich in ihrem Material unterscheiden. Sie können aus Beton oder Stahl gefertigt werden. Bei den Hochgeschwindigkeitsstrecken werden bisher fast ausschließlich Schleuderbetonmasten und in Ausnahmefällen, z. B. auf Brücken oder für Nachspannungen Stahlmaste verwendet.



#### Schleuderbetonmast:

Aus Schleuderbeton gefertigt, mit vorgespannter Stahlbewehrung (Längs- und Spiralbewehrung) verstärkt, sind die konischen Masten durch ihre hohe Tragfähigkeit gut für Hochgeschwindigkeitsstrecken geeignet. Sie haben einen kreisförmigen Querschnitt und einen Hohlraum in der Mitte, der von oben nach unten reicht. Dieser Hohlraum entsteht durch die Herstellung mit Hilfe von Rotieren um die Längsachse, wobei höhere Betonfestigkeiten erzielt werden können, als bei normalen Betonverarbeitungsverfahren. An dem oberen Ende sind die Masten am dünnsten und werden nach unten hin immer breiter. Der Durchmesser verkleinert sich dabei von dem Fuß zur Spitze hin mindestens um 15 Millimeter je einen Meter Höhe.





#### Gittermast:

Der Gittermast wird aus vier Eckpfählern mit Winkelprofilen errichtet. Um die benötigte Tragfähigkeit zu gewährleisten, wird der Mast mit diagonalen Aussteifungen versehen, die im Zickzack von unten nach oben verlaufen.



Durch diese skelettartige Bauweise kann Material gegenüber massiven Masten gespart werden. Bei der Errichtung wird jeder Eckstiel auf eine eigene Fußplatte gestellt, in denen die Löcher für die Verankerungsbolzen sind, mit denen der Mast auf dem Fundament fixiert wird.

## Infobox

### Einflussfaktoren auf das Material

#### Beton

- | Mechanische Lasten und Pressungen
- | Wasser wäscht Kalziumhydroxid aus, dadurch bildet sich Kalziumkarbonat (zeigt sich in weißen Flecken am Material); diese Karbonatisierung verursacht Rost an der Stahlarmierung, falls sie diese erreicht
- | Betonüberdeckungen von Armierungsstahl müssen mindestens 5 cm dick sein
- | Kohlensäure in Luft und Wasser lösen eine chemische Reaktion aus, die zur Zersetzung des Materials führt
- | Wasser in kleinen Rissen im Material gefriert, dehnt sich aus und verursacht dadurch Kräfte auf das Material.
- | Die DB verwendet vorgespannte Stahlarmierungen, um zumindest die horizontale Risse zu schließen und so das Eindringen von Wasser zu verhindern.

#### Stahl

- | Korrosion am Material
- | Rostbildung am Material (Verzinken oder Rostschutzbeschichtungen als Schutz)
- | Elektrische Korrosion am Material

#### Aluminium

- | Geringere Korrosion als bei Stahl, hauptsächlich nur durch Salznebel in Straßen- oder Autobahnnähe
- | Elektrische Korrosion am Material



### Stahlmast aus H-Profil:

Diese Maste werden aus H-Profilen (Doppel-T-Träger) gefertigt und wurden im HGV ursprünglich nur auf Brücken eingesetzt. In den letzten Jahren werden sie zunehmend auch auf der freien Strecke verwendet. Unterschiedlich ist dabei die Art der Befestigung: Entweder werden sie mit Mastfüßen auf entsprechende Ankerbolzen gesetzt oder direkt im Rohr gegründet (vergossen). Das Setzen auf Ankerbolzen erlaubt dabei eine regelmäßige Kontrolle auf Rostschäden und ist somit für die Instandhaltung die bessere Lösung. Die Gründung im Rohr ist bei der Errichtung kostengünstiger.

### 2.3 Ausleger

Der Ausleger hat die Aufgabe, das Kettenwerk so zu tragen, dass der Fahrdraht stets unter allen Bedingungen, wie zum Beispiel Geländeeigenschaften, gleichmäßig verläuft, das heißt er muss sich stets auf 5,30 m Höhe befinden. Damit sich die Stromabnehmer nicht einseitig abnutzen und sich eine Rille bildet, wird der Fahrdraht im Zickzack geführt. Dafür werden die Ausleger abwechselnd mit Zug oder Druck an den Masten montiert und der Fahrdraht verläuft dann jeweils 30 cm links, beziehungsweise rechts von der Schienenmitte. Dabei muss der Ausleger alle Kräfte, die vom Kettenwerk ausgehen und die, die von seinem Eigengewicht verursacht werden, an den restlichen Aufbau weiterleiten. Dabei können auch noch zusätzliche Kräfte auftreten, die beispielsweise durch Vereisung verursacht werden. Die aerodynamischen Kräfte können jedoch meist vernachlässigt werden, da die Rohrdurchmesser klein sind.



Fotos: DB AG/Günter Jazbec, Claus Weber, Sebastian Roedig, Wikipedia

## 2.4 Spezialfall Tunnel

Besondere Anforderungen an das Tragwerk stellt die Tunneldurchführung. Für diese Einsatzgebiete verwendet die DB die Oberleitungsbauart Re 250 und Re 330.



Durch diese Technik werden Tunneldurchfahrten mit einer Reisegeschwindigkeit von 250 bzw. 330 km/h ermöglicht. Jedoch steht in Tunneln nur begrenzter Platz zur Verfügung, was zu einigen Problemen führt. Zuerst muss das Schienenfahrzeug über das Kettenwerk zuverlässig mit Strom versorgt werden. Zudem müssen elektrische Sicherheitsabstände zwischen allen auf Spannung liegenden Bauteilen der Oberleitung und der Tunnelwand eingehalten werden. Darum werden im Tunnel die Ausleger direkt an der Tunnelwand oder an Hängesäulen, die an der Decke verankert sind, befestigt. Dadurch können trotz des begrenzten Platzes die oben genannten Anforderungen an die Oberleitung erfüllt werden.

Zur Befestigung der Tragevorrichtungen für das Kettenwerk an der Tunnelwand bzw. Tunneldecke existieren im Wesentlichen zwei verschiedene Möglichkeiten:

### Schwerlastdübel

Die bei der Bahn verwendeten Dübel unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise nicht von herkömmlichen Haushaltsdübeln. Jedoch bestehen Dübel im Schienenverkehr aus Metall und werden „Schwerlastdübel“ genannt. Wie bei Dübeln einer jeden Hobbywerkstatt basiert die Stabilität auf einem Auseinanderspreizen des Dübels, wodurch er fest in der Wand bzw. Decke befestigt wird. Die Dübel der Bahn sind lediglich be-

lastbarer. Für die Oberleitung anzubringende Teile werden direkt mit Ankerbolzen und den Dübeln an der Tunneldecke/-wand verschraubt.



### Tübbings

Tübbings sind je nach Einsatztunnel runde oder eckige Betonelemente, die senkrecht zur Schiene von einer Tunnelwand über die Decke bis zur anderen Tunnelwand montiert werden. An diesen Tübbings werden alle restlichen Teile (also Ausleger und Kettenwerk) mithilfe von Ankerschienen angebracht.

Im Einzelfall kann immer entschieden werden, ob der Dübel oder die Ankerschiene verbaut wird. Dies kommt stets auf den Tunnel selbst an. Grundsätzlich werden Tübbings so gefertigt, dass ein kompletter Ring nicht gleichmäßig breit ist, sondern so ausgelegt wird, dass zwei komplette Ringe im geraden Tunnel dann wieder gleichmäßig breit sind oder im gekrümmten Tunnel durch verdrehten Einbau der Ringe zueinander der Tunnelkrümmung folgen. In diese Schalung werden die Ankerschienen eingebracht. Mithilfe von Hakenkopfschrauben werden weitere Anbauteile an der Schiene befestigt.

Die Entscheidung für Dübel hingegen erfolgt häufig, wenn auf Tübbings verzichtet wird, da bei einem Betonieren vor Ort das Einbringen der Ankerschienen in den Tübbing mit der notwendigen Präzision schwierig ist. Die Oberleitungsteile werden bei dieser Variante mit Ankerbolzen im Dübel befestigt. Zudem werden Dübel oft auch in mit Tübbings ausgestatteten Tunneln verwendet, wenn im Nachhinein zusätzliche Befestigungen benötigt werden. Beim Einsatz von Dübeln muss generell darauf geachtet werden, dass die Tunnelbewehrung nicht angebohrt wird. Deshalb werden bei der Nutzung von Dübeln sogenannte Dübelzonen geplant, um ein Anbohren des Stahls zu vermeiden. So bleibt die Statik des Tunnels gewährleistet.



### 2.5 Spezialfall Brücken

Einen weiteren Spezialfall für die Oberleitung stellt neben dem gerade beschriebenen Tunnelproblem die Führung an sehr schmalen Stellen dar. Dies tritt vor allem auf Brücken auf. Auch hier müssen die bei der DB sonst üblichen Abstände zwischen Gleisen und Masten eingehalten werden. Diese werden durch das Fahrzeugumgrenzungsprofil bestimmt. So wird sichergestellt, dass jedes Schienenfahrzeug genügend Platz hat, die Strecke zu befahren und ausreichenden Abstand zum Masten einzuhalten. Die Fahrbahnkonstruktion auf Brücken gliedert sich in zwei Bestandteile: Das Gleis mit zugehörigem Gleisbett und die Randbalken. Das Gleis wird wie auf normaler Strecke (Kapitel Oberbau) angelegt. Der Unterschied für die Brückenfahrt zeigt sich in den Randbalken, die links und rechts parallel zur Gleisführung gebaut werden.

Diese dienen den Masten als Fundament, auf denen sie verschraubt werden, da durch die ungeschützte Lage hohe Windlasten auftreten können. So wird gewährleistet, dass auch Masten auf Brücken genau wie die übrigen nicht umknicken, umfallen oder beschädigt werden. Die Stabilität und Sicherheit der Oberleitung wird von der Aufsichtsbehörde mit Nachdruck verfolgt, um das hohe Sicherheitsniveau des Eisenbahnbetriebs aufrechtzuerhalten. Der restliche Bau der Oberleitung auf einer Brücke weist keine weiteren Besonderheiten auf.

## 3. Kettenwerk

### 3.1 Aufbau und Anforderungen

Die Hauptbestandteile des Kettenwerks bilden Tragseil, Hänger, Fahrdraht, Y-Beiseil und Verstärkungsleitungen.



Der Fahrdraht ist mittels der Hänger am Tragseil befestigt. Durch die zusätzliche Verwendung von Tragseil und Hänger soll die Höhe des Fahrdrahts konstant auf 5,30 m gehalten werden. Die Hauptaufgabe des Kettenwerks ist die Übertragung des Stroms zum Zug. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken ergeben sich besondere Anforderungen, da eine zuverlässige Stromübertragung auch bei hohen Geschwindigkeiten gewährleistet sein muss. Beim Beschleunigen des ICE fließen hohe Ströme. Deshalb muss das Kettenwerk eine hohe Stromtragfähigkeit haben. Dies wird durch die Verwendung von Verstärkungsleitungen erreicht.

Ein weiteres Problem besteht in der Wellenausbreitung im Fahrdraht. Die Wellen bzw. Schwingungen entstehen durch den Anhub des Fahrdrahts durch den Stromabnehmer. Diese breiten sich im Kettenwerk aus.

Um eine unterbrechungsfreie Stromversorgung des Zuges ohne Lichtbögen zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit deutlich höher als die Fahrtgeschwindigkeit des Zuges ist. Ferner sollte die Elastizität des Fahrdrachts an allen Stellen möglichst konstant sein, da sonst der Anhub nicht gleichmäßig vonstattengeht. Dadurch würde das Problem der Wellenausbreitung begünstigt werden. Problemstellen stellen dabei die Stützpunkte dar. An diesen ist die Elastizität geringer als an anderen Stellen des Fahrdrachts. Um dieses Problem zu verringern, wird bei Hochgeschwindigkeitsstrecken in Deutschland ein sogenanntes Y-Beiseil gespannt.



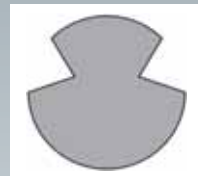
Durch das Y-Beiseil wird die geringere Elastizität an den Aufhängepunkten abgemildert. Dadurch geht der Anhub des Fahrdrachts gleichmäßiger vonstatten. Dies führt zu einer verringerten Wellenanregung. Neben der Tatsache, dass die Elastizität an allen Punkten möglichst gleichmäßig sein muss, spielt auch der Betrag der Elastizität eine entscheidende Rolle. Generell gilt, dass die Elastizität von der Geschwindigkeit des Zugs abhängig ist. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken sollte die Elastizität geringer sein als bei normalen Bahnstrecken. Dadurch wird die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit erhöht. Die Elastizität kann durch die Gewichte an den Nachspannvorrichtungen (siehe INFOBOX: Nachspannvorrichtungen) variiert werden. Durch die Verwendung von größeren Gewichten kann der Betrag der Elastizität verringert werden.

### 3.2 Eigenschaften und Betrieb

Durch das ständige Schleifen des Schleifstücks am Fahrdraht wird dieser im Laufe der Zeit abgenutzt. Dabei verringert sich die Querschnittsfläche des Fahrdrachts. Die Abnutzung des Fahrdrachts verringert dessen Zugfestigkeit (siehe INFOBOX: Zugfestigkeit). Ferner wirkt sich die geringere Stromtragfähigkeit des abgenutzten Fahrdrachts aus. Durch die reduzierte Stromtragfähigkeit werden abgenutzte Fahrdrähte deutlich wärmer. Dies führt zu einer weiteren Reduzierung der Zugfestigkeit. Deshalb darf der Fahrdraht nur um 20 Prozent abgenutzt werden.



## Infobox



### Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit bezeichnet die Stärke der Kraft, die ein Material aushält, bis es reißt. Wegen der höheren Zugfestigkeit verwendet die DB im Hochgeschwindigkeitsverkehr bis 330 km/h Fahrdrähte aus CuMg. Dabei beträgt der Gewichtsanteil des Magnesiums 0,5%. Ferner wird durch die Verwendung von Fahrdrähten mit größerem Durchmesser deren Zugfestigkeit vergrößert.

### Y-Beiseil

Das Y-Beiseil ist ein zusätzliches Seil, das die Verbindung überbrückt. Das Y-Beiseil hat eine Federwirkung. Dadurch wird die geringere Elastizität des Stützpunkts abgemildert.

Fotos: DB AG/Uwe Miethe, DB Systemtechnik, Wikipedia



## Infobox

### Montage des Fahrdrahts

Bei der Montage von CuMg-Fahrdrähten ergeben sie zusätzliche Anforderungen im Vergleich zu klassischen Fahrdrähten aus reinem Kupfer. Das Problem besteht in der höheren Härte der CuMg-Legierung. Da der Fahrdraht auf Rollen angeliefert wird, hat er nach dem Abrollen sogenannte Welligkeiten. Fahrdrähte aus reinem Kupfer längen sich aufgrund der Nachspannkräfte an den Nachspannvorrichtungen (siehe INFOBOX: Nachspannvorrichtungen). Der harte CuMg-Draht längt sich trotz der deutlich höheren Nachspannkräfte nicht. Dadurch bleiben alle Welligkeiten, die durch die Montage in den Draht eingebracht wurden erhalten. Diese verschlechtern den Kontakt zwischen Fahrdraht und Stromabnehmer und es kann zur Bildung von Lichtbögen kommen. (siehe Kapitel Kettenwerk).

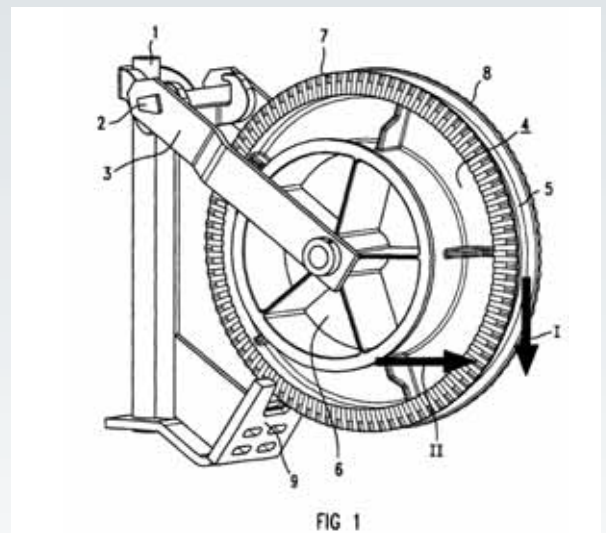
Bei der Deutschen Bahn gibt es einen Toleranzbereich für Knicke. Der Höhenunterschied des Fahrdrahts, auf 1 m gemessen, darf nicht mehr als 0,15 mm betragen. Um zu verhindern, dass überhaupt Knicke entstehen, muss der Draht möglichst gleichmäßig abgerollt werden.

### Nachspannvorrichtungen

Die Länge des Kettenwerks verändert sich mit den thermischen Bedingungen. So verringert sich die Länge des Kettenwerks bei niedrigen Temperaturen, während sie sich bei hohen Temperaturen vergrößert. Ohne Gegenmaßnahmen ändern sich dadurch der Durchhang und die Elastizität des Fahrdrahtes (und damit die Fahrdradhöhe). Die Hauptaufgabe von Nachspannvorrichtungen besteht demnach in dem Ausgleich der temperaturabhängigen Längenänderung im Fahrdraht, wobei die Zugkraft möglichst konstant gehalten werden soll.

Dadurch wird auch die Fahrdradhöhe konstant auf 5,30 m gehalten. Es gibt verschiedene Arten von Nachspannvorrichtungen. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken werden in Deutschland Radspanner eingesetzt. Dabei wird für Fahrdraht bzw. Tragseil jeweils ein Radspanner benötigt. Der Radspanner besteht aus einem Spannrads, an dessen Seiten sich zwei Trommeln befinden. An beiden Trommeln ist das Tragseil bzw. der Fahrdraht des Kettenwerks mittels zweier Stahlseile angeschlossen. Am mittleren, dreimal größeren Rad hängen die Nachspanngewichte an einem Seil.

Ferner verfügt der Radspanner über eine Einrastvorrichtung. Dabei rastet eine V-förmige Platte in die wellige Oberfläche des größeren Rads ein. Dadurch wird das unkontrollierte Drehen des Rads bei Riss des Tragseils bzw. Fahrdrahts abgebremst. Dies verhindert, dass die Gewichte auf den Boden fallen. Ferner kann durch die Erhöhung der Anzahl an Gewichten die Elastizität des Kettenwerks variiert werden. Je größer das Gesamtgewicht, desto geringer ist die Elastizität (bei konstanten Temperaturverhältnissen).



## 4. Stromabnehmer

### 4.1 Aufbau

Der Stromabnehmer besteht aus Schleifstück, Oberarm, Unterarm, Kupplungsstange und Wippe.



Das Schleifstück läuft entlang des Fahrdrabts. Dadurch entsteht ein leitender Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schleifstück und es wird Strom vom Kettenwerk auf den Stromabnehmer übertragen. Der Stromabnehmer stellt folglich ein wichtiges Bindeglied zwischen der Oberleitung und dem Zug als Endverbraucher dar. Als Schleifstücke sind in der EU reine Hartkohle, sowie metallimprägnierte Hartkohle mit Kupfer oder Kupferlegierungsanteilen zulässig.

Bei Wechselstrom, der bei Hochgeschwindigkeitszügen eingesetzt wird, darf der Gewichtsanteil des Metalls nicht mehr als 35% betragen. Getragen wird das Schleifstück von Ober- und Unterarm sowie der Kupplungsstange. Die Kontaktkraft des Stromabnehmers kann mittels Druckluft variiert werden. Generell beträgt der Arbeitsbereich des Stromabnehmers bei maximaler Fahrgeschwindigkeit mindestens zwei Meter. Dies ist für den maximal auftretenden Höhenunterschied (4,95 bis 6,50 m) bei allen Oberleitungen und allen Randbedingungen (z. B. Eis) ausreichend.

### 4.2 Anforderungen

Eine kontinuierliche Stromversorgung muss auch bei hohen Geschwindigkeiten gegeben sein. Generell kann durch die Druckluft die statische Anpresskraft zwischen Fahrdrabt und Schleifstück eingestellt werden. Bei hohen Geschwindigkeiten muss wegen der zunehmenden Dynamik im Kettenwerk (Wellenausbreitung) die Kontaktkraft erhöht werden. Die Erhöhung folgt einer Kurve, die sich aus dem Quadrat der Geschwindigkeit berechnet.

Die Kontaktkraft muss einerseits klein genug sein, um den Anhub und damit die Wellenanregung (siehe Kap. Kettenwerk) nicht unnötig zu begünstigen. Allerdings darf die Kontaktkraft andererseits nicht zu gering sein, da sonst der Kontakt zwischen Stromabnehmer und Fahrdrabt nicht ausreichend gewährleistet ist. Ein Indiz für eine nicht ausreichende Kontaktkraft ist die Entstehung von sogenannten Lichtbögen. Es handelt sich dabei um die Funken, die bei sog. Kontaktkraftverlust (d.h.  $F = 0\text{N}$ ) vom Fahrdrabt auf den Stromabnehmer überspringen.



# Leit- und Sicherungstechnik

Wir beginnen mit einem kurzen Ausflug in die Automobilindustrie. Der Trend in dieser geht immer weiter in Richtung der Assistenzsysteme. Es werben viele Hersteller für Systeme wie Spurhalteassistenten, Abstandskontrolle, automatisches Bremsen und viele weitere. Aber wie sieht es hier bei der Deutschen Bahn aus?

Ein Schienenfahrzeug hat im Gegensatz zum Automobil keine Möglichkeit auszuweichen, da es durch Gleise in der Spur gehalten wird. Außerdem wird der enorm längere Bremsweg durch die deutlich geringere Haftreibung von Rad und Schiene verglichen mit Reifen und Straße verursacht. Daher erkennt man, dass für die Sicherung der Zugfahrt andere Systeme als beim Auto verwendet werden müssen. Neben dem Ausgleich der technischen Nachteile eines Schienenfahrzeuges, dienen die Sicherungssysteme auch dazu, menschliches Versagen auszuschließen, was besonders zur Beherrschung des Fahrzeugs bei Hochgeschwindigkeit erforderlich ist.

Die vom Auto bekannte Abstandskontrolle wird bei der Deutschen Bahn schon seit einigen Jahrzehnten in anderer Form eingesetzt, da man durch die hohe Geschwindigkeit und die zugspezifischen Eigenschaften nicht „auf Sicht“ fahren kann.

Die Strecke wird hierzu in Abschnitte unterteilt, in welchen sich immer nur ein Zug aufhalten darf. Dieses Vorgehen nennt man Fahren in festem Raumabstand. Um trotzdem höchste Sicherheit zu gewährleisten, verwendet man Gleisschaltmittel und Gleisfreimeldetechnik. Diese werden im Folgenden genauer erläutert.

## 1. Gleisschaltmittel und Gleisfreimeldetechnik

Mit Hilfe der Gleisfreimeldetechnik ist es möglich zu erkennen, ob ein Gleisabschnitt frei oder besetzt ist. Hierbei haben sich zwei verschiedene Systeme entwickelt. Das erste System arbeitet mit Gleisstromkreisen, welche jeweils aus einer isolierten Schiene und einem Sender-/ Empfängerstromkreis bestehen. Mit diesen kann man direkt das Befahren des Zuges ermitteln. Abb.1 zeigt einen solchen Gleisabschnitt, welcher mit Gleisstromkreisen arbeitet. Wie bereits genannt, besteht dieser aus einer isolierten Schiene, die aus einem Schienenkontakt und einem Gleisstromkreis aufgebaut ist. An dieser besonderen Schiene wird eine Spannung zwischen 1,0 Volt und 3,0 Volt angelegt und man arbeitet nach dem Ruhestromprinzip. Solange nun der Strom fließt zeigt die Gleisfreimeldeanlage „frei“ an. Wird dieser jedoch unterbrochen oder kurzgeschlossen, zeigt die Gleisfreimeldeanlage „besetzt“ an. (Siehe Abb.2)

Die Deutsche Bahn verwendet hierfür verschiedene Gleisstromkreistechniken. Eine dieser Techniken arbeitet mit niederfrequenten Gleisstromkreisen von 42 Hz, 50 Hz und 100 Hz, die andere mit tonfrequenten Gleisstromkreisen im Frequenzbereich von 4,75 kHz bis 6,25 kHz sowie 9,5 kHz bis 16,5 kHz. Bei der Gleisfreimeldung gibt es auch noch die Möglichkeit Gleisschaltmittel wie Radsensoren und Achszähler einzusetzen, wodurch indirekt das Ein- und Austreten von Objekten erkannt wird.



Dieses erfasst einen Zug an singulären Punkten am Gleis. Hierfür werden durch zwei Radsensoren, die an den Schienen angebracht sind, in geringem Abstand die Achsen des Zuges ermittelt.

Die angebrachten Sensoren erfassen die Änderung des magnetischen Feldanteils zwischen Sende- und Empfangsspulen beim Überfahren dieser durch einen Zug. Wenn beide Messgeräte denselben Wert aufweisen, wird der Streckenabschnitt als „frei“ gemeldet, ist die Anzahl der ein- und ausgezählten Achsen ungleich, wird der Abschnitt als „besetzt“ registriert.

Abb.1: Gleisstromkreis ohne Fahrzeug (Freimeldung):

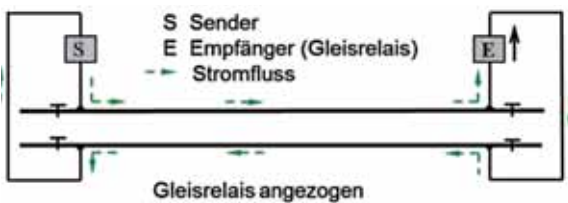
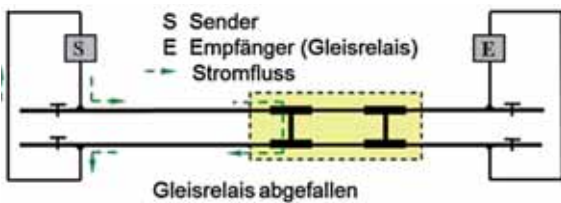


Abb.2: Gleisstromkreis mit Fahrzeug (Besetzmeldung):



## 2. Zugsicherung/Zugbeeinflussung

Zurück zum Automobil: Eine der neuesten Errungenschaften für dieses ist die automatische Bremsung. Fährt ein Fahrer einem weiteren Fahrzeug zu nahe auf bzw. kommt in einen kritisch nahen Bereich ohne zu reagieren, wird dies durch das System erkannt, welches rechtzeitig durch eine Bremsung eingreift, um Gefährdungen und Unfälle zu vermeiden. Auch bei der Deutschen Bahn werden bereits seit längerer Zeit ähnliche Systeme zur sogenannten Zugbeeinflussung oder Zugsicherung verwendet. Ein Unterschied zum Straßenverkehr ist, dass der Lokführer weniger auf Sichtkontakt fährt, sondern sich eher auf Signale verlassen muss.

Hierbei stehen solche Signale entweder am Gleis oder werden direkt zum Führerstand übermittelt. Die Übermittlung von Signalen direkt an den Zugführer ist besonders bei Hochgeschwindigkeitszügen wichtig, da es bei Geschwindigkeiten über 300 km/h sehr schwierig

ist, diese beim Vorbeifahren zu erkennen. Was passiert jedoch, wenn der Lokführer trotzdem ein Signal nicht erkennt oder nicht nach diesem handelt? Unter solchen Umständen muss durch folgende Systeme eingegriffen werden, um erhebliche Gefährdungen und gegebenenfalls schwere Unfälle zu verhindern. Bei dem System der Zugbeeinflussung wird zwischen der sogenannten punktförmigen und linienförmigen Zugbeeinflussung unterschieden. Doch wie funktionieren beide und welche Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten haben sie? Dies wird im Folgenden erläutert.

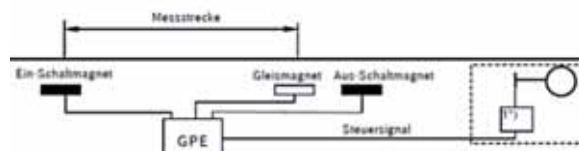
### Zunächst das grundlegende Wirkungsprinzip der punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB):



PZB-Fahrzeugmagnet beim ICE 3

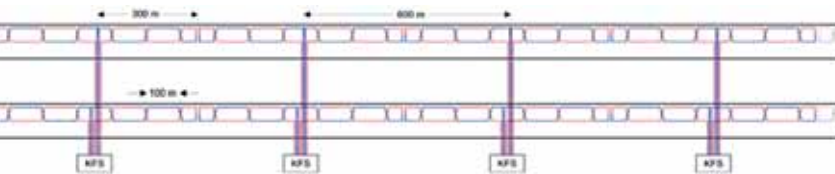
Zu den Bestandteilen gehören ein PZB-Fahrzeugmagnet, der am Zug befestigt ist, und ein Gleismagnet, der an einer bestimmten Stelle der Strecke montiert ist. Überfährt ein Zug mit dem PZB Fahrzeugmagneten einen Gleismagneten, wird dessen Zustand (aktiv/inaktiv) vom Zug erkannt. Abhängig von diesem Zustand reagiert das Fahrzeug beispielsweise mit einer Zwangsbremsung.

Dieser Fall tritt ein, wenn an einem haltanzeigenden Signal vorbeigefahren wird. Darüber hinaus kann durch die punktförmige Zugbeeinflussung die zulässige Geschwindigkeit im Bereich von möglichen Gefahrenpunkten über definierte Geschwindigkeitsprüfabschnitte überwacht werden. Hier aktiviert der PZB Fahrzeugmagnet den am Gleis installierten Schaltmagneten bei der Überfahrt (Ein-/Ausschaltmagnete). Der Gleismagnet ist zum Beispiel aktiv bei der Überfahrt bei Halt zeigendem Signal oder bei zu hoher Geschwindigkeit. Dies soll in der untenstehenden Skizze nochmals veranschaulicht werden.





Nun zum Wirkungsprinzip der linienförmigen Zugbeeinflussung: Im Unterschied zur punktförmigen wird hier nicht mit Magneten gearbeitet, die an bestimmten Stellen befestigt sind, sondern die Übermittlung von Informationen zwischen Infrastruktur und Fahrzeug findet über den sogenannten Linienleiter statt. Diese Linienleiter sind in der Gleismitte und im Schienenfuß verlegt und kreuzen sich in definierten Abständen von 100 m.



Dadurch können Informationen wie die Position und die Geschwindigkeit des Zugs an eine Streckenzentrale gemeldet werden. Die Streckenzentrale kann darauf wiederum Vorgaben bezüglich der Geschwindigkeit und einer eventuell nötigen Bremsung an den Zug zurückschicken. Die Übertragung der Telegramme von Streckenzentrale in Richtung Fahrzeug erfolgt mittels frequenzmodulierter Signale mit einer Übertragungsfrequenz von 36 kHz (Frequenzhub  $\pm 0,4$  kHz, Übertragungsrate 1200 Baud), wohingegen die Übertragung von Fahrzeug in Richtung Streckenzentrale mit einer Übertragungsfrequenz von 56 kHz (Frequenzhub  $\pm 0,2$  kHz, Übertragungsrate 1200 Baud) erfolgt.

Die Aufgabe des Lokführers ist dabei lediglich die Überwachung des Zuges und er muss nur im Notfall eingreifen, wie man es beispielsweise von diversen Autopilotsystemen bei Flugzeugen kennt.

Linienförmige Zugbeeinflussung wird vor allem bei Fahrten über 160 km/h zur Sicherung verwendet, da man im Vergleich für ortsfeste Signale bei hohen Geschwindigkeiten nur eine eingeschränkte Wahrnehmung hat. Somit ist diese Art von Zugsicherung sehr wichtig für Hochgeschwindigkeitszüge. Ein weiterer Vorteil ist das Ermöglichen einer Bremsung abhängig und angepasst an Fahrgeschwindigkeit und Bremsvermögen des Fahrzeugs sowie an die Eigenschaften der Strecke (z.B. Neigung). Folglich wird somit auch eine dichtere Zugfolge ermöglicht.

### 3. ETCS

Die in Europa eingesetzten Leit- und Sicherungssysteme werden in Zukunft durch das einheitliche, interoperable European Train Control System (ETCS) abgelöst. Dieses wird in unterschiedlichen Levels realisiert, um den Ansprüchen verschiedener Strecken gerecht zu werden. Das ETCS überwacht und beeinflusst hierbei die Höchstgeschwindigkeit, die Fahrtrichtung, die Eignung des Schienenfahrzeugs für die Strecke, die Einhaltung besonderer Betriebsvorschriften und die Zugfolge. Außerdem wird es abwärtskompatibel gehandhabt, damit es weiterentwickelten Zügen möglich ist, auch auf älteren Strecken zu fahren. Im Folgenden sollen die verschiedenen Levels genauer beschrieben werden.

#### 3.1 ETCS Level 0

Bei dieser Stufe wird der Zug nur auf seine Höchstgeschwindigkeit überwacht. Der Lokführer muss während der Fahrt die üblichen Signale an der Strecke beachten.

#### 3.2 ETCS Level 1

In diesem ersten vom nationalen Standard unabhängigen ETCS-Level findet die Kommunikation – vergleichbar mit PZB – punktförmig durch an der Strecke angebrachte Eurobalisen statt. Diese Übertragungsform kann durch sogenannte Euroloops, bis zu 1000 m lange Leckkabel, deren Anfang und Ende eine Eurobalise markiert, zu einer linienförmigen erweitert werden.



Eurobalise

Die wichtigsten übermittelten Informationen sind hierbei Streckengradienten (Neigung der Strecke), Höchstgeschwindigkeit und der nächste Haltepunkt des Zuges. Außerdem wird eine sogenannte „Movement Authority“ (kurz: MA, zu Deutsch: „Berechtigung zur Bewegung“) gesendet. Aus diesen Daten kann die fahrzeugseitige ETCS-Ausrüstung kontinuierlich die Einhaltung aller Richtlinien überwachen und durch Eingreifen gewährleisten.

Falls für einen Zug die MA endet („End of Authority“ EoA), braucht dieser zum Weiterfahren erneut diese Berechtigung, da die nächste Balisengruppe erst mit einer gültigen Berechtigung überfahren werden darf. Hierfür sind entweder die oben genannten Euroloop-Systeme oder Radio-Infill über GSM-R (Funkübertragung) vorgesehen. Jedoch werden meist Lichtsignale, kombiniert mit einer Kennungstafel, neben der Strecke benutzt, da die Anbringung von Euroloops aufwändig ist und mit GSM-R Unterstützung schon der im Folgenden beschriebene ETCS Level 2 realisiert werden kann.

### 3.3 ETCS Level 2

Im Gegensatz zum vorangegangenen Level besteht hier eine ständige Möglichkeit zur Kommunikation zwischen Fahrzeug und Streckenzentrale, dem Radio Block Centre (RBC), mittels Euroradio, welches auf dem Funkstandard GSM-R aufbaut, was sowohl Streckenauslastung als auch die Sicherheit erhöht. Bevor der Zug hier eine MA erhält, muss die Streckenzentrale über die aktuelle Zugposition Bescheid wissen.



Führerstand mit ETCS

Die Aufgabe der Positionsbestimmung hat hier der Fahrzeugrechner, welcher die ermittelten Daten regelmäßig an die Zentrale sendet. Zur sicheren Bestimmung werden jedoch Referenzpunkte an der Strecke benötigt, welche die vorhin erwähnten Eurobalisen darstellen. Diese befinden sich beispielsweise in Ausfahrgleisen von Bahnhöfen sowie in unregelmäßigen Abständen auf freier Strecke. Obwohl bei diesem Level ständiger Kontakt zwischen Zug und Zentrale herrscht, wird die Strecke immer noch – wie bei konventioneller Sicherungstechnik – in freie und belegte Abschnitte unterteilt, da die Gleisfreimeldung immer noch ortsfest mit Gleisstromkreisen oder Achszählern umgesetzt wird.

### 3.4 ETCS Level 3

Bei dieser höchsten Realisierungsstufe wird auf eine Einteilung der Strecke in Abschnitte verzichtet und somit wird im Gegensatz zu den Levels 0 bis 2 keine klassische Gleisfreimeldung benötigt. Da aber das ETCS keine abgetrennten und unerkannt auf der Strecke verbleibenden Zugteile erkennt, muss ein System zur Zugvollständigkeitskontrolle eingeführt werden. Der große Vorteil dieser letzten Stufe ist die fließende Kontrolle der Zugabstände, welche eine deutlich höhere Auslastung viel befahrener Strecken ermöglicht.

#### Vorteile

Der größte Vorteil der Einführung dieses Systems ist offensichtlich die Interoperabilität. Deshalb müssen Züge in Zukunft nur noch mit diesem einen Standard ausgerüstet werden, wobei man Kosten sparen und den intereuropäischen Schienenverkehr stärken kann, weil technische Barrieren zwischen Ländern wegfallen. Da aber die Grundvoraussetzung hierfür ein durchgängiges ETCS-Streckennetz in Europa ist, liegt die Umsetzung noch in der Zukunft.

## 4. GSM-R

Beim Zufahren hat man im Gegensatz zum Autofahren keinen direkten Sichtkontakt zu den anderen Verkehrsteilnehmern. Deshalb benötigt man für die vorausgegangenen Systeme eine zusätzliche Kommunikationsebene, welche das Funksystem GSM-R darstellt. GSM-R (Global System for Mobilcommunication – Rail) ist ein auf dem weltweit dominierenden Funkstandard GSM aufbauendes Mobilfunksystem, das speziell für die Verwendung bei Eisenbahnen verändert wurde.

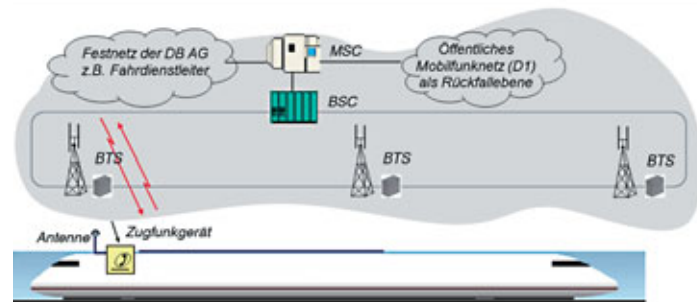
Der Grund der Entwicklung ist die EG-Richtlinie 96/48 vom 23. Juli 1996, die für den transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsverkehr ab Mai 1999 eine Standardisierung verlangt. 1997 einigten sich deshalb 32 europäische Bahnverwaltungen auf den oben genannten Funkstandard. Außerdem waren die bis dahin verwendeten analogen Funksysteme veraltet und unwirtschaftlich, was sich schon alleine daran zeigt, dass die Deutsche Bahn seit den sechziger Jahren acht verschiedene solcher Systeme gleichzeitig betrieb, welche sich durch GSM-R auf nur dieses reduzierten.



GSM-R-Sendemast

Das GSM-R System, das man nur mit speziellen Geräten nutzen kann, wird seit 1992 vom Internationalen Eisenbahnverband verwaltet und dient neben der Sprachkommunikation auch zum Transport der oben beschriebenen ETCS-Daten. Bei der Sprachkommunikation gibt es zwei verschiedene Modi: Das Funkgerät im Zug sendet die Daten zu einer Base Transceiver Station (Sende-/Empfangsstation an der Strecke), welche die Daten zu einem Base Station Controller weiterleitet.

Im zurzeit nicht genutzten Direct-Modus können sich Sender und Empfänger ohne weitere Infrastruktur verständigen. Der GSM-Modus funktioniert ähnlich wie die normale Telekommunikation über ein Mobilfunknetz, das aber nur von der Deutschen Bahn genutzt wird.



Dieser schickt die erhaltenen Daten zum Mobil Switching Center (Vermittlungsstation zum Festnetz der DB AG oder bei Überlastung zu den öffentlichen Netzen). Das Verbinden mit dem Empfänger verläuft genau andersherum, indem das MSC an den zurzeit dem Empfänger zugeordneten BSC die Daten weiterleitet.

Jetzt zu den wesentlichen Unterschieden zum Mobilfunknetz, den sogenannten R-Merkmalen:

- Durch die Notruffunktion oder Priorisierung von Anrufen entsteht die Möglichkeit unwichtigere Verbindungen gegebenenfalls zu verdrängen und einen Notruf durchzuführen.
- Ein Gruppenruf ermöglicht einer Gruppe von Teilnehmern in einem vordefinierten Gebiet miteinander zu kommunizieren. Der Gruppenruf erreicht alle im definierten Bereich befindlichen berechtigten Teilnehmer.
- Die ortsabhängige Adressierung erfolgt abhängig von der momentanen Position des Senders. Somit können zum Beispiel Anrufe aus dem Zug zum zuständigen Fahrdienstleiter durchgeführt werden.
- Das letzte wichtige Merkmal, die funktionale Adressierung, erlaubt einem Anwender oder einer Anwendung unter einer Nummer erreicht zu werden, die die relevante Funktion (z.B. Lokführer) und nicht das Funkgerät identifiziert.

Eine besondere Eigenschaft des GSM-R Netzes ist eine hohe Netzverfügbarkeit, die für die bahnspezifische Funkversorgung entlang der Gleise mehr als 95% und in Gebieten, in denen ETCS verwendet wird, mehr als 98% beträgt. Diese außerordentlich hohe Abdeckung in ECTS Bereichen ist damit begründet, dass das Funksystem dort als Übertragungsmedium zur Zugsteuerung und Zugsicherung dient.



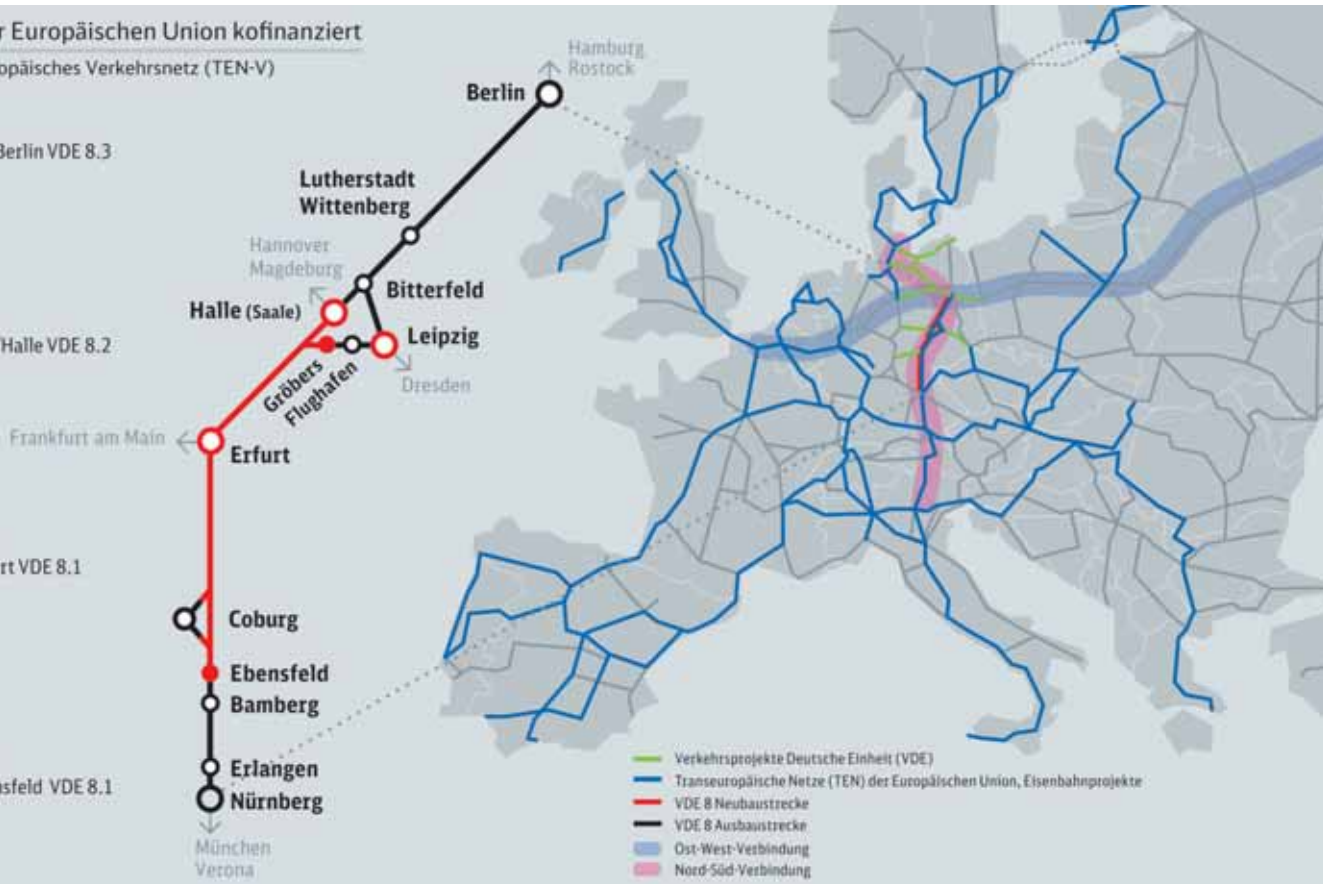
Von der Europäischen Union kofinanziert  
Transeuropäisches Verkehrsnetz (TEN-V)

Ausbaustrecke  
Leipzig/Halle – Berlin VDE 8.3

Neubaustrecke  
Erfurt – Leipzig/Halle VDE 8.2

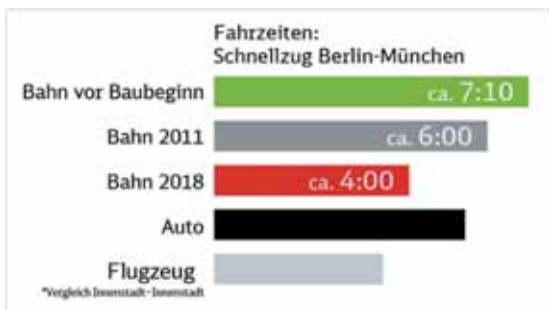
Neubaustrecke  
Ebensfeld – Erfurt VDE 8.1

Ausbaustrecke  
Nürnberg – Ebensfeld VDE 8.1



## 5. Ausblick

Zuletzt noch ein kleiner Ausblick in die Zukunft. Zu einem der größten Projekte der Deutschen Bahn gehört zurzeit das sogenannte „Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nummer 8“. Das Ziel der größten Baustelle Deutschlands bis 2017 lautet: „mit bis zu 300 km/h in vier Stunden von Berlin nach München“. Das aus der zweigleisigen Aus- und Neubaustrecke Nürnberg – Erfurt – Leipzig/Halle – Berlin bestehende Zehn-Milliarden-Projekt wurde 1991 von der Bundesregierung beschlossen, um die Verkehrsanbindung zwischen Ost und West und zwischen Nord und Süd zu verbessern.



Es ist gleichzeitig ein Lückenschluss im deutschen Schnellbahnnetz. Darüber hinaus werden auf der Trasse auch Güterzüge fahren. Die Strecke eröffnet viele Möglichkeiten, hochmoderne Verkehrskonzepte umzusetzen – der Beginn einer neuen Ära des Bahnreisens. Um vor allem Menschen nicht nur in dieser Rekordzeit, sondern auch sicher über eine entsprechend große Entfernung zu befördern, setzt die Deutsche Bahn hier natürlich

auf neueste, zukunftsweisende Techniken bezüglich Leit- und Sicherungssysteme für die neue Hochgeschwindigkeitsstrecke.

### „Streckensignale ade“ und „Willkommen High-Tech-Steuerung der Zukunft“

Verwendet werden modernste Standards im technischen Bereich. An der Neubaustrecke wird es keine Signale mehr geben, sondern nur das European Train Control System (ETCS), und das Funksystem GSM-R. Gesteuert wird die Aus- und Neubaustrecke komplett über Elektronische Stellwerke (ESTW). Insgesamt 17 sogenannte ESTW-Unterzentralen (zwölf an der Strecke, fünf in den Knoten Erfurt, Leipzig und Halle) sind direkt mit den Betriebszentralen in Leipzig und München verbunden, von wo die Fahrdienstleiter per Computer die Fahrstrecken festlegen.

Noch weiter in die Zukunft lässt sich derzeit nicht blicken, aber es werden mit Sicherheit weitere ähnlich große Projekte folgen und wichtige Systeme wie Leit- und Sicherungstechniken ständig verbessert, um das Reisen mit der Deutschen Bahn noch besser, noch komfortabler und noch sicherer zu gestalten.

## Akustik

Im folgenden Kapitel Akustik geht es um die verschiedenen Bereiche der Akustik, die beim Bau eines Hochgeschwindigkeitszuges und seiner Fahrbahn beachtet werden müssen.

In den einzelnen Punkten dieses Teils der Informationsbroschüre werden zunächst die Verursacher und die Probleme der Störgeräusche aufgeführt und schließlich die von der Bahn ergriffenen Lösungen Schulphysikalisch erklärt. In diesem Kapitel werden Sie erfahren, aus welchem Grund und auf welche Weise bestimmte Vorkehrungen der Deutschen Bahn getroffen werden – egal ob innerhalb oder außerhalb des Zuges.

### 1. Innenakustik

Um den reisenden Passagieren eine möglichst angenehme Fahrt zu ermöglichen, gibt es verschiedene Maßnahmen im Bereich der Innenakustik. Dabei muss man immer darauf achten, dass im Zug ein bestimmter Lautstärkepegel nicht überschritten wird. So muss man zum einen die verschiedenen Geräusche von außen in Betracht ziehen, zum anderen aber gibt es viele Geräusche, die innerhalb des Zuges entstehen.

Betrachten wir zunächst die akustischen Probleme und ihre Lösungen für den Innenraum, die durch den Antrieb und die Fahrt entstehen. Dabei muss man untersuchen, wie diese Geräusche davon abgehalten werden, in den Zug einzutreten. Generell kann man sagen, dass akustische Effekte nur durch geräuschkämmende Materialien abgeschwächt werden können. So ist es naheliegend, dass zum Vermindern der Lautstärke die verwendeten Bauteile eine wichtige Rolle spielen. Da die Außenhaut eines Zuges hauptsächlich aus Metall und Glas besteht und Schwingungen (Schall) sehr gut weiterleitet, ist es wichtig, dass die Materialien geräuschabsorbierend sind. Also muss der Transmissionsgrad (siehe Infobox) der verwendeten Materialien möglichst klein sein.

Daher sollte man die verwendeten Metalle sicherlich mit einer lärmdämmenden Beschichtung versehen oder die Dicke der Materialien erhöhen. So werden nicht nur laute Schienengeräusche gedämpft, sondern auch die akustischen Effekte des Fahrt-/Seitenwindes.

Außerdem gibt es auch Lärmverursacher im Inneren eines Zuges. Dazu gehören z. B. Klimaanlage und nicht zuletzt die Insassen selbst (laute Gespräche untereinander und via Mobiltelefon).



Um diese zu absorbieren, benutzt man extra dafür entwickelte Materialien für Karosserie und die Inneneinrichtung des Fahrzeugs. Da man aber auch ein gewisses Maß an Privatsphäre als Passagier im Zug benötigt, darf nicht zu viel des Schalls absorbiert werden – in Großraumabteilen stellt ein gewisser Geräuschpegel eine Art Abgrenzung zwischen einzelnen Gesprächsinseln dar. Um innerhalb des Zuges die Störgeräusche verschiedener Geräte zu mindern, werden diese mit besonderem Augenmerk auf die Schalldämpfung verbaut und

beim Einkauf dieser Geräte wird besonderes auf gute Qualität geachtet. Außerdem werden diese Gerätschaften nach Möglichkeit nur an speziell ausgesuchten Orten im Zug aufgestellt. So wird insgesamt eine angepasste Geräuschkulisse erreicht und für die Passagiere eine angenehme Atmosphäre geschaffen

[Grafik 1: Direktschallübertragung]



## Infobox

### Transmissionsgrad

Um Schallabsorptionseigenschaft eines Materials anzugeben, gibt es den sog. Transmissionsgrad, der Aufschluss darüber gibt, wie intensiv sich eine Schwingung vor dem, während dem oder nach dem Durchqueren eines bestimmten Materials ausbreitet. Je kleiner dieser Wert ist, desto mehr Schall wird absorbiert.

## 2. Außengeräusche

### 2.1 Rollgeräusche

Das aus alten Filmen bekannte Rattern während einer Zugfahrt wird durch abtastende Kanten zwischen den einzelnen Schienen verursacht. Diese Schienenstöße kann man mit dem Schlagen eines Hammers auf ein Stück Holz vergleichen. Dabei werden sowohl der Hammer als auch das Metall in Schwingung versetzt. Nun schlägt das Rad eines Zuges aber mit einer deutlich höheren Kraft gegen die Schienen, als der Hammer auf das Holz. Begünstigend kommt der kaum stoßdämpfende Effekt des Materials der Schienen im Vergleich zum Holz hinzu. Daraus resultiert ein lautes Rattern, welches sowohl für die Passagiere, als auch für Anwohner ein Störgeräusch darstellt. Dieses Problem wurde mittlerweile von der Deutschen Bahn behoben, indem schon seit längerem nur noch vollverschweißte Schienen verbaut werden und die alten Schienen durch neue ersetzt worden sind.

Bei dieser Art von Schienen werden die Kanten so verschweißt, dass eine glatte Fläche zwischen den einzelnen Schienen entsteht und somit das Rad nicht mehr an die Kanten stoßen kann. Aber nicht nur die Verarbeitung der Schienen spielt eine Rolle bei den Geräuschen, die während einer Fahrt entstehen, sondern auch die Beschaffenheit des Oberbaus: Beispielsweise werden Schotteruntermaten eingesetzt um die bei aufgerauter Schiene immer noch entstehenden Rollgeräusche zu dämmen.

### 2.2 Bremsgeräusche

Ein weiterer Verursacher von Lärm sind die Bremsen. Da bei den herkömmlichen Klotzbremsen, welche im Güterverkehr eingesetzt werden, auf der Lauffläche des Rades gebremst wird, entstehen hierbei laute, für das menschliche Ohr sehr unangenehme und durchdringende Geräusche. Zudem verschleiben dabei die Bremsklötze und die Lauffläche wird stark aufgeraut. Diese Aufrauung hat in Bezug auf die Rollgeräusche, wegen steigender Reibung zwischen Rad und Schiene ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Schallemissionen. Als mögliche Gegenmaßnahme verwendet man Verbundstoffbremsklötze, die eine Aufrauung der Lauffläche verhindern.

[Die neue LL-Sohle ist eine echte „Flüsterbremse“]



Im Personenverkehr werden standardmäßig Scheibenbremsen eingesetzt, welche ebenfalls keinen negativen Einfluss auf die Lauffläche haben. Im Güterverkehr werden sie aus Kostengründen nicht verwendet, weswegen zudem auch Schallschutzwände in Wohngebieten gebaut werden, welche neben den Bremsgeräuschen auch andere entstehende Geräusche dämmen.

In ICEs werden seit dem Jahr 2000 in einigen Zügen Wirbelstrombremsen (siehe Infobox) verbaut. Diese haben den entscheidenden Vorteil, dass sie aufgrund einer komplett anderen Funktionsweise nicht durch Reibung, sondern durch Induktion abbremsen und somit weder selbst noch die Lauffläche verschleifen. Als angenehmen Nebeneffekt verursachen sie dabei auch keinerlei Geräusche.



## Infobox

### Wirbelstrombremse

Eine Wirbelstrombremse besteht vereinfacht beschrieben aus einem Elektromagneten und einer Metallscheibe, welche fest mit der Achse des Zuges verknüpft ist. Will man den Zug nun abbremsen, wird der Elektromagnet eingeschaltet. Dies hat zur Folge, dass der Zug abgebremst wird.

Doch was genau geschieht dabei?

In die Scheibe wird aufgrund des Magnetfeldes, welches sie durchfährt ein Strom induziert. Dieser fließt nach der Regel von Lenz in die Richtung, in der er seiner Ursache durch das von ihm erzeugte Magnetfeld entgegenwirkt. Somit wird der Zug ohne Reibung abgebremst.

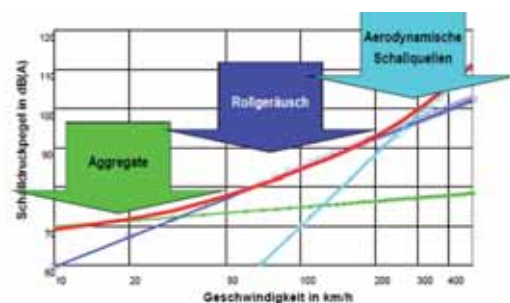
### 2.3 Lüftergeräusche (Motor)

Wie bereits im Kapitelabschnitt Innenakustik erwähnt, verursachen die Lüftungen (Aggregate) eines Zuges Lärm. Jedoch gibt es nicht nur die Lüftung innerhalb des Zuges, sondern auch die der Motoren. Das Problem ist nun, dass es schwierig ist, diese Geräusche zu reduzieren. Denn Lüfter können weder isoliert werden, noch in ihrer Leistung minimiert werden, da sie ansonsten nicht mehr für die nötige Kühlung sorgen können.

Doch warum erzeugt ein Lüfter eigentlich, die von einem Fön bekannten, lauten Geräusche?

Dazu muss man zunächst einmal verstehen was überhaupt ein „Geräusch“ ist. Ein Ton entsteht grundsätzlich durch Druckschwankungen in der Luft, welche auf unser Trommelfell einwirken. Ein Fön oder ein Lüfter versetzt die Luft mit den Rotorblättern ebenfalls in Schwingung, wodurch ein von der Drehgeschwindigkeit abhängiger Ton erzeugt wird. Je schneller sich der Propeller dreht, desto höher wird er. Als Gegenmaßnahme werden natürlich möglichst leise Lüfter eingesetzt. Zudem kann man durch ein entsprechendes Temperatur- und Energiemanagement darauf hinwirken, dass beispielsweise Kühllüfter ihre Drehzahl der benötigten Leistung anpassen. Auch die Lüfter, die das Schienenfahrzeug im Sommer richtig temperieren, werden nachts möglichst heruntergefahren.

Eine grobe Übersicht über den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und den Schallerzeugern zeigt folgende Grafik 2 (Geräuschentstehung)



Geschwindigkeitsabhängigkeit des Gesamtgeräuschs: Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsmechanismen dominieren die verschiedenen Komponenten unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche, wobei das Rollgeräusch nahezu alles übertönt.





### 3. Lärmdämmungsmaßnahmen

#### 3.1 Schallschutzwände

Das sind Wände, die aufgestellt werden, um Schall zu absorbieren. Sie müssen zusätzlich wetterbeständig, stabil und langlebig sein. Wie gut das funktioniert hängt von mehreren Faktoren ab:

- | Höhe der Lärmschutzwand
- | Innerer Aufbau der Lärmschutzwand
- | Abstand von der Lärmquelle (Emissionsort)
- | Frequenzspektrum des Schalls
- | Krümmung der Wand
- | Material der Wand

Insgesamt gibt es viele verschiedenen Typen von Schallschutzwänden. So kann erreicht werden, dass der Schall, der erzeugt wird, möglichst gut absorbiert wird, indem die Schutzwände den jeweiligen Gegebenheiten optimal angepasst werden können (Optik, Form, ...). Insgesamt ist das eine sehr effektive Lösung zu Lärmbekämpfung. Wie die gesamten Schallschutzmaßnahmen an einer HGV-Strecke aussehen, sieht man an der unteren Abbildung noch einmal zusammengefasst.

[Grafik 3: Übersicht von Schallschutzmaßnahmen)

#### 3.2 Besonders überwachtes Gleis

Was ist das besonders überwachte Gleis? Es ist ein Verfahren, bestimmte, speziell ausgewählte Abschnitte des Schienennetzes besonders zu überwachen, um Schallemissionen möglichst gering zu halten. Da die Schienen mit der Zeit aufgeraut werden, wird periodisch überprüft, ob die Vorgaben des Schallschutzes noch erfüllt werden. Diese Überwachung geschieht mit dem Schallmesszug der DB Systemtechnik. Ist das nicht mehr der Fall, werden die Gleise abgeschliffen. Auf diese Weise kann garantiert werden, dass die Schienen in einem guten Zustand sind, um so keinen unnötigen Lärm zu erzeugen.



# Aerodynamik

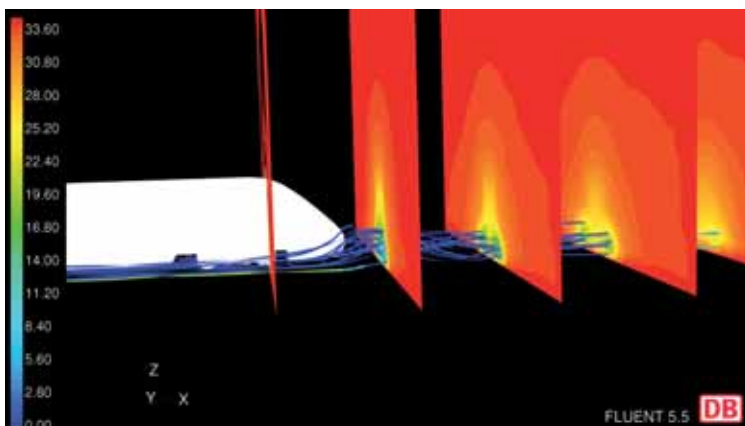


Aerodynamisch betrachtet ist der Bau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke durchaus eine Herausforderung. Soll auf ihr die Fahrt mit einem Zug mit Geschwindigkeiten über 300 km/h möglich sein, muss die Strecke entsprechend für die stärker ausgeprägten aerodynamischen Effekte ausgebaut sein. Im folgenden Kapitel sollen Aspekte dargestellt werden, die dabei beachtet werden müssen, um eine sichere Fahrt zu gewährleisten. Auch notwendige Anpassungen werden aufgezeigt.

## 1. Aerodynamische Lasten auf die Umgebung

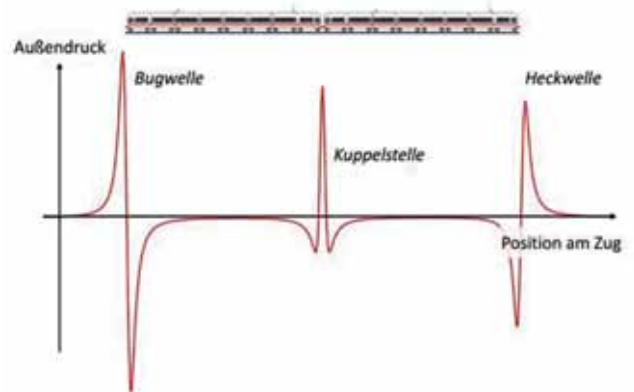
Allgemein kann man sagen: Je schneller ein Zug fährt, desto größer werden auch die aerodynamischen Lasten, die er auf ein stehendes Objekt in Gleisnähe ausübt. Dabei sind nicht nur Schilder und Masten, sondern auch, viel bedeutender, Menschen in Gleisnähe gemeint.

Darunter gibt es zwei Hauptfaktoren, die für die größten Kraftentwicklungen verantwortlich sind. Der erste ist dabei der sog. Drucksprung, der bei der Vorbeifahrt des Zugkopfes und in abgeschwächter Form an einer eventuellen Kuppelstelle zwischen zwei aneinanderhängenden ICEs, sowie am Zugheck zu beobachten ist.



Grafik1: Druckverteilung

Die durch das äußere Druckfeld eines Zuges entstehenden aerodynamischen Lasten und die daraus resultierenden Risiken sind allerdings ein komplexes Zusammenspiel vieler kleiner Einzelfaktoren.



Grafik 2: Bug- und Heckwelle

Am Beispiel der Bugpassage ist dieses Verhalten am einfachsten zu erklären: Der Zug schiebt während der Fahrt die Luftteilchen vor sich zusammen, d.h. die Luft verdichtet sich und es entsteht ein Überdruck im Vergleich zum Normaldruck vor dem Zugkopf.

Ein stehender Beobachter in Gleisnähe erfährt deshalb als erstes eine Kraft, die vom Zug weg wirkt. Passiert ihn der Zugkopf, nimmt er eine rapide Druckabnahme wahr, beruhend darauf, dass die aufgestaute Luft seitlich weg vom Zugkopf abklingt und sich ein Unterdruck einstellt. Der Beobachter nimmt das als Sog wahr, wird also nach dem anfänglichen Weggestoßen werden mit ähnlicher Intensität zum Zug hingezogen. Durch diesen charakteristischen Druckverlauf wird dieses Phänomen auch Kopfwelle genannt. Ihr Ausschlag, also ihre Amplitude, nimmt mit steigenden Geschwindigkeiten zu und muss deswegen beim Bau von Hochgeschwindigkeitsstrecken beachtet werden.

## Infobox

### Überdruck/Unterdruck

Genau genommen muss immer, um diese Ausdrücke verwenden zu können, ein Vergleichswert bzw. ein Bezugswert genannt werden, zu welchem im Vergleich ein höherer oder niedriger Druck herrscht. Also müsste eine korrekte Aussage immer lauten: Hier herrscht ein Über-/Unterdruck im Vergleich zum Normaldruck. Als Normaldruck bezeichnet man dabei den mittleren Luftdruck, den die Erdatmosphäre im Idealfall auf Meereshöhe entwickelt. Dieser liegt ungefähr bei 1013 hPa. Im Volksmund hat sich jedoch eingebürgert, den Vergleichswert wegzulassen und nur noch von Über-/Unterdruck zu sprechen, auch wenn man dabei meistens „im Vergleich zum Normaldruck“ meint.

Besonders Schilder können durch die schnell hervorgerufenen Kräftewechsel leicht verschleifen oder zu Bruch gehen, im schlimmsten Fall könnten Bruchstücke entstehen, die durch den im Folgenden erklärten Fahrtwind mitgerissen und so zu unkontrollierbaren Geschossen werden können. So kommen wir zu dem zweiten auftretenden Risiko: der entstehende Fahrtwind. Ebenso wie bei der Kopfwelle ist die Problematik bereits von langsamer fahrenden Zügen bekannt, nimmt jedoch deutlich größere Dimensionen bei steigenden Geschwindigkeiten an. Nach Wolf-Heinrich Hucho (Hucho, Wolf-Heinrich: Aerodynamik der Stumpfen Körper, 1. Auflage, Wiesbaden 2002, S.358) wird der Fahrtwind in zwei Kategorien unterteilt, die am Zug selbst entstehende Grenzschicht und der an den letzten Wagon anschließende Nachlauf.

Während der Fahrt werden die Luftteilchen von der Zugoberfläche mitgerissen, wodurch die gerade genannte Grenzschicht entsteht, deren Breite und Intensität von der Länge und der Geschwindigkeit des Zuges abhängt. Fährt der Zug also schneller, nimmt sie an Intensität zu, womit auch die durch sie verursachten Kräfte steigen. Sehr nah an der Zugoberfläche haben die Luftteilchen annähernd dieselbe Geschwindigkeit wie der Zug selbst, mit zunehmendem Abstand von ihm nimmt ihre Geschwindigkeit jedoch rasch ab. Der Grenzschicht folgt hinter dem letzten Wagon der Nachlauf, der das langsame Abnehmen des Fahrtwindes beschreibt. So können enorme Lasten für Gegenstände und Menschen entstehen, die zu nah an einen schnell fahrenden Zug geraten, die Folge wäre ein „Mitgerissenwerden“ durch den Zug. Besonders durch die Kombination aus allen oder verschiedenen aerodynamischen Auswirkungen können risikoreiche Situationen entstehen.

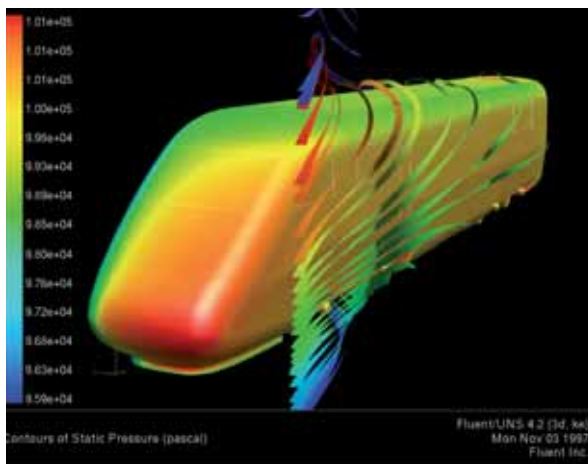


Da sich bei Hochgeschwindigkeitsstrecken alle aerodynamischen Aspekte aufgrund der höher gefahrenen Geschwindigkeiten verstärken, müssen robustere Materialien bzw. speziell angepasste Formen verwendet werden, um diesen erhöhten Kräften standzuhalten. Zu sehen ist das beispielsweise an den verwendeten Masten für die Stromversorgung, welche im Kapitel „Oberbau“ beschrieben werden. Allerdings gibt es auch Fälle, bei denen keine robusteren Materialien verwendet werden können. Gemeint sind damit vor allem Menschen in Gleisnähe, also wartende Reisende auf dem Bahnsteig. Um entgegenzuwirken, dass diese von den aerodynamischen Kräften eines vorbeifahrenden Zuges zu sehr beeinträchtigt oder sogar umgeweht bzw. mitgerissen werden, muss für mehr Abstand zwischen Zug und wartenden Reisenden gesorgt werden. Denn je mehr Abstand, desto weniger Intensität haben alle vom Zug ausgehenden aerodynamischen Kräfte.

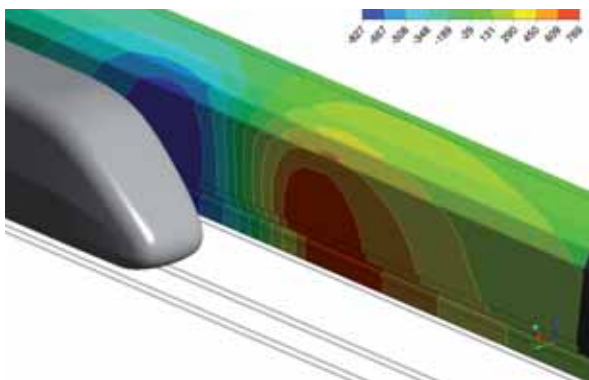
## 2. Aerodynamische Aspekte im Tunnel

Setzt sich ein Zug in Bewegung, verdrängt er während der Fahrt permanent Luftmassen an seiner Front. Diese werden zur Seite gedrückt und strömen um den Zug herum. Fährt ein Schienenfahrzeug allerdings durch einen Tunnel, können die Luftmassen nur noch bedingt zur Seite verdrängt werden.

Teilweise strömen die Luftteilchen zwar am Zug vorbei, wodurch zwischen zwei Wagen Wirbel entstehen können, aber ein Teil der Luftmassen bleibt vor dem Zug, sodass sich bei der Tunneleinfahrt dort Druckwellen aufbauen. Diese Druckwellen und Verwirbelungen entlang des Zuges erzeugen eine höhere Belastung auf fast alle Bauteile des Schienenfahrzeugs. Durch die guten aerodynamischen Eigenschaften eines Hochgeschwindigkeitszuges hat dieser damit aber weniger Probleme - es stellt hauptsächlich ein Komfortproblem für die Fahrgäste dar (beispielsweise Ohrendruck).



Wenn sich dagegen ein ICE und ein Güterzug, der aerodynamisch schlecht gebaut ist, im Tunnel treffen, potenzieren sich die Verwirbelungen. Deshalb wird eine derartige Begegnung nach Möglichkeit vermieden.

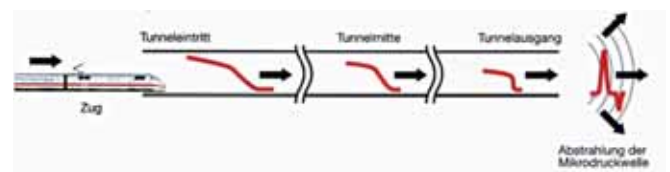


### 3. Tunnelknall

Ein weiteres Thema bei Tunnelfahrten ist ein sehr interessantes aerodynamisches Phänomen: der Tunnelknall. Fachleute nennen dies die „Emission von Mikrodruckwellen“.

Wie der Name schon sagt, geht es beim Tunnelknall um einen lauten Knall, der zum ersten Mal in Deutschland 2005 bei den Tunneln Irlahüll und Euerwang auftrat - ein Problem für Anwohner im Bereich der Tunnelportale.

Die Luftmassen, die der Zug vor sich herschiebt, bilden eine Wellenfront, die sich nach längerer Tunnelfahrt immer „höher“ aufsteilt (als Querwelle veranschaulicht – denn eigentlich handelt es sich um eine Längswelle). Diesen Druckunterschied bezeichnet man auch als Druckgradient.



Am Tunnellende emittiert die aufgestaute Druckwelle durch die dort plötzlich verbreiterte Querschnittsfläche zum Knall. Der Knall ist schon zu hören, wenn der Zug noch mitten im Tunnel ist, da sich die Druckwellen in Schallgeschwindigkeit ausbreiten und somit schneller sind als der Zug selbst. Es gibt diverse Faktoren, die das Auftreten der oben genannten Probleme besonders begünstigen. Ein entscheidender Aspekt ist natürlich die sehr hohe Geschwindigkeit. Der Tunnelknall tritt meist erst bei über 250 km/h auf. Auch die Geometrie des Tunnels an sich spielt eine große Rolle, d. h. Länge und Querschnitt. Je länger und ein Tunnel ist, desto mehr Zeit steht der Druckwelle für eine Aufsteilung zur Verfügung, wodurch der Tunnelknall lauter wird. Je kleiner der Querschnitt eines Tunnels ist, desto größer und steiler ist bereits die Einfahrdrukwellen. Deswegen sind auch meistens nur eingleisige Tunnel ein Problemfeld – ansonsten haben die Luftteilchen genügend Platz neben dem Schienenfahrzeug.

Einen weiteren begünstigenden Aspekt stellen die verwendeten Baumaterialien dar. Moderne Hochgeschwindigkeitsstrecken sollen möglichst gerade verlaufen, damit möglichst oft und lange mit maximaler Geschwindigkeit gefahren werden kann. Dafür wird es auch in Kauf genommen, längere Tunnel zu bauen (wo bei herkömmlichen Strecken das Gleis beispielsweise um einen Berg gelegt wird, wird bei Hochgeschwindigkeitsstrecken eher ein Tunnel gegraben) und insgesamt mehr Tunnel.



Aus brandschutztechnischen Gründen muss der Oberbau aus Beton gestaltet werden, damit die Tunnel auch von Löschfahrzeugen befahren werden können. Nebenbei wird damit auch der Steinflug verhindert der bei hohen Geschwindigkeiten zum Problem wird (vgl. Kapitel Oberbau).

Diese Veränderung hat jedoch auch Nachteile: Durch die glatte Oberfläche des Betons wird der Fahrzeuflärm stärker reflektiert, was zu einer Verstärkung der akustischen Effekte führt. Erst durch diese Verstärkung kann dann auch der Tunnelknall zustande kommen.

Zur Lösung der Probleme innerhalb des Tunnels werden verschiedene Ansätze verfolgt, um den Passagieren den höchstmöglichen Fahrkomfort zu bieten. Da die Gleise heutzutage aus Brandschutzgründen fast ausnahmslos durch einzelne Röhren verlegt werden, sinkt der Querschnitt der Tunnelröhre, was die Reflexion, und damit die akustischen Effekte zusätzlich verstärkt. Als mögliche Kompensation lassen sich am Schienenfahrzeug Veränderungen vornehmen, um eine geringere Verdrängung zu erreichen.

Alternativ kann man den Tunnel verändern, um die Reflexion der Druckwellen am Tunnel zu minimieren. Hier beschränken wir uns auf die Lösungen, die Veränderungen am Tunnel betreffen: Eine Möglichkeit, die Reflexion zu verringern, stellen spezielle Oberflächenstrukturen an der Tunnelwand dar, die den Schall nicht gleichmäßig zurückwerfen, sondern als Diffusor wirken und für Luftverwirbelungen sorgen. So wird verhindert, dass die Druckwellen sich weiter vor dem Zug aufstauen.

Ein anderer Ansatz ist der Bau von Luftschleusen bzw. -ventilen, in die die aufgestaute Luft entweichen kann.



Diese letzte Lösung ist schon bei mehreren Tunneln auf Hochgeschwindigkeitsstrecken vertreten: auch im Tunnel Euerwang wurden sie nachträglich eingebaut, nachdem dort das Phänomen Tunnelknall aufgetreten war.

#### 4. Sicherheit bei Seitenwind

Die Geschichte des Zugverkehrs kennt nicht sehr viele durch Seitenwind verursachte Zugunglücke. Dennoch ist es ein nicht zu vernachlässigendes Thema, das mit Hochgeschwindigkeitszügen an Bedeutung gewinnt. (Die Unfälle, die vorkamen traten in der Regel bei Schmalspurbahnen auf. Beispielsweise kippte 2002 in Österreich ein Zug während einer Bogenfahrt bei starkem Wind von den Gleisen (vgl. HUCHO, 2011, S. 327) oder schon 1925 ein Zug vom „Owencarrow Viaduct“ in Irland (vgl. ebd. S.312).)

Es gibt einige Faktoren, die die Kippstabilität eines Zuges beeinflussen (vgl. Bogenfahrt mit Überhöhung). Zunächst sind zugspezifisch die Form (aerodynamisch günstig oder nicht), bzw. Eckdaten wie Höhe und Länge, die Masse und die Lage des Schwerpunkts zu erwähnen. Eine Massenverteilung mit tief liegendem Schwerpunkt begünstigt eine stabile Fahrlage. Außerdem ist die Streckenführung von großer Bedeutung. Sind die Schienen beispielsweise auf Wällen, Brücken und an Berghängen verlegt, treten oft höhere Windgeschwindigkeiten auf. Diese entstehen einerseits durch Windkompressionen und andererseits durch die ohnehin stärkeren Winde in größeren Höhen (sinkende Erdreibung der Luftmassen).

Ähnlich verhält es sich in Tälern („Düsen effekt“ und Tal-/Bergwindssysteme) und auf großen freien Flächen (ungehinderte Luftmassenbewegungen), z. B. am Meer. Zudem können Bogenfahrten zu Schwierigkeiten führen: zu dem dort entstehenden Kippmoment (vgl. Bogenfahrten) addiert sich das des Windes. Die Spurweite gilt prinzipiell nicht als problematischer Einflussfaktor, da sie in Deutschland auf 1435 mm festgelegt ist, was generell zu einer stabilen Fahrlage führt, jedoch sollte sie erwähnt werden, weil sie als Erklärung für viele Unfälle von Schmalspurbahnen dient. Durch einen geringeren Gleisabstand wird nämlich die Kippstabilität des Fahrzeugs beeinträchtigt.

Der Gefahr der Entgleisung muss entgegengewirkt werden, bei HGV-Strecken, wie auch bei konventionellen Strecken. Um Züge vor einem Spurverlust zu bewahren, überlegt man sich zunächst, welche Möglichkeiten der Einflussnahme bestehen. Zum einen betrachtet man Parameter, die den Zug generell unempfindlicher gegen Windlasten machen:

- | höhere Masse
- | niedriger Schwerpunkt

beides gilt besonders für das führende Fahrzeug, das den höchsten Windkräften ausgesetzt ist. Zum anderen gibt es Faktoren, die die auftretenden aerodynamischen Lasten reduzieren:

- | Zugform
- | Fahrgeschwindigkeit
- | baulicher Windschutz
- | Windwarnsysteme

Gerade bei den immer schneller und leichter werdenden Hochgeschwindigkeitszügen ist die Standsicherheit gefährdet. Antriebsmotoren, und damit Gewicht, werden teilweise aus den Zugköpfen in den Rest des Fahrzeugs verlagert, bzw. manchmal wird der Kopf ohne eigene Antriebsfunktion sogar nur geschoben. Somit sind die am stärksten beeinflussten Zugteile (aber auch der ganze Zug) leichter und weniger standfest. Zugspezifisch kann man dieses Problem hauptsächlich nur durch eine angepasste, windschnittige Zugform oder einen tiefer liegenden Massenschwerpunkt lösen, da man die zwar sehr effektiven Ballastgewichte wegen des von ökonomischen und ökologischen Faktoren motivierte Ziel des Leichtbaus nicht in Erwägung zieht. Eine größere Masse würde mehr Energieverbrauch und dadurch u.a. höhere Betriebskosten bedeuten. Also muss das, was man durch Veränderungen am Fahrzeug nicht erreicht, durch Maßnahmen an der Strecke ausgeglichen werden.

Windwarnsysteme werden bei windanfälligen Streckenabschnitten, die durch ihre Lage keinen natürlichen Schutz besitzen, verwendet. Es werden dort Messanlagen entlang der Gleise aufgestellt. Falls die Windgeschwindigkeit kritische Werte überschreitet, müssen (Schnell-)Züge auf andere Strecken ausweichen oder langsamer fahren.



Windmessgerät

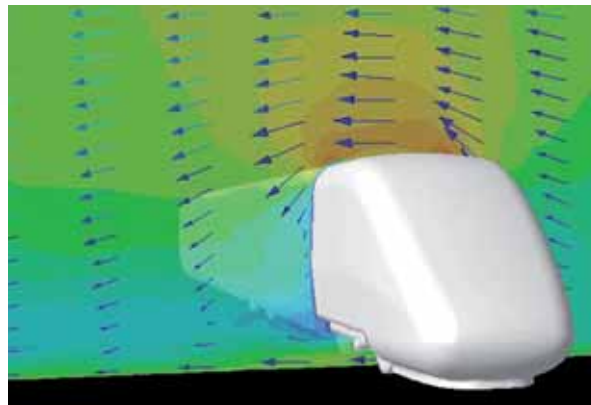
Durch Seitenwindschutzwände können Windbeeinflussungen nahezu vollkommen eliminiert werden. Dafür müssen diese bis zu 10 Meter von den Gleisen positioniert werden und ähneln Schallschutzwänden (vgl. Lit.-verz. ROSSBERG/PESTER, 2002).



Dieser sehr effektive Windschutz wird allerdings nur an besonders gefährdeten Stellen verwendet, da er mit sehr hohen Kosten einhergeht. Eine mangelhafte Seitenwindstabilität des Schienenfahrzeugs kann auf diese Weise nicht vollständig kompensiert werden. Ein Beispiel für solch eine lokale Gefährdung ist ein Abschnitt der HGV-Strecke zwischen Köln und Frankfurt. Dort wurden auf zwölf Kilometern Länge Windschutzwände errichtet. Durch ihre exponierte Lage muss hier mit starken Seitenwinden gerechnet werden.

Da man aber nicht überall solch aufwendige Schutzmaßnahmen treffen will und kann, benötigt man Verfahren und Größen, um die durch Seitenwind verursachten Risiken beurteilen zu können. Hierfür folgt man den Vorgaben der Richtlinie Ril 807.04, die 2006 von der Deutschen Bahn in Kraft gesetzt und vom Deutschen Eisenbahn-Bundesamt als nationaler Standard anerkannt wurde. Diese besagt u.a., dass bestehende Strecken und Fahrzeuge ausreichend sicher sind und Neubaustrecken (und neue Fahrzeuge) diesem Sicherheitsniveau entsprechen oder es überschreiten müssen. (vgl. Deeg/Tielkes, u. A.; Tielkes/Heine, u. A.)

Generell ist für alle personenbefördernden Schienenfahrzeuge ein Standsicherheitsnachweis bei Seitenwind zu erbringen. Die Ril 807.04 fordert, dass dieser Nachweis auch noch bei einer Grenzwindgeschwindigkeit  $w_{\text{Stand}} = 29,5 \text{ m/s} = 106,2 \text{ km/h}$  gelingt. (Umrechnung:  $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$ ) (vgl. Publikation des EBA).



## Infobox

Der Luftwiderstand kann mit Schulphysik vereinfacht beschrieben werden durch die Formel

$$F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

- $c_w$ : Widerstandsbeiwert des Zuges
- $A$ : Referenzflächeninhalt der angeströmten Fläche
- $\rho$ : Dichte der anströmenden Luft

Somit kann man vereinfacht sagen:

$$F_w \sim v^2$$

also der Luftwiderstand nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit quadratisch zu.

## Hochgeschwindigkeits- verkehr in Deutschland

Im Jahr 1835 wurde zwischen Nürnberg und Fürth die erste Eisenbahn Deutschlands, der „Adler“, in Betrieb genommen. Im Gegensatz zur heutigen Bahn waren in den Anfängen des Schienenverkehrs private Gesellschaften für Bau und Betrieb zuständig, wodurch sie großen Einfluss erhielten. In dieser Zeit expandierte das Schienennetz in rasanter Geschwindigkeit.

Mit der Reichsgründung 1871 betrieben die einzelnen Gliedstaaten des Deutschen Reiches eine Reihe von Staatsbahnen, welche zur Zeit der Weimarer Republik (1920) als Deutsche Reichsbahnen in die Verwaltung des Reiches überführt wurden. Während damals noch Dampfloks die Schienen dominierten, wurde Ende des 19. Jahrhunderts die erste elektrische Lokomotive von Werner von Siemens entwickelt. Diese Errungenschaft im Bahnverkehr ebnete den Weg für den heutigen Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV).

Die Menschheit verlangt seit jeher immer mehr nach besserer und schneller Mobilität. So soll doch die Zeit, die man benötigt, um von einem Ort zu einem anderen zu gelangen, möglichst auf ein Minimum reduziert werden. Im Eisenbahnbau findet diese Entwicklung ihren Niederschlag. Sowohl Fahrzeuge als auch Strecken werden seit den Anfängen kontinuierlich optimiert, um den Güter- und Personenverkehr zu beschleunigen. Während der „Adler“ lediglich Höchstgeschwindigkeiten von 65 km/h erreichte, fahren moderne Hochgeschwindigkeitszüge fahrplanmäßig Geschwindigkeiten jenseits der 200 km/h-Marke. Versuchstriebwagen erreichen sogar Geschwindigkeiten von über 500 km/h.

Schnell fahrende Züge gibt es jedoch schon seit mehr als 100 Jahren. Bereits im Jahr 1903 wurde die 200 km/h Marke von einem Versuchstriebwagen der Firma Siemens durchbrochen und dies zu Zeiten, in denen fahrplanmäßige Züge selten mit über 100 km/h unterwegs waren.



Einen ersten planmäßigen Schnellverkehr gab es in Deutschland jedoch erst in den 1930er Jahren mit Fernschnelltriebwagen (z. B. mit dem Dieselizeug „Fliegender Hamburger“) und dampfbetriebenen Stromlinien-Schnellzügen. Zu dieser Zeit gingen die meisten Schnellfahrstrecken von Berlin aus.





Fotos: DB AG/Claus Weber, DB Netz AG, Wikipedia

Im Jahr 1973 wurde schließlich mit dem Bau der ersten Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Würzburg und Hannover begonnen. Auf ihr sollten Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h möglich sein. 1991 ging der erste ICE in Betrieb. Mit ihm wurden Höchstgeschwindigkeiten von 280 km/h möglich. Mit jeder Nachfolgegeneration wurde die Geschwindigkeit etwas erhöht. Über die Zukunft des Zugverkehrs lassen sich keine abschließenden Aussagen treffen. Vielmehr gibt es weltweit verschiedene, teils konkurrierende Konzepte, deren Diversität sich im Idealfall aber auch gegenseitig positiv auswirken könnte.

In verschiedenen Ländern laufen Tests und Studien mit Magnetschwebebahnen oder Hochgeschwindigkeitsröhren („Hyperloops“), die aber eine völlig neue Infrastruktur erfordern. Auch „Kapselsysteme“, bei denen sich die Züge bei Bedarf selbstständig bilden, werden zumindest angedacht.

Der sogenannte „Next Generation Train“ ist ein neuartiges Konzept, bei dem der Zug völlig ohne Abnehmer und Stromleitungen, nur durch Induktionsschleifen im Oberbau mit Energie versorgt wird. Des Weiteren wird jedes Rad einzeln angetrieben. Dies führt dazu, dass sich die Räder mit unterschiedlicher Geschwindigkeit drehen können. Dies ist zum Beispiel in der Kurvenfahrt sinnvoll, da die äußeren Räder mit höherer Geschwindigkeit gedreht werden können. Dadurch kann der Verschleiß minimiert werden. Generell lässt sich sagen, dass Züge in der Zukunft schneller, umweltfreundlicher und komfortabler werden. Die Weiterentwicklung des

bestehenden Netzes dürfte in Deutschland bis auf weiteres der gangbarste Weg sein.

Deutschland hat bereits heute ein dichtes und mit einer Länge von 37.600 Kilometern eines der längsten Eisenbahnnetze Europas. 1991 begann mit den ersten 23 ICE-1-Zügen die Ära des deutschlandweiten Hochgeschwindigkeitsverkehrs. Die Anzahl der Reisenden mit dem ICE im Jahr lag bei 79,5 Mio.





## Danksagung

Die Teilnehmer des P-Seminars Physik des Willibald-Gymnasiums Eichstätt möchten sich an dieser Stelle sehr herzlich für die kompetente Hilfestellung und freundliche Kommunikation bei den Mitarbeitern der Deutschen Bahn bedanken.

Im Einzelnen sind das:

Dipl.-Ing. Dr. Thorsten Tielkes  
Dipl.-Ing. Andreas Beck  
Dr.-Ing. Manfred Zacher  
Dr.-Ing. Wilhelm Baldauf  
Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Brandl  
Dipl.-Phys. Dr. Werner Krötz

Hierbei möchten wir besonders würdigen, dass sich diese die Zeit genommen haben, uns in die einzelnen Themenbereiche einzuführen und hilfreiches Material und Fachliteratur zur Verfügung zu stellen.

Außerdem möchten wir uns bei der Deutschen Bahn in Person von Herrn Hechenberger und Herrn Assfalg bedanken, der die Arbeiten an Layout und Drucklegung übernommen hat.

Es bedanken sich die Schüler des P-Seminars:

Marco Abraham (Akustik)  
Paul Fröhlich (Aerodynamik)  
Mathias Kilcher (Aerodynamik)  
Paul Medl (Aerodynamik, Oberbau)  
Benedikt Meyer (Oberleitung)  
Jonas Neumeyer (Oberleitung)  
Simon Regler (Oberleitung)  
Johannes Scheithe (Oberleitung)  
Fabian Stallbauer (Leit- und Sicherungstechnik)  
Stöbl Michael (Leit- und Sicherungstechnik)  
Michael Stur (Akustik)  
Max Werner (Aerodynamik)  
Josef Wittmann (Leit- und Sicherungstechnik)  
Sabine Wittmann (Oberbau)

# Organisation, Produktion und Layout

**Alfred Hechenberger**  
DB Systemtechnik GmbH  
Leiter Marketing

**Andreas Assfalg**  
Mediengestaltung  
Produktions- und Reinzeichnungsservice

## Quellen und Autoren

### **Oberbau**

LICHTBERGER, B. (2004): Handbuch Gleis  
MÜNSCHWANDER, P (1990): Schienenschnellverkehr 3: Das Hochgeschwindigkeitssystem der Deutschen Bundesbahn. Heidelberg: R. v. Decker's Verlag.

### **Leit- und Sicherungstechnik**

Bahnbau, Volker Matthews, B.G.  
Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH;  
Handbuch Eisenbahninfrastruktur,  
Prof. Dr.-Ing. Lothar Fendrich (Hrsg.),  
Springer-Verlag;  
Vortrag von Dr.-Ing. Wilhelm Baldauf:  
P-Seminar Eichstätt;  
ETCS-Broschüre der Deutschen Bahn

### **Akustik**

TAE Seminar-Gerbig: Maßnahmen des aktiven Schallschutzes bei der DB AG

### **Aerodynamik**

Deeg, Tielkes, Eisenlauer, Steinert:  
Overview of Aerodynamic Studies and Tests performed for new High Speed Line Erfurt - Leipzig/Halle  
Tielkes, Heine, Möller, Driller:  
A Probabilistic Approach to Safeguard Cross Wind Safety of Passenger Railway Operation in Germany: The new DB Guideline Ril 80704  
HUCHO, W. (2011): Aerodynamik der stumpfen Körper. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
ROSSBERG, R./PESTER, W. (2002):  
Kein Zug wird aus dem Gleis geweht.

### **HGV Historie**

Siemens-Zeitschrift, 9.Jg. Nr.10, Oktober 1929, S.643

### **Internet:**

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)  
[www.gleisbau-welt.de](http://www.gleisbau-welt.de)  
<https://fahrweg.dbnetze.com>  
<https://www.wikipedia.de>  
<http://www.vde8.de/>  
<http://www.leifiphysik.de>  
<http://www.karlsruhe-basel.de>  
[www.eba.bund.de](http://www.eba.bund.de)  
<http://www.ingenieur.de/Themen/Bus-Bahn>  
<http://www.spiegel.de/reise>  
<http://www.general-anzeiger-bonn.de>  
<https://www.siemens.com/history>  
<http://www.mobility.siemens.com>



**Willibald-Gymnasium Eichstätt**

Schottenau 16  
D-85072 Eichstätt



**DB Systemtechnik GmbH**

Pionierstraße 10  
D-32423 Minden  
[systemtechnik@deutschebahn.com](mailto:systemtechnik@deutschebahn.com)  
[www.db-systemtechnik.de](http://www.db-systemtechnik.de)

**Ausgabe Juni 2016**