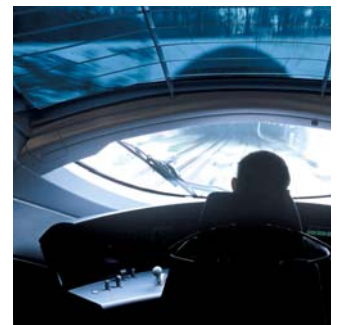
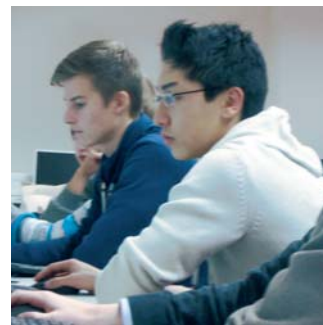


Das System Bahn: Der ICE



Eine Publikation des
Goethe-Gymnasiums Regensburg
in Zusammenarbeit mit der
Deutschen Bahn AG



Schulleiter

Goethe-Gymnasium
Regensburg



Vorwort

Die Schule ist höchst erfreut über die Möglichkeit der Zusammenarbeit mit einer renommierten Einrichtung wie der Deutschen Bahn AG im Rahmen der P-Seminare in der Oberstufe des 8-jährigen Gymnasiums in Bayern.

In ihrer praxisbezogenen und damit berufsorientierten Arbeit hatten die 15 Oberstufenschüler die einmalige Gelegenheit, sich intensiv und eingebettet in die Technik- und Berufswelt der Deutschen Bahn mit Fragen zur „Physik und Technik rund um den ICE“ auseinanderzusetzen.

Zur prinzipiellen Freude an der Technik gesellte sich rasch Detailakribie, basierend auf einer ausgeprägten Neugierde. Die Schüler recherchierten eigenständig und bilanzierten ihre Erkenntnisse in einem Fachartikel im Rahmen des umfassenden Themas und trugen ihre Ergebnisse zu einem beeindruckenden Gesamtwerk zusammen. Das bedeutete die Realisierung der so oft geforderten Methode des schülerorientierten und eigenständigen Arbeitens in sehr praxisnaher und damit im Sinne der P-Seminare Erfolg bringender Weise.

Sehr wertvoll erwies sich der direkte Kontakt und die fruchtbare Begleitung von Seiten der leitenden Mitarbeiter der Deutschen Bahn AG, die den jungen Forschern und Technikern immer vorbehaltlos zu Seite standen. Für die Schüler war es eine enorme Erfahrung, Ingenieure und Leiter verschiedener Fachabteilungen als Berater zur Seite zu haben. Die gemeinsame Arbeit vor Ort und die direkte Einbettung in die Arbeitswelt der Deutschen Bahn vermittelte ihnen darüber hinaus auch das Gefühl des Dazugehörens und einer fast kollegialen Akzeptanz.

Dafür schuldet die Schule allen leitenden Ingenieuren aus den diversen Fachabteilungen der Deutschen Bahn großen Dank. Ihr selbstloses Engagement und ihre pädagogische Feinfühligkeit hinterließen deutliche Spuren. Sie haben damit auch entscheidenden Anteil daran, dass sich Jugendliche für technische Berufe und Studienrichtungen interessieren und hoffentlich auch diesen Weg im späteren Berufsleben einschlagen.

Franz Feldmeier, Oberstudiendirektor
Schulleiter des Goethe-Gymnasiums

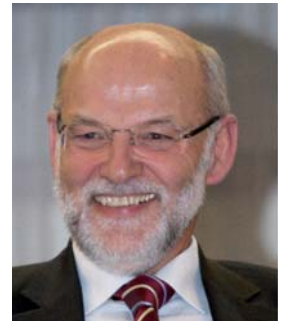


Fast 80 Millionen Menschen fahren jedes Jahr mit den ICE-Zügen der Deutschen Bahn AG. Eine Reise mit bis zu 330 km/h, die heute als selbstverständlich hingenommen wird. Aber was muss alles zusammenpassen, damit diese Fahrten auch stattfinden können? Was musste alles entwickelt und in vielen Tests und Versuchen bestätigt werden, um dieses Ziel zu erreichen?

Fotos: DB AG/Bartłomiej Banaszak, DB Systemtechnik

Eine Publikation

des Goethe-Gymnasiums Regensburg, mit fachlicher Unterstützung durch die DB Systemtechnik GmbH und die Beschaffung Schienenfahrzeuge der Deutschen Bahn AG.



Hans Peter Lang und Peter Lankes, Deutsche Bahn AG

Grußwort

Die Beherrschung des komplexen Systems Eisenbahn erfordert das präzise Zusammenwirken von Fahrzeugtechnik, Infrastruktur und Betrieb. Und wie funktioniert das alles?

Diese Frage haben sich 15 Schüler des Goethe-Gymnasiums Regensburg in ihrem Physik-Seminar gestellt und in mehr als einem Jahr diese Publikation erstellt. Wir als Deutsche Bahn AG haben dieses Projekt unterstützt. Mit dieser Broschüre wird die Komplexität des technischen Systems Bahn auf eine Art und Weise präsentiert, die auch einem nicht technisch vorgebildeten Menschen die unterschiedlichen Themenfelder, die die Fahrt eines ICE betreffen, anschaulich beschreibt.

Mit diesem Werk soll auch verdeutlicht werden, wie die einzelnen Teile des Zuges zusammenwirken, wie sie mit den stationären Anlagen, dem Gleis, der Stromversorgung oder den Signalanlagen harmonieren müssen, um einen reibungslosen Betrieb zu ermöglichen, den die Reisenden selbstverständlich erwarten. Fachleute der DB Systemtechnik GmbH, dem Ingenieurbüro der Deutschen Bahn AG, haben die Schüler ebenso unterstützt wie die Technik-Experten des Schienenfahrzeugeinkaufs der Deutschen Bahn AG.

Zunächst einmal haben die Experten der Deutschen Bahn den Schülern in Einführungsvorträgen einen Überblick über die einzelnen Themenfelder gegeben und mit einer intensiven Besichtigung von ICE-Zügen im Werk München die Dinge veranschaulicht.

In vielen gemeinsamen Terminen, oftmals wieder im ICE-Werk München, wurden der Redaktionsplan erarbeitet, die Themeninhalte festgelegt, die Rechercheergebnisse der Schüler besprochen, die Inhalte gemeinsam fachlich vertieft und die Beiträge auf Verständlichkeit hin durchgesprochen.

Die Schüler lernten neben den technischen Einzelheiten des ICE und aller seiner begleitenden Themen auch die redaktionelle Arbeit für solch eine Fachpublikation kennen sowie das Erstellen von Literaturquellen- oder Bildnachweisen. Insgesamt war die gemeinsame Arbeit am Thema ICE für beide Seiten ein spannendes und lehrreiches Experiment, das sich gelohnt hat. Das Ergebnis kann sich sehen lassen, viel Vergnügen bei der Lektüre!

Von der Idee zum ICE



Bis ein neuer ICE im normalen Bahnverkehr fährt, dauert es mehr als 5 Jahre.

Dies ist das Ergebnis eines umfangreichen Entwicklungs- und Produktionsprozesses, der hier am Beispiel des „ICx“ (siehe Kapitel 9, Seite 77) dargestellt wird.

Zuerst erstellen Experten der Deutschen Bahn ein sogenanntes Lastenheft, d. h. es wird festgelegt, wie viele ICEs angeschafft werden sollen, wo und wie schnell diese fahren werden, wie viele Passagiere sie befördern sollen, in wie weit der Zug barrierefrei sein soll usw..

Anschließend findet auf Basis des Lastenheftes eine Ausschreibung statt, bei der Industrieunternehmen Angebote für die Entwicklung und Herstellung der neuen Züge bei der Bahn einreichen. Diese werden von der Bahn genau geprüft und es finden Verhandlungen mit den Unternehmen statt, bei denen die Kosten und die technischen Details erörtert werden.

Der Anbieter, der das überzeugendste und wirtschaftlichste Angebot erstellt hat, erhält den Zuschlag. Er beginnt, die technische Abstimmung mit den Fachleuten der Bahn durchzuführen und konstruiert unter Berücksichtigung der Ergebnisse einen Prototyp der neuen Zugeneration. Dieser wird anschließend im Schienennetz ausgiebig Probe gefahren und eventuelle Mängel werden anschließend beseitigt. Auf Basis des verbesserten Zuges findet dann die Massenproduktion statt, d. h. es werden so viele ICEs gebaut, wie die Deutsche Bahn bestellt hat.

Abschließend erhalten die fertigen Triebzüge vom Eisenbahnbundesamt die Zulassung, um im fahrplanmäßigen Bahnverkehr fahren zu dürfen. Ist dies erfolgt, sind seit dem Anfang der Planungen zwischen 60 und 65 Monate vergangen.

Die Geschichte des ICE

Der ICE gilt als das Aushängeschild des Fernverkehrs der Deutschen Bahn AG. Seit seiner „Erfindung“ gab es einige Meilensteine, die im Folgenden aufgelistet sind.

- 1983** Die Deutsche Bundesbahn beschließt, einen Hochgeschwindigkeitszug zu Testzwecken zu beschaffen, um den Fernverkehr in Deutschland zu revolutionieren. Dieser trägt den Namen InterCity Experimental.
- 1986** Der InterCity Experimental fährt erste Testfahrten im Netz der DB, der geplante Serienzug erhält seinen endgültigen Namen: InterCityExpress (kurz: ICE).
- 1987** Die Deutsche Bahn bestellt 60 Züge der ersten ICE-Generation. Der ICE 1 besteht aus insgesamt 14 Fahrzeugen, davon 2 Triebköpfen und einem BordRestaurant mit hohem Dach.
- 1988** Der InterCity Experimental markiert den weltweiten Geschwindigkeitsrekord mit 406,9 km/h.
- 1991** Der ICE 1 fährt erstmals im fahrplanmäßigen Bahnverkehr.
- 1993** Die Deutsche Bahn bestellt 44 Halbzüge der 2. ICE-Generation, von denen zwei zu einem Langzug kombiniert werden können. Diese fahren ab 1996 planmäßig im Schienenverkehr. Der ICE 2 besteht aus kuppelbaren Halbzügen mit je einem Triebkopf und 7 Wagen, davon ein Steuerwagen. Das BordRestaurant hat die gleiche Wagenhöhe wie der restliche Zug.
- 1994** Die Deutsche Bahn AG bestellt 50 Züge der dritten Generation. Die ersten ICE 3 werden ab Juni 2000 im regulären Personenverkehr eingesetzt. Der ICE 3 ist ein Triebwagenzug, d. h. die Antriebstechnik ist in die Passagierwagen integriert, weshalb die Triebköpfe entfallen können. Er besteht aus 2 kuppelbaren Halbzügen mit je 8 Wagen.
- 1999** Der erste ICE mit Neigetechnik (ICE-T) fährt auf kurvenreichen Strecken bis zu 20% schneller als „normale“ Züge. Es werden insgesamt 43 Züge ausgeliefert. Der ICE-T sieht dem ICE 3 sehr ähnlich, hat aber eine kürzere Front und verfügt über die Neigetechnik. Er besteht entweder aus 5 oder 7 Wagen.
- 2002** Die Deutsche Bahn AG bestellt weitere 13 Züge des Typs ICE 3 und weitere 28 Züge des Typs ICE-T, die ab 2005 eingesetzt werden.
- 2008** Die Bahn kauft 16 „neue ICE 3“ (Baureihe 407). Diese sind für den planmäßigen Verkehr insbesondere nach Frankreich vorgesehen. Der „neue ICE 3“ ist ebenfalls ein Triebzug, er besteht aus 8 Wagen und ist auch mit dem „alten“ ICE 3 kuppelbar. Er ist um einiges energieeffizienter als der „alte“ ICE 3.
- 2011** Die Bahn kauft 130 Züge einer komplett neuen Generation als Ersatz für die lokbespannten IC-Züge, weitere Beschaffungen dieser Züge als Ersatz für ICE 1 und ICE 2 sind vorgesehen. Das Projekt trägt derzeit den Arbeitstitel „ICx“. Ein endgültiger Name für diese Generation wird später festgelegt (siehe Kapitel 9, Seite 77).



ICE 1



ICE 2



ICE 3



ICE-T



ICx

Inhalt



Fahrdynamik und Aerodynamik

- 1.1 Fahrdynamik
- 1.2 Aerodynamik

Ab Seite 9

Fahrgastbereich

- 2.1 Aufbau des Wagenkastens
- 2.2 Inneneinrichtung
- 2.3 Klimatechnik

Ab Seite 18

Energieversorgung der ICEs

- 3.1 Elektrischer Zugbetrieb
- 3.2 Bahnstrom-Versorgungsnetz

Ab Seite 28

Antrieb

- 4.1 Energiefluss im ICE
- 4.2 Antriebsmotoren
- 4.3 Leistungssteuerung

Ab Seite 33

Bremsen

- 5.1 Höchste Anforderungen an die Bremsen
- 5.2 Eingesetzte Bremstypen
- 5.3 Bremsmanagement

Ab Seite 45

Rad und Schiene

- 6.1 Aufbau des Rades
- 6.2 Sinuslauf
- 6.3 Kurvenfahrt und Kurvenüberhöhung

Ab Seite 54

Drehgestelle

- 7.1 Anforderungen an das Drehgestell
- 7.2 Grundlegender Aufbau des Drehgestells
- 7.3 Federungen

Ab Seite 60

Fahrweg

- 8.1 ICE-Streckennetz
- 8.2 Gleisführung
- 8.3 Betriebssicherung und Zugfahrtsicherung
- 8.4 Hochgeschwindigkeitsstrecken

Ab Seite 65

Zukünftige Entwicklungen

- 9 Zukünftige Entwicklungsschritte des ICEs

Ab Seite 76



Der ICE

Jeder kennt ihn, fast jeder ist schon einmal mit ihm gefahren – der ICE, die bekannteste Zuggattung Deutschlands. Doch aus welchen technischen Bauteilen er besteht und wie diese im Detail und gemeinsam funktionieren, das wissen nur die Wenigsten. In dieser Broschüre erfahren Sie, wie ein ICE aufgebaut ist und wie die einzelnen Komponenten funktionieren. Danach werden Sie eine Zugfahrt mit ganz anderen Augen betrachten!

**Viel Spaß beim Lesen wünscht das P-Seminar Physik
des Goethe-Gymnasiums Regensburg 2011/2013**

Wussten Sie schon, dass...

- ... der ICE auf manchen Strecken weit über 300 km/h schnell fährt?
- ... ein neuer ICE 3 der Baureihe 407 über 32 Millionen Euro kostet?
- ... in einem ICE 1 ca. 700 Passagiere Sitzplätze finden?
- ... im Jahr 2010 über 78 Millionen Menschen mit dem ICE fahren?
- ... es über 5 Jahre dauert, eine neue ICE-Generation zu entwickeln und zu bauen?
- ... die Leermasse eines ICE 3 (Baureihe 407) 454 Tonnen beträgt?

Kapitel 1

Fahrdynamik
und Aerodynamik



1.1 Fahrdynamik

Eines der besten Beispiele, das jeder kennt, um den Inhalt dieses Kapitels zu erklären, ist das Fahrradfahren. Die Kräfte, die auf den Radfahrer wirken, sind ähnlich wie die, die einen fahrenden Zug beeinflussen. Beim Bergauffahren ist deutlich zu erkennen, dass man hier neben dem Roll- und dem Luftwiderstand auch die Hangabtriebskraft überwinden muss, um vorwärts zu kommen. Bei höheren Geschwindigkeiten erhöht sich der Luftwiderstand, bis man eine Maximalgeschwindigkeit erreicht hat, bei der die persönliche Leistungsgrenze erreicht ist. Den Rollwiderstand merkt man beim Radfahren vor allem bei platten, luftleeren Reifen, man muss viel mehr Kraft aufwenden als bei einem aufgepumpten Reifen.

Die gesamten Widerstandskräfte F_W bei der Fahrt eines Zuges lassen sich in

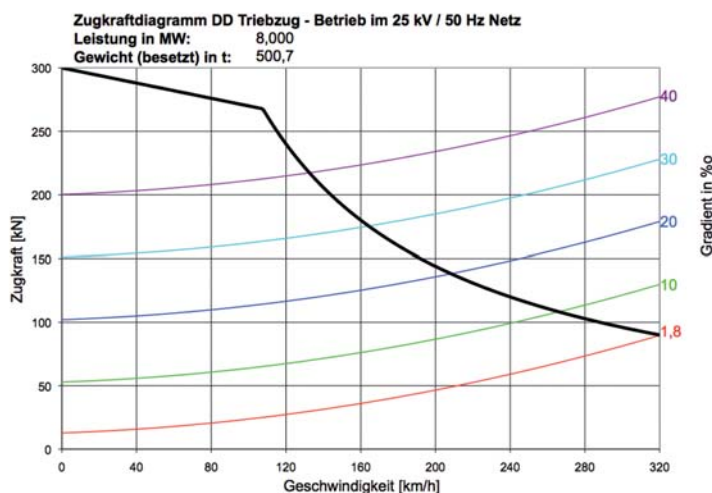
- konstante, d. h. von der Geschwindigkeit v unabhängige (z. B. der Rollwiderstand),
- linear von v abhängige (z. B. aus Sinuslauf und Gleisunebenheiten) und
- quadratisch von v abhängige (z. B. der aerodynamische Widerstand) Faktoren unterteilen:

$$F_W = a + b \cdot v + c \cdot v^2$$

Eine beispielhafte Berechnung dieser Widerstandskräfte ist in Kapitel 4.2, Seite 38, zu finden.

Die maximal mögliche Geschwindigkeit eines Zuges ist erreicht, wenn die Summe dieser Widerstandskräfte F_W genauso groß wird wie die verfügbare Antriebskraft. Diesen Zusammenhang zeigt das F-v-Diagramm (Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm) am Beispiel eines Mehrsystem-ICE 3 (Baureihe 406): An diesem Diagramm kann man die Maximalgeschwindigkeit eines Zuges mit vorgegebener Antriebsleistung bei verschiedenen Steigungen (Gradienten) ablesen.

Die obere schwarze Kurve zeigt, wie die zur Verfügung stehende Kraft der Antriebsmotoren bei konstanter Leistung (dies gilt für den hyperbolischen Teil oberhalb von etwa 105 km/h) von der Fahrgeschwindigkeit abhängt (siehe Kasten unten). Bei Geschwindigkeiten unterhalb von etwa 105 km/h wird die nutzbare Antriebskraft durch die Haftreibung zwischen Rad und Schiene begrenzt. Hieraus resultiert der geradlinige Teil des Kurvenverlaufes. Die farbigen Linien zeigen den Verlauf der Widerstandskräfte F_W für verschiedene Streckensteigungen („Gradienten“). Wo sich diese Linien mit der schwarzen Kurve schneiden, sind jeweils die Antriebskraft und die Summe der Widerstandskräfte gleich groß. An der Lage des Schnittpunktes kann man also die maximal erreichbare Geschwindigkeit unter diesen Bedingungen ablesen. Man sieht, dass bei einem Gradienten von 1,8 ‰ die maximal mögliche Geschwindigkeit 320 km/h beträgt und bei einem Gradienten von 20 ‰ etwa 210 km/h.



Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm eines Mehrsystem-ICE 3

Abhängigkeit der Antriebskraft von der Antriebsleistung und der Geschwindigkeit:

Die Leistung P beschreibt, wie groß die Arbeit W , in diesem Fall die Beschleunigungsarbeit, ist, die in einem bestimmten Zeitintervall Δt verrichtet wird:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$
 Die Arbeit W ist wiederum das Produkt aus der beschleunigenden Kraft und der während der Einwirkung der Kraft zurückgelegten Strecke Δx :

$$W = F \cdot \Delta x$$

Zusammengefasst erhält man:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F \cdot \Delta x}{\Delta t} = F \cdot v \Rightarrow F = \frac{P}{v}$$

P : Antriebsleistung der Motoren;
 F : Zugkraft / Antriebskraft des Zuges;
 v : Geschwindigkeit des Zuges.

Ausgehend von den zu überwindenden Widerständen kann man die für das Erreichen einer bestimmten Maximalgeschwindigkeit notwendige Leistung des Antriebs berechnen. Bezüglich der Antriebsauslegung eines Schienenfahrzeugs spielen also die Fahrwiderstände eine sehr wichtige Rolle. Mit allen diesen Kräften beschäftigt sich die Fahrdynamik, wobei im Gegensatz zur Fahrzeugdynamik die Bewegungen in Richtung der Quer- und Hochachse nicht betrachtet werden. In Bezug auf den ICE ist dieses Fachgebiet ausschlaggebend für die Ermittlung von Geschwindigkeit, Beschleunigung, Energieaufwand, Antriebskräften und Beschleunigungswiderständen sowie Fahrzeugmassen. Die auftretenden Widerstände mit dem größten Einfluss werden im Folgenden erläutert.

Der Neigungswiderstand F_H entsteht, sobald Höhenunterschiede überwunden werden müssen, da dabei ein Teil der Gewichtskraft als Hangabtriebskraft wirkt und der Zug somit bergab gezogen wird. Dies ist ein vergleichsweise großer Widerstand, daher wird beim Bau der Trassen auf einen möglichst ebenen Verlauf geachtet. Man berechnet den Neigungswiderstand mit der Formel:

$$F_H = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Der Rollwiderstand F_R ist bedingt durch die Elastizität der Materialien, die bei Rad und Schiene aufeinandertreffen und durch das Gewicht des Zuges verformt werden. Er ist proportional zum Betrag der Kraft F_N , mit der Rad und Schiene aneinander gedrückt werden. Man berechnet den Rollwiderstand mit folgender Formel:

$$F_R = F_N \cdot c_R$$

F_N ist die Normalkraft, die vom Steigungswinkel der Schienen und der Zugmasse abhängt. Sie wird wie folgt berechnet:

$$F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

Da jedoch bei Zügen nur relativ geringe Steigungen (in der Regel maximal 40‰) zu bewältigen sind, kann man F_N näherungsweise mit der Gewichtskraft F_G gleichsetzen.

c_R ist der sogenannte Rollwiderstandkoeffizient. Er ist hauptsächlich vom Material zweier aufeinandertreffender Flächen und von der Geometrie der Körper abhängig. Bei trockenen Schienen beträgt c_R 0,001 bis 0,004. Dies ist einer der größten Vorteile des Schienenverkehrs gegenüber Autos, bei denen die Gummireifen beim Abrollen zusätzlich noch verformt werden und

somit mehr Energie durch Reibung verloren geht. Bei Autoreifen aus Gummi liegt der c_R -Wert auf Asphalt bei 0,011 bis 0,015. Auch aus diesem Grund, also wegen des sehr geringen Rollwiderstandes, ist der Schienenverkehr heute ein wichtiger Bestandteil unserer Infrastruktur. Der aerodynamische Widerstand wird im Kap. 1.2 ausführlich behandelt.

Ein weiterer wichtiger Widerstand ist der Beschleunigungswiderstand, der durch die Trägheit des Zuges verursacht wird und der beim Beschleunigen überwunden werden muss. Jeder Körper verharrt in seinem Bewegungszustand, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt. Zur Beschleunigung muss also eine Kraft auf den Körper aufgebracht werden, beim Zug ist dies die Antriebs- bzw. Zugkraft.

Ziel ist es, den Energieverbrauch von Schienenfahrzeugen so gering wie möglich zu halten. Die Energieeffizienz beim ICE ist höher als bei anderen Fahrzeugen, so liegt der durchschnittliche Energieverbrauch eines ICE 3 bei 50 % Auslastung im Energieäquivalent bei weniger als 2 Litern Benzin pro Person und 100 km. Dies wird aber nicht nur durch die gute Arbeit auf dem Gebiet der Fahrdynamik erreicht, auch Lokführer helfen Energie zu sparen.

Durch gezieltes Fahrtraining der Lokführer können so allein bei einer Fahrt zwischen Hamburg und München 4.000 Kilowattstunden an Energie, dies entspricht dem Jahresverbrauch einer durchschnittlichen vierköpfigen deutschen Familie, eingespart werden. Das Ziel „zügig anfahren und langsam ausrollen“ wurde bereits 14.000 Lokführern an Fahrsimulatoren und in der Praxis vermittelt. Denn ist der Zug erst einmal beschleunigt, braucht er aufgrund der geringen Rollreibung nur wenig Energie, um die Geschwindigkeit zu halten. Die Ausrüstung der Triebfahrzeuge mit Energiesparrechner und Messeinrichtungen für den Energieverbrauch bieten dem Lokführer eine zusätzliche Unterstützung.



Fotos: DB AG/Andreas Mann 2 x

1.2 Aerodynamik

Da durch einen geringen aerodynamischen Widerstand nicht nur die im Zug zu installierende Leistung (und damit auch das Gewicht), sondern auch der Energieverbrauch sinkt, zählt die Aerodynamik vor allem im Hochgeschwindigkeitsbereich zu einem der wichtigsten Bereiche bei der Planung und Konstruktion neuer Züge. Daneben spielen noch weitere aerodynamische Effekte eine wichtige Rolle für die Auslegung von Hochgeschwindigkeitszügen.



Fotos: DB AG, DB Systemtechnik

Aerodynamischer Widerstand

Der aerodynamische Widerstand (Luftwiderstand) F_L wächst quadratisch mit der Fahrgeschwindigkeit. Auf den fahrenden Zug wirken durch die umgebende Luft Kräfte auf verschiedene Weise ein. Erstens muss der Zugkopf die vor dem Zug befindliche Luft zu den Seiten verdrängen. Die sogenannte Druckwiderstandskraft der Luft wirkt entgegen der Fahrtrichtung und bremst den Zug ab. Zweitens bremst die an der Zugwand vorbeiströmende Luft durch die sogenannte Luftreibung die Fahrt ebenfalls ab (Reibungswiderstand). Drittens gibt es den sogenannten Nachlaufwirbel, der am Heck des Zuges für zusätzliche Verluste verantwortlich ist. Man berechnet den Luftwiderstand F_L mit:

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

Hierbei ist

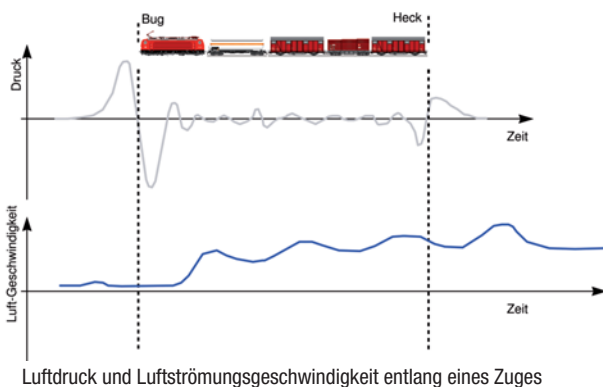
- c_w der sogenannte Luftwiderstandsbeiwert, er ist abhängig von der Form und der Oberflächenbeschaffenheit des Zuges;
- ρ (griechisch: rho) die Dichte der Luft, durch die das Objekt bewegt werden muss;
- A die Querschnittsfläche des Zuges, die senkrecht zur Bewegungsrichtung steht;
- v die Geschwindigkeit des Zuges.

Beim ICE 3 ist der c_w -Wert nicht einfach zu ermitteln, da alle oben genannten Aspekte mit einberechnet werden müssen. Man kommt auf einen Wert von etwa 0,2. Als Vergleich hat beispielsweise der Audi A4 einen c_w -Wert von 0,27 bei jedoch viel geringerer Fahrzeuglänge. Der Luftwiderstand spielt bei Hochgeschwindigkeitszügen eine maßgebliche Rolle. Um diesen und damit auch den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten, werden die Form des Zugkopfes und die Außenwand von Hochgeschwindigkeitszügen möglichst strömungsgünstig gestaltet. Elektrische Baugruppen, die bei Regionalzügen mitunter sichtbar außen am Zug, beispielsweise auf dem Dach, angebracht und so der Luftströmung ausgesetzt sind, werden bei Hochgeschwindigkeitszügen im Innern des Zuges oder hinter aerodynamischen Verkleidungen untergebracht.

Aerodynamische Lasten

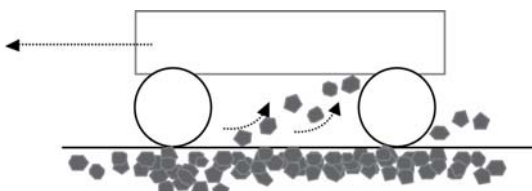
Ein weiterer Teilbereich, den die Aerodynamik beinhaltet, ist die Haltestelleneinfahrt beziehungsweise -vorbeifahrt. Dabei muss darauf geachtet werden, den am Bahnsteig befindlichen Personen keine Unannehmlichkeiten durch übermäßige Druckunterschiede und Luftströmungen zu bescheren. Dies kann unter anderem durch eine günstige aerodynamische Formgebung des Zuges, besonders des Zugkopfes, erreicht werden. Wie bereits erwähnt verdrängt ein Zug auf freier Strecke die durchzufahrene Luft in alle Richtungen. Die vor dem Zug hergeschobene Luftmasse bekommt der Wartende am Bahnsteig als kurzzeitigen Druckstoß bei der Vorbeifahrt des Zugkopfes zu spüren. Je schneller

und aerodynamisch ungünstiger geformt der Zug ist, desto stärker ist diese Einwirkung auf am Bahnsteig befindliche Personen. Ein weiterer Faktor sind die Luftströmungen und -verwirbelungen, die durch die Zugvorbeifahrt entstehen. Damit diese aerodynamischen Lasten nicht zu unangenehm oder gar gefährlich werden, ist es erforderlich, dass Personen immer einen gewissen Abstand zur Bahnsteigkante wahren. Die weiße Linie, die parallel zur Bahnsteigkante in einem festgelegten Abstand auf dem Boden angebracht ist, markiert diesen Sicherheitsabstand.

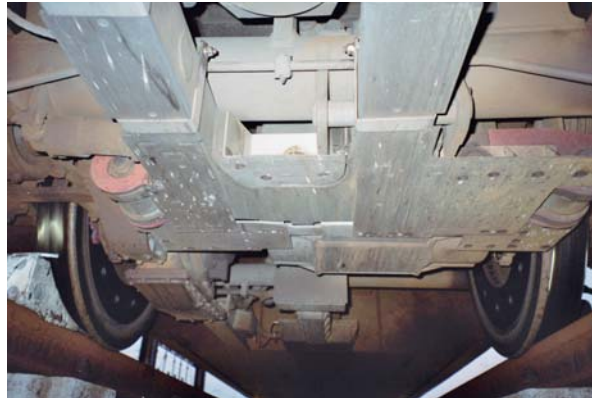


Unterfluraerodynamik/Schotterflug

Aerodynamisch erzeugter Schotterflug, das heißt das Lösen und Umherwirbeln des zwischen den Schwellen im Gleisbett befindlichen Schotters, kann unter Umständen bei Geschwindigkeiten über 250 km/h entstehen. Durch die aufgewirbelten Steine können Schienen und mechanisch empfindliche Teile im Unterbau des ICE beschädigt werden. Der Grund für den Schotterflug ist die vom Zug verdrängte Luft, die auch unter den Zug gedrückt wird und versucht dort geradlinig hindurchzuströmen. Dies gelingt ihr aber im Realfall nicht, denn es entstehen turbulente Verwirbelungen die durch die Unebenheiten des Gleisbetts und des Zugunterbodens zusätzlich verstärkt werden.



Bei sehr hohen Geschwindigkeiten unter besonders ungünstigen Bedingungen führen diese Verwirbelungen dazu, dass Steine aus dem Schotterbett aufgewirbelt werden und den Unterboden des Zuges treffen und möglicherweise beschädigen. Zum Schutz werden Metallverkleidungen im Unterflurbereich sowie Windleitbleche im Bereich des Drehgestells angebracht.



Schutzeinrichtungen gegen Schotterflug

Um aber das Phänomen des Schotterflugs gänzlich unterbinden zu können werden Maßnahmen benötigt, die die stabile Lage der Schottersteine im Gleis gewährleisten. Dies wird beispielsweise durch Verklebung des Schotters mit Hilfe von Epoxidharz, einem sehr stabilen Polyether, oder das sogenannte „Auskehren der Schwellenfächer“ gewährleistet. Durch das Auskehren wird sichergestellt, dass Schottersteine immer rund 5 cm tiefer liegen als die Schwellenoberkanten des Gleises. Die Schwellen aus Beton ertragen die Luftströmung problemlos und verhindern, dass hohe Luftströmungen auf die tiefer liegenden Schottersteine einwirken.



Feste Fahrbahn

Eine andere bereits oft verwendete Methode der Gleisstabilisierung ist die feste Fahrbahn. Dabei wird der Schotter durch Beton oder Asphalt ersetzt. Zusätzlich zu dem Vorteil des Unterbindens des Schotterflugs können bei gleicher Geschwindigkeit aufgrund der besseren Fähigkeit, Querkräften entgegenzuwirken, Kurven mit geringerem Radius durchfahren und die Kurvenüberhöhung gesteigert werden. Beide Bauweisen der Feste Fahrbahn haben in erster Linie den Vorteil niedriger Instandhaltungskosten bei gleichzeitig hoher Stabilität. Die Unterbindung des Schotterflugs ist ein angenehmer Nebeneffekt.



Fotos: DB AG, DB Systemtechnik

Seitenwind

Der Seitenwind ist ein relevantes Sicherheitsthema im Schienenverkehr. Bei hohen Geschwindigkeiten können bedeutende Seiten- und Auftriebskräfte entstehen, die im Extremfall einzelne Waggonen zum Entgleisen bringen könnten. Ein Regelwerk der Deutschen Bahn AG beschreibt, welche Eigenschaften Züge unter Windeinfluss aufweisen müssen. Diese Vorgaben werden anhand eines Modells, das auf dem „worst case scenario“ beruht, ermittelt. Die Hersteller von Zügen müssen dementsprechend Gewichtsverteilung, aerodynamische Form sowie andere Parameter beim Schienenfahrzeugbau beachten.

Neben einer optimierten Fahrzeugkontur des Führungsfahrzeugs ist eine mögliche bauliche Maßnahme die Erhöhung der Masse dieses Fahrzeuges. Ein weiteres Ziel ist es den Schwerpunkt möglichst tief zu positionieren. Daneben kann man die Fahrtgeschwindigkeit an den Wind anpassen, was aber zu Fahrzeitschwankungen führen würde. Zudem wäre es notwendig die bestehenden Windverhältnisse im Voraus zu kennen, um darauf zu reagieren.

Zusätzlich können durch den Bau von Windschutzwänden starke Winde vor dem Erreichen des Zuges abgebremst bzw. abgehalten werden. Bei diesem Lösungsansatz werden Windschutzwände ausschließlich an genau bestimmten Streckenabschnitten mit hohem Windaufkommen (z. B. hohen Talbrücken) aufgebaut. Hinter der Windschutzwand kann der Zug immer sicher vor externen Seitenkräften fahren, wodurch nicht mehr auf die bestehenden Windverhältnisse Rücksicht genommen werden muss.

Druckdichtigkeit/Druckwellenphänomen

Wie unter „aerodynamische Lasten“ schon beschrieben gibt es starke Luftdruckschwankungen, die nicht nur für den am Bahnsteig wartenden Fahrgast, sondern auch bei der Tunnelfahrt - vor allem, wenn sich dort zwei Züge begegnen - für den im Zug Sitzenden unangenehm sein können.

Sobald ein Zug in einen Tunnel einfährt, kann die Luft, die davor in alle Richtungen verdrängt wurde, zu einem Großteil nur noch in Fahrtrichtung „entkommen“. Durch die vor dem Zugkopf aufgestauten Luftmassen entsteht eine Hochdruckzone, die dem Zug mit Schallgeschwindigkeit im Tunnel vorausseilt, am Tunnelende reflektiert wird und mit umgekehrtem Vorzeichen dem Zug wieder entgegenkommt. Dadurch ist der Zug einer wechselnden Druckbeanspruchung ausgesetzt, der die Konstruktion der Wagenkästen, Fenster, Übergänge und Türen angepasst sein muss. Begegnen sich zwei Züge gleichzeitig oder kurz hintereinander in einem Tunnel, so überlagern sich die Luftdruckwellen (Interferenz), was zu deutlich größeren Belastungen führen kann.

Schon einmal bemerkt?

Ein Effekt, der bei schneller Tunnelfahrt in Zügen zu bemerken ist, ist das leichte Eindrücken und Ausbeulen der Wagenkasten-seitenwände. Durch die vor- und zurückeilende Druckwelle wechselt der Druck nicht nur an der Spitze des ICEs, sondern auch an den Wagenkastenseiten, welche dadurch tatsächlich nach innen und außen gedrückt werden können. Optisch wahrnehmbar ist das beim Beobachten des Spaltes zwischen Seitenwand und Armlehne des Fenstersitzes. Wenn man in den Spalt seine Hand einklemmt, spürt man die leichte Verformung der Wand.

Eine besondere Herausforderung bei Druckwechseln im Tunnel müssen die Klimaanlagen beherrschen: Einerseits sollen die Frischluftversorgung und Abluftent-sorgung möglichst ununterbrochen gewährleistet sein, andererseits soll aber die Druckwelle nicht in das Wageninnere übertragen werden. Hierzu werden zwei verschiedene Systeme angewandt, die Bestandteile der Klimaanlage sind: Das sogenannte aktive System nutzt spezielle Ventilatoren, die einen konstanten Luftstrom

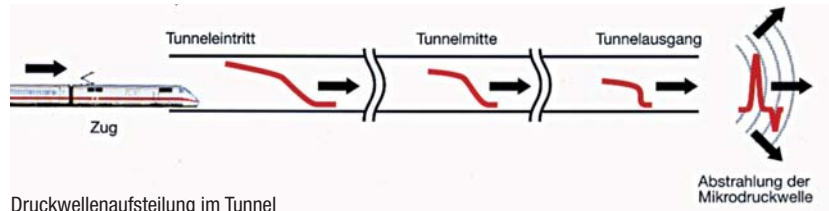
unabhängig vom anliegenden Druckunterschied gewährleisten. Beim passiven System werden die Kabinen durch Klappen im Luftversorgungssystem luftdicht abgeschottet, sobald es zu erheblichen Außendruckunterschieden gegenüber dem Innendruck kommt. Die Klappen werden geöffnet, wenn der Außendruck sich wieder auf einen für den Fahrgast angenehmen Wert eingependelt hat. Dazu ist es aber notwendig, Druckereignisse zeitnah zu erkennen, was durch innere und äußere Sensoren am Zug und eine entsprechende Computersteuerung erfolgt. Normalerweise wird die Druckänderung an der Zugspitze gemessen und die Wagen sofort auf die bevorstehende Veränderung vorbereitet.

Tunnelknalleffekt

Der Tunnelknall ist ein Phänomen, das in seiner akustischen Wahrnehmung einem Überschallknall ähnlich ist und an den Portalen von Tunneln, die mit hoher Geschwindigkeit durchfahren werden, auftreten kann. Wie bereits erwähnt wandert die durch den fahrenden Zug erzeugte Druckwelle mit Schallgeschwindigkeit im



Tunnel hin und zurück. Im hinteren Bereich dieser Druckwelle ist die Geschwindigkeit geringfügig höher als im vorderen Bereich der Druckwelle. Der Grund dafür sind die geringfügig unterschiedlichen Temperaturverhältnisse innerhalb der Druckwellenfront. Durch den niedrigeren Druck im vorderen Teil herrscht dort eine geringere Temperatur als in dem ihr folgendem Bereich und damit eine geringfügig niedrigere Schallgeschwindigkeit. In Folge dessen holt der etwas



Druckwellenaufteilung im Tunnel

wärmere hintere Teil der Druckwellenfront den kälteren vorderen ein, wenn im Tunnel keine hinreichende Dämpfung vorhanden ist. Dadurch kommt es zu einer Aufsteilung der Druckwellenfront. Am der Zugeinfahrt gegenüberliegenden Portal wird beim Eintreffen der Druckwellenfront eine sogenannte Mikrodruckwelle in die Umgebung abgestrahlt. Die Amplitude dieser Mikrodruckwelle hängt direkt von der Steilheit (Druckgradient) der Druckwellenfront im Tunnel ab. Ab einer bestimmten Einfahrtgeschwindigkeit des Zuges und somit einem bestimmten Einfahrtgradienten sowie einem bestimmten Querschnittsverhältnis von Zug zu Tunnel kann am Ende des Tunnels eine hörbare Mikrodruckwelle (Tunnelknall) emittiert werden. Dieser Effekt wird aber nur bei fester Fahrbahn und Tunnelnängen von mehreren Kilometern groß genug, so dass eine hörbare Druckänderung entsteht.

Erstmals trat dieses Problem bei der DB AG bei der 2006 in Betrieb genommenen Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg-Ingolstadt auf. Die feste Fahrbahn führte dazu, dass von den Portalen der beiden längsten Tunnel laute Tunnelknalle abgestrahlt wurden. Durch eine Nachrüstung von Gleisabsorbieren konnte die Aufsteilung der Druckwelle im Tunnel wirkungsvoll gedämpft und damit der Knall verhindert werden.

In Deutschland ist dieser Effekt ansonsten nicht feststellbar, da er sich durch die im internationalen Vergleich recht großen Tunnelquerschnitte der zweigleisigen Strecken und dem Vorhandensein von Schotter in den meisten längeren Tunneln kaum ausbilden kann. Neben dem Einbau von porösem Material im Tunnel, wie beispielsweise Schotter, kann der Anbau von sogenannten Portalhauben vor dem eigentlichen Tunnel mit etwas größerem Durchmesser als der Tunnel und geeignet positionierten Entlüftungsöffnungen den Tunnelknall verhindern. Davon wurde beim neuen Katzenbergtunnel zwischen Freiburg und Basel Gebrauch gemacht.

Kapitel 2

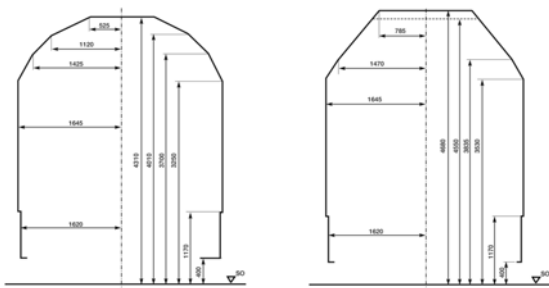
Fahrgastbereich



2.1 Aufbau des Wagenkastens

Die Wagenkästen der ICE-Züge müssen einer Vielzahl von Bedingungen genügen. Dazu gehören Einschränkungen für die Abmessungen, Anforderungen an die verwendeten Materialien und das Verhalten bei einem angenommenen Zusammenstoß. Für den Bau der Wagenkästen gibt es zwei unterschiedliche Technologien. Bei den jüngeren ICE-Generationen wird die sogenannte Integralbauweise eingesetzt.

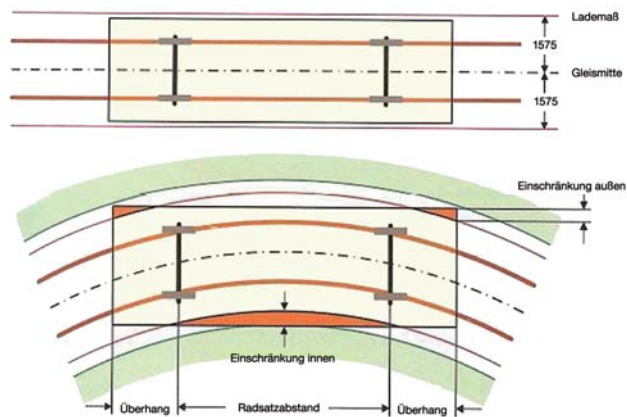
Zum sicheren Fahren dürfen im deutschen Schienenverkehr eingesetzte Fahrzeuge bestimmte Abmessungen nicht überschreiten. Deshalb gibt es für den Aufbau von Wagenkästen bestimmte Regelwerke, die sogenannten Fahrzeugbegrenzungslinien, welche auch für den ICE gelten. Diese sind eine Vorgabe für die Höhe, Breite und Form des Wagenkastens und dürfen nicht überschritten werden. Man unterscheidet zwischen der G1-Begrenzungslinie für international eingesetzte und der G2-Begrenzungslinie für national eingesetzte Fahrzeuge.



Querschnitt des Wagenkastens: Fahrzeugbegrenzungslinien G1 und G2

Diese Fahrzeugbegrenzungslinien sind notwendig, da die Züge sich sonst gegenseitig behindern oder an ortsfeste Objekte anstoßen und schwerwiegende Unfälle passieren könnten. Eine wichtige Einschränkung, die man hierbei beachten muss, ist der Betrieb in Kurven, weil man hierbei auf Teile achten muss, die über den Schienenverlauf hinausragen. Diese sind der Grund, warum bei langen Fahrzeugen oft die Enden des Wagenkastens eingezogen sind und die Fahrzeugbreite sich an der ungünstigsten Stelle in Wagenmitte orientieren muss. Es gab auch schon Entwürfe, bei denen der Grundriss des Wagenkastens der typischen Form eines Knochens ähnelte. Beim Verhalten des Wagenkastens muss man auch die Federung und den Sinuslauf im Gleis (siehe Kapitel 6.2, Seite 57) beachten. Falls die Federung zu weich ist, könnte vor allem im Kurvenbereich ein Fahrzeug des Nachbargleises berührt werden.

Für Fahrzeuge des Fernschnellverkehrs und der Stadtschnellbahnen sind auf bestimmten Strecken Überschreitungen der Maße der Bezugslinien mit besonderer Genehmigung zulässig. Dies gilt beispielsweise für den ICE 1 und den ICE 2 sowie einige S-Bahn-Triebzüge der DB AG.



Ansicht eines Wagenkastens von oben – Einschränkungen an die Abmessungen aufgrund der Kurvendurchfahrt

Materialien und Konstruktionsanforderungen

Die Anforderungen an die Materialien, die beim ICE für Wagenkästen verwendet werden, sind hoch. Sie müssen ein geringes Gewicht haben, einfach und günstig zu fertigen sein, eine gute Korrosionsbeständigkeit und hohe Festigkeit besitzen sowie leicht zu reparieren sein. Die Konstruktion muss die Vorschriften des „Crash“-Verhaltens (siehe Kasten nächste Seite) einhalten. Außerdem muss sie die erforderliche Steifigkeit, günstige Schwingungseigenschaften und eine hohe Druckfestigkeit sowie Druckdichtigkeit für Tunnelfahrten (siehe Kapitel 1.2, Seite 16) aufweisen. Deshalb verwendet man Materialien, die diesen Anforderungen entsprechen und zudem noch einfach und kostengünstig herzustellen und zu verarbeiten sind. Man nutzt Stahl, Aluminium und glasfaserverstärkte Kunststoffe, die durch Schweißen oder Kleben zusammengefügt werden.

Crashbedingungen

Bei einem Frontalaufprall muss, laut europäischer Norm, die mechanische Struktur des Fahrzeugs den Führerstand und die Fahrgastbereiche optimal schützen und die Energie des Aufpralls in einer kontrollierten Verformung absorbieren sowie die auftretenden Beschleunigungen begrenzen. Dies erreicht man am besten, indem man harte und weiche Zonen einrichtet. So ist beispielsweise der Überlebensraum des Lokführers durch einen stabilen Führerraum gewährleistet. Es müssen folgende Crash-Szenarien vom Fahrzeug beherrscht werden:

1. Frontalzusammenstoß von 2 identischen Zügen mit einer Relativgeschwindigkeit von 36 km/h;

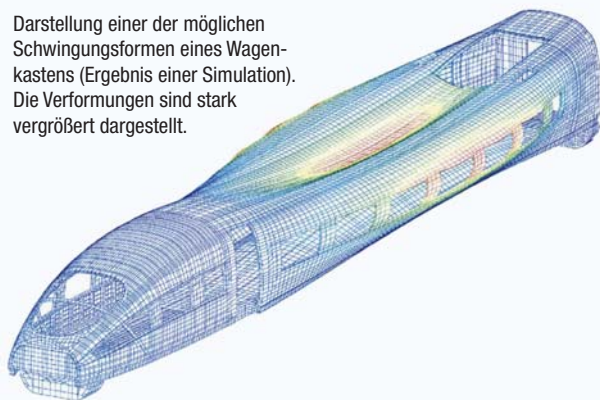
2. Frontalzusammenstoß mit einem 80 t-Fahrzeug und Seitenpuffern mit einer Relativgeschwindigkeit von 36 km/h;
3. Frontalzusammenstoß mit schwerem Hindernis (15 t) wie z. B. einem LKW auf einem Bahnübergang mit einer Geschwindigkeit von 110 km/h;
4. Frontalzusammenstoß mit niedrigem Hindernis, wie z. B. einem PKW (1 t) oder mit Tieren.

Durch den Einbau von Energieverzehrelementen werden die Verformungen des Wagenkastens und die Beschleunigung auf das zulässige Maß verringert. Durch Versuche und Simulationen wird das Crashverhalten untersucht und optimiert.

Schwingungen des Wagenkastens:

Die Schwingungen von Wagenkästen und ihrer einzelnen Elemente wie Dächer oder Außenwände sind nicht zu unterschätzen, da sie sich im Fahrkomfort deutlich negativ bemerkbar machen können. Je nach Anregung machen sie sich bei bestimmten Geschwindigkeiten, Weichen durchfahrten und beim Einfahren in Tunnelabschnitte bemerkbar. Um all diese Schwingungen so gering wie möglich zu halten werden die Schwingungsbewegungen zunächst an einem Computermodell simuliert. Anschließend wird ein richtiger Wagenkasten zum Schwingen gebracht, um dann mit den erhaltenen Werten im Computermodell weiterzurechnen. Dieser Prozess wird mehrmals bis zur Perfektion wiederholt.

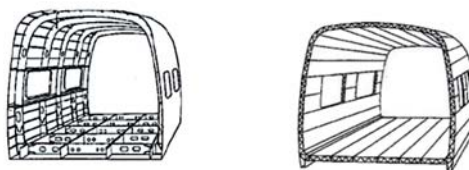
Darstellung einer der möglichen Schwingungsformen eines Wagenkastens (Ergebnis einer Simulation). Die Verformungen sind stark vergrößert dargestellt.



Bauweisen im Vergleich

Differentialbauweise (klassisch)

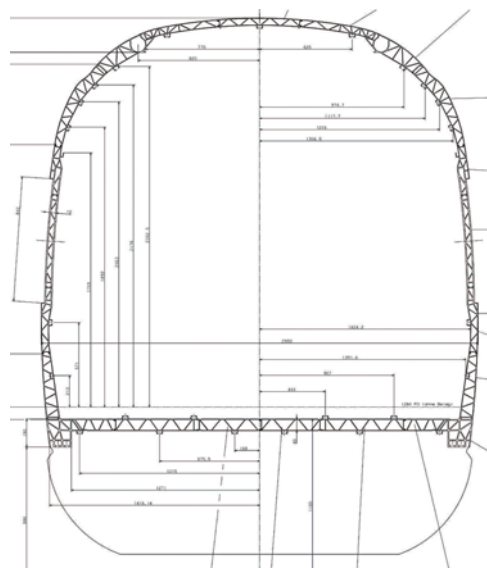
Bei der Differentialbauweise wird erst ein grobes Skelett aus Stahl oder Aluminium gefertigt, an dem dann Bleche aus dem jeweils gleichen Werkstoff aufgeschweißt werden. Dies bewirkt eine Trennung der tragenden und der verschalenden Funktion. Vorteilhaft ist daran die höhere Flexibilität bezüglich einer an den örtlichen Kraftverlauf angepassten Konstruktion. Jedoch hat man bei höheren Stückzahlen auch einen hohen Fertigungsaufwand als Nachteil. Diese Bauweise wurde bei den Mittelwagen des ICE 1 mit Aluminium verwendet. Die Wagenkästen der zukünftigen ICx-Züge werden in Stahl-Differentialbauweise gefertigt

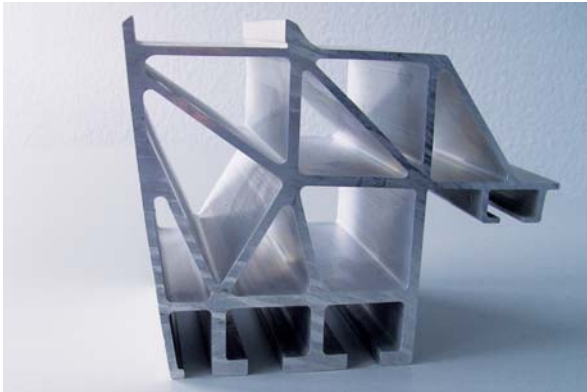


Differentialbauweise und Integralbauweise

Integralbauweise (heute vorherrschend)

Bei neueren Fahrzeugen wird meist die Integralbauweise verwendet. Hierbei besteht der Aufbau des Wagenkastens aus einzelnen Aluminium-Strangpressprofilen, wodurch eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht erzielt wird. Dabei wird die tragende und verschalende Funktion vereinigt.





Bei der Integralbauweise werden aus Aluminium einzelne Profile gepresst, welche sich meist über die gesamte Länge des Wagenkastens erstrecken und mehrere Millimeter dick sind. Die Profile sind innen hohl und haben Querstreben, von denen die meisten im Zick-Zack angeordnet sind. Der Hohlraum innerhalb der Profile wird teilweise zur Verlegung von Kabeln oder anderen Leitungen verwendet.

Die einzelnen Aluminium-Strangpressprofile werden aneinander gesteckt und verschweißt. Dabei wird durch die besondere Formgebung der Profile der Vorrichtungs Aufwand deutlich verringert, indem sich die Profile beim Zusammenstecken formschlüssig verbinden. Türen und Fenster werden vor dem Schweißen grob ausgespart und anschließend auf das Sollmaß gefräst. Da die Schweißnähte wegen der geringeren Festigkeit gegenüber dem Grundmaterial Schwachstellen im Aufbau des Wagenkastens darstellen, werden sehr große Profile bevorzugt und damit die Zahl der Schweißnähte erheblich reduziert.

Aus den Aluminium-Strangpressprofilen setzen sich sowohl Seitenwände als auch Bodenplatte und Dach zusammen. Bei der Bodenplatte werden zusätzlich noch Längs- und Querträger sowie Kopfstücke zur Stabilisierung verwendet. Vorteile der Integralbauweise sind die hohe Steifigkeit und die niedrigen Kosten, vor allem bei großen Stückzahlen. Ein Nachteil ist die geringe Flexibilität bezüglich der Anpassung der Konstruktion an den örtlichen Kraftverlauf. Alle ICE-Wagen ab den Mittelwagen des ICE 2 sind in der Integralbauweise gefertigt.

Radsatzlast/Meterlast und Streckenklassen

Die zulässige Masse von Schienenfahrzeugen muss mit der Tragfähigkeit des Schienenweges abgestimmt werden. Deshalb ist das Streckennetz in unterschiedliche Streckenklassen eingeteilt. Dazu dienen folgende Größen:

Die Radsatzlast (Achslast) ist das Verhältnis aus dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs und der Anzahl seiner Radsätze.

Die Meterlast ist das Verhältnis aus dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs und der Fahrzeuiglänge.

Für die Kennzeichnung der Streckenklassen werden die Großbuchstaben A bis D zur Angabe der Radsatzlast und die Ziffern 1 bis 4 zur Angabe der Meterlast verwendet. Es werden aber dabei nicht alle möglichen Buchstaben-Zahlen Kombinationen genutzt.

Streckenklasse	Radsatzlast	Meterlast
A	16,0 t	5,0 t/m
B1	18,0 t	5,0 t/m
B2		6,4 t/m
C2	20,0 t	6,4 t/m
C3		7,2 t/m
C4		8,0 t/m
D2	22,5 t	6,4 t/m
D3		7,2 t/m
D4		8,0 t/m



Fotos: DB AG/Jürgen Hörstel, DB Systemtechnik

2.2 Inneneinrichtung

Der Komfort der Reisenden spielt eine entscheidende Rolle bei der Einrichtung eines Wagens. Dazu gehören Sitzkomfort, die Möglichkeit zum entspannten Reisen ebenso wie zum Arbeiten während der Reise sowie das Fahrgastinformationssystem.

Anzahl der Sitzplätze

Die Anzahl der Sitzplätze hängt in erster Linie von der Länge des Zuges bzw. von der Anzahl der Wagen ab. Für die erste Bauserie des ICE 3 betrug sie bei vier Zweite-Klasse-Wagen und drei Erste-Klasse-Wagen ursprünglich insgesamt 416 Sitzplätze. Der in dieser Zahl schon mit einbezogene Speise- bzw. Restaurantwagen beinhaltet 24 Sitzplätze. Die Anzahl der Sitzplätze wurde später durch einen Umbau auf 441 erhöht, wovon 12 im Speisewagen zu finden sind. Ferner wurde ein 1. Klasse-Wagen in einen 2. Klasse-Wagen umgebaut.

Aufteilung der Sitzplätze

Zwei wichtige Prinzipien spielen beim Anordnen von Sitzplätzen eine große Rolle: es sind „entspanntes Reisen“ sowie „konzentriertes Arbeiten“ während der Reise. Für das entspannte Reisen wurden vorwiegend 2er-Sitzplätze in Reihenanordnung gewählt, da hier

genug Platz vorhanden ist, um sich bequem niederzulassen. Für das konzentrierte Arbeiten stellten sich 4er- oder 2er-Sitzplätze mit Tisch, auch Vis-a-Vis-Sitzplatzanordnung genannt, am geeignetsten heraus. Auf den Tischen ist ausreichend Raum um einen Laptop aufzustellen oder in einem Ordner zu arbeiten. In der folgenden Abbildung kann man verschiedene Sitzplatzanordnungen erkennen.

Komfort am Sitzplatz und Ausstattung

Die Sitze in Reihenanordnung bieten durch Einstellmöglichkeiten und den im Vergleich zu Reisebussen großen Sitzabstand idealen Komfort, um eine Reise zu genießen. Dieser Sitzabstand zwischen der Befestigung des vorderen Sitzes und der Befestigung des nächsten Sitzes beträgt in der 2. Klasse 920 mm und in der 1. Klasse 1010 mm. Der Vergleichswert für einen Reisebus beträgt ca. 740-850 mm.

ICE BR 403, 1. Serie

1. Kl.-Endwagen
(Apmzf 403.0)
Nr. 29/39



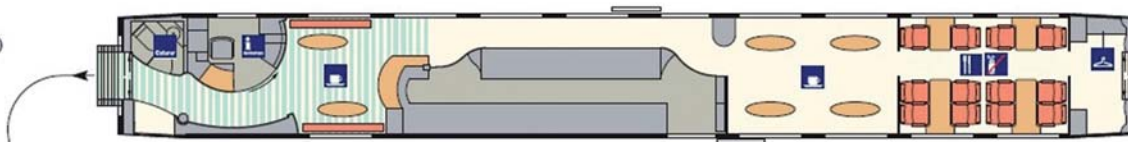
1. Kl.-Wagen
(Avmz 403.1)
Nr. 28/38



2. Kl.-Wagen
(Bvmz 403.2)
Nr. 27/37



Bordbistro
(BRmz 403.3)
Nr. 26/36



An diesen Sitzen sind kleine klappbare Tische installiert, die genug Platz bieten um kleinere Sachen abzulegen, aber auch zum Arbeiten genutzt werden können. Ebenso wurde der Multimedia-Aspekt berücksichtigt. An jedem Sitzplatz im ICE 3 gibt es eine Steckdose um z. B. Handy oder Laptop aufzuladen. Natürlich kann man im ICE mit handelsüblichen Kopfhörern, die auch im BordBistro zu erwerben sind, vier verschiedene Audioprogramme (Klassik/Jazz, Rock/Pop, Kinderprogramm, Literaturprogramm) anhören. Manchmal ist es sogar möglich, Radiosender der Regionen anzuhören, die gerade durchfahren werden. In den Restaurantwagen werden jahres- und tageszeitabhängige Mahlzeiten angeboten. Diese Wagen bieten erhöhten Komfort, und für einen kurzen Imbiss sind auch Stehtische vorhanden.



In allen ICEs gibt es Handybereiche, in denen es erlaubt ist zu telefonieren. Hier ist der Handyempfang durch die angebrachten Handyrepeater, d. h. spezielle Signalverstärker, optimiert. Außerdem gibt es ausgewiesene Ruhebereiche zur Entspannung, in denen laute Gespräche und Telefonieren nicht erwünscht sind. Die Deutsche Bahn stellt in Zusammenarbeit mit der Telekom in den meisten ICE-Zügen W-LAN-Zugänge zur Verfügung, um während der Reise in den Zügen auch das Internet nutzen zu können. Durch die hervorragende Schalldichtigkeit der Wagen ist ein entspanntes Reisen gewährleistet. Leise Gespräche können ungestört geführt werden und konzentriertes Arbeiten ist in dieser ruhigen Umgebung ebenfalls sehr gut möglich. Die Wagendecken, sogenannte Lochdecken, sind so konstruiert, dass Schall bestmöglich absorbiert, d. h. "geschluckt" wird und somit die Lautstärke gedämpft ist.



Ruhebereich, Telefonieren ist hier nicht erwünscht.
Rauchverbot herrscht in allen Zügen der DB.

Fahrgastinformationssystem

Das Fahrgastinformationssystem setzt sich aus verschiedenen Teilbereichen zusammen: der akustischen und der optischen Information der Fahrgäste und dem Unterhaltungsangebot.

Die akustischen und optischen Informationen sollen dem Fahrgast die Reise erleichtern. Beispielsweise sieht man kurz vor einem Haltepunkt auf den Displays eine Laufschrift, die anzeigt, wie der Haltepunkt/Bahnhof heißt und auf welcher Seite des Zuges man aussteigen muss. Man hört ebenfalls eine Durchsage, die Informationen zum Haltepunkt und zu Anschlussmöglichkeiten beinhaltet. Andere Durchsagen weisen auf das Serviceangebot im Speisewagen hin. Der Aspekt der Unterhaltung umfasst u. a. die oben genannten Audioprogramme.

Auch zur Sitzplatzreservierung wird das Fahrgastinformationssystem benutzt. An den Sitzplätzen gibt es Displays, auf denen man sehen kann, ob die Plätze für bestimmte Streckenabschnitte reserviert wurden. Diese Reservierungsanzeigen werden vor der Abfahrt des Zuges mit Daten gespeist und dann jeweils 15 Minuten nach einem Zughalt aktualisiert. Die Reservierung erfolgt sowohl am Ticketschalter oder -automaten wie auch online und kann auch über Handys abgewickelt werden. Hierbei ist die gezielte Entscheidung zwischen Sitzplatz in Reihenordnung oder Vis-a-vis mit Tisch, zwischen Fenster- und Gangplätzen, zwischen Ruhe- und Arbeitszonen sowie zwischen Großraum und Abteil möglich.

2.3 Klimatechnik

Um die zwei gegenwärtig bei der Deutschen Bahn benutzten Arten von Klimaanlage richtig erklären zu können, ist es wichtig, zuvor den Joule-Thomson-Effekt und die Eigenschaften von Kältemitteln zu erläutern. Außerdem sollen die Anforderungen an eine Klimaanlage dargestellt und die Umsetzung im ICE beschrieben werden.

Physikalische Grundlagen

Der Joule-Thomson-Effekt tritt auf, wenn ein Gas gedrosselt, d. h. wenn der Druck vermindert wird. Dadurch wird eine Expansion des Gases hervorgerufen, die mit der Erhöhung des gegenseitigen Abstands der Teilchen verbunden ist. Dies muss gegen die anziehenden Kräfte zwischen den Molekülen geschehen. Dadurch sinkt die kinetische Energie der Teilchen und somit auch die Temperatur, welche ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen ist.

Von entscheidender Bedeutung für viele Kältemaschinen ist ein weiterer physikalischer Effekt: Der Siedepunkt einer Flüssigkeit hängt entscheidend von Druck dieser Flüssigkeit ab. Je höher dieser Druck ist, desto höher ist der Siedepunkt. Nur deswegen kann ein Kältemittel beispielsweise trotz einer Temperatur von 100 °C kondensieren, wenn bei genügend hohem Druck sein Siedepunkt über 100 °C liegt. Dabei wird dann im Kondensator der Klimaanlage die Energie an die Außenluft abgegeben. Auch in der zweiten wesentlichen Komponente einer Klimaanlage, dem Verdampfer, ist dies wichtig, da dort das Kältemittel trotz einer Temperatur von beispielsweise 8 °C verdampfen kann und dabei dem Innenraum Energie entzieht, weil bei dem dort herrschenden niedrigen Druck der Siedepunkt unter 8 °C liegt.

Eigenschaften von Kältemitteln

Eine der wichtigsten Eigenschaften von Kältemitteln ist eine große spezifische Verdampfungswärme, auch Verdampfungsenthalpie genannt. Das ist die Energie, die nötig ist um eine Substanz bei gleichbleibendem Druck und gleichbleibender Temperatur vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu bringen. Des Weiteren sollte ein Kältemittel auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Diese gibt an, wie groß das Vermögen eines Festkörpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases ist, um mittels Wärmeleitung thermische Energie zu transportieren. Ein hoher Wärmeübergangskoeffizient, der die Stärke des Wärmetransports durch eine bestimmte Fläche angibt, ist ebenso wichtig wie die Tatsache, dass ein Kältemittel nicht brennbar, explosiv oder giftig sein darf. Wichtig ist auch die Umweltfreundlichkeit, d. h. das Kältemittel sollte nicht zum Treibhauseffekt beitragen und Ozon nicht abbauen.

Kaltdampfklimatechnik

In einem sich ständig wiederholenden Kreislauf saugt der Kompressor gasförmiges Kältemittel aus dem Verdampfer ab und verdichtet es. Dadurch kommt es zu einer Temperaturerhöhung (70°-100°), und der Siedepunkt des Kältemittels steigt so weit, dass es bei thermischem Kontakt mit der kälteren Außenluft kondensiert. Dieses Kältemittel wird durch den Verflüssiger (Kondensator) gedrückt und kondensiert (geht vom gasförmigen in den flüssigen Zustand über). Die dabei freiwerdende Wärme, auch Kondensationswärme genannt, wird mit Hilfe eines Ventilators an die Außenluft abgegeben. Als Folge kühlt das Kältemittel wieder auf etwa 60° ab. Zwischen diesen und den nächsten Schritt wird ein Filter geschaltet, der Schmutz und Feuchtigkeit beseitigt. Dazu gehört auch ein Hochdruckwächter, der das System überwacht, um es im Notfall abschalten zu können.

Hierauf folgt ein Expansionsventil, das den Druck des Kältemittels erheblich sinken lässt. Dabei sinkt sein Siedepunkt unter die Temperatur des Wageninneren. Danach fließt es in den Verdampfer, der als Wärmeübertrager fungiert, d. h. das Kältemittel verdampft (Übergang flüssig zu gasförmig). Dafür wird Wärme benötigt, die der Umgebung (Zuluft für den Fahrgastraum) entzogen wird. Somit wird das Fahrzeuginnere gekühlt. Dieses Prinzip kann man auch beim heimischen Kühlschrank erkennen. Der Umgebung entspricht hier das Zimmer und dem Wagen bzw. dem Wageninneren der Kühlschrank. Die obere Abbildung auf Seite 25 zeigt anschaulich das Prinzip.

Luftgestützte Klimaanlage

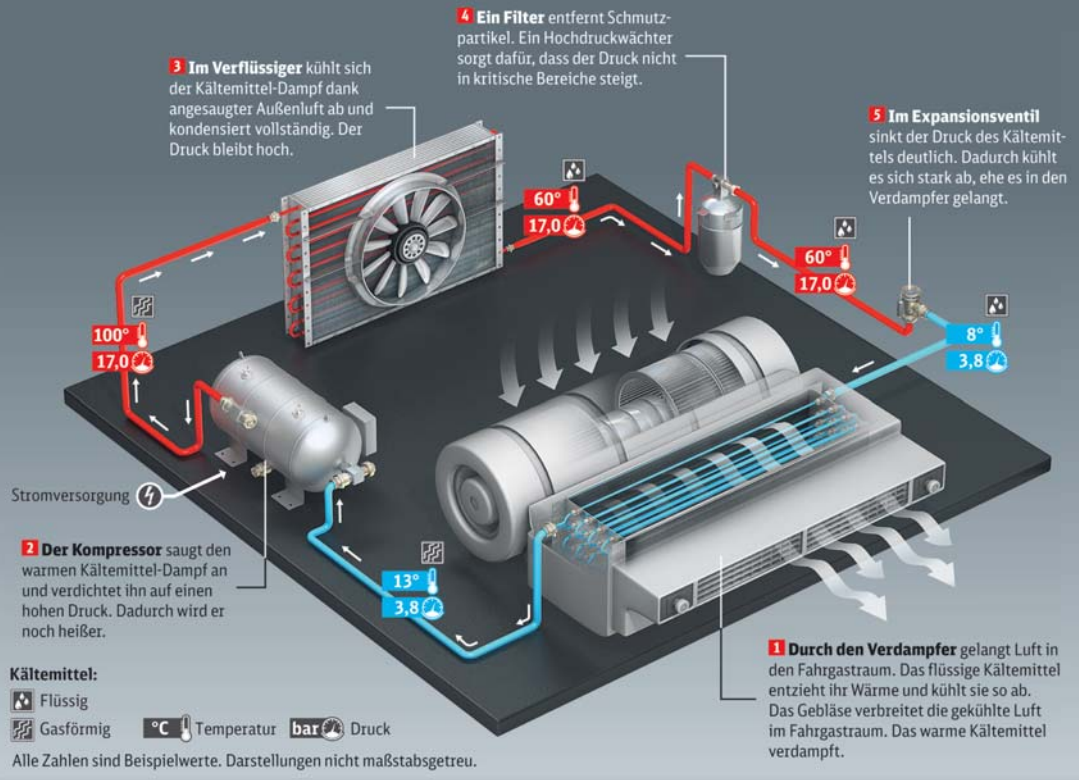
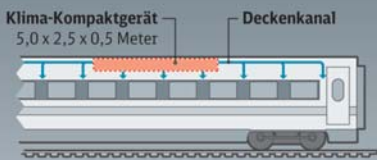
Die untere Abbildung zeigt die luftgestützte Klimaanlage, die im ICE 3 in der 2. Bauserie verbaut ist. Sie hat ungefähr einen Anteil von 5% an den Klimaanlagen der ICE-Flotte. Als erstes wird Außenluft aus der Umgebung angesaugt und als sogenannte Prozessluft der Kühlturbine, dem Axialverdichter, zugeführt. Der Druck dieser Prozessluft wird nun in der Kühlturbine von circa 1 bar auf 0,5 bar abgesenkt. Dabei kühlt sich die Luft ab (Joule-Thomson-Effekt). Diese kalte Prozessluft kommt nun in den Wärmetauscher, in dem sie die Zuluft für den Fahrgastraum kühlt.

Kaldampfklimateanlage

Die Kaldampfklimateanlage ist im überwiegenden Teil der Schienenfahrzeuge der Deutschen Bahn, wie zum Beispiel im ICE 1 und im ICE 2, verbaut.

Ein chemisches Kältemittel zirkuliert in einem geschlossenen Röhrensystem. Je nach Druck und Temperatur ist es flüssig oder gasförmig. Beim Übergang von einem Zustand zum anderen nimmt es Energie auf oder gibt sie ab. Diesen physikalischen Effekt nutzt die Anlage zum Kühlen der Luft im Fahrgastraum.

Kompaktgeräte enthalten alle dargestellten Komponenten der Klimateanlage. Die kalte Luft strömt von oben in den Fahrgastraum.



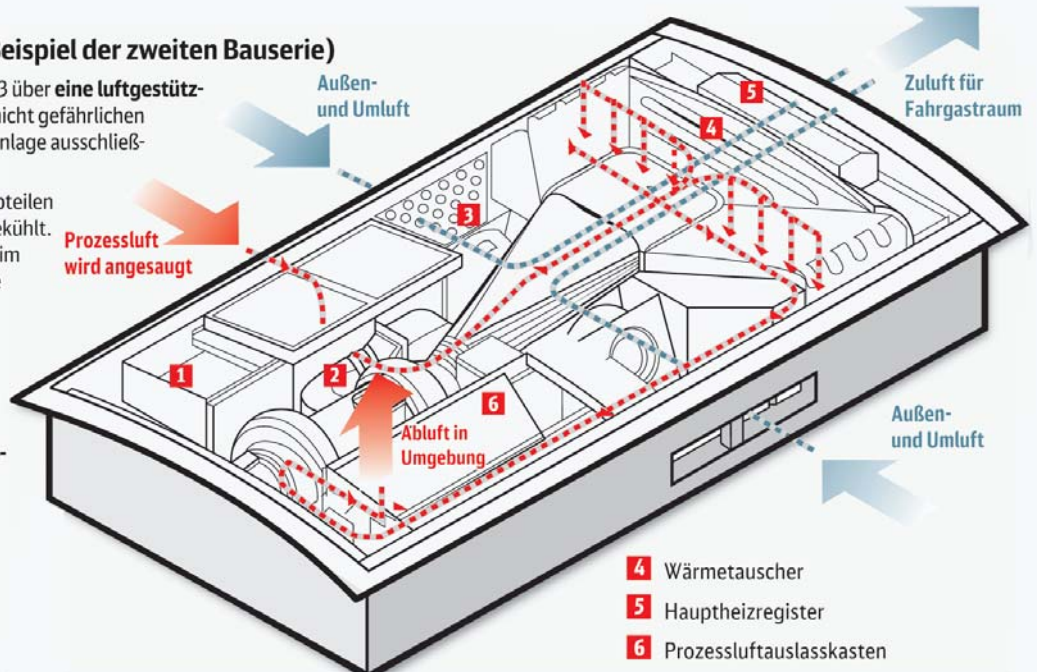
Luftgestützte Klimateanlage

Schemazeichnung einer luftgestützten Klimateanlage mit Erläuterung der Arbeitsweise

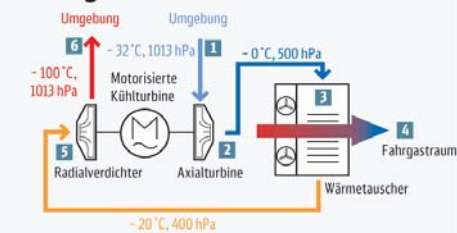
Das Klimakompaktgerät (am Beispiel der zweiten Bauserie)

- Als erster Zug weltweit verfügt der ICE 3 über eine luftgestützte Klimateanlage. Statt der für die Ozonschicht gefährlichen Kältemittel FCKW und FKW arbeitet die Anlage ausschließlich mit Luft als Kältemittel.
- Dazu wird Luft von außen und in den Abteilen angesaugt und in einer Kühlturbine abgekühlt. Diese kalte so genannte Prozessluft kühlt im Bedarfsfall über einen Wärmetauscher die Zuluft für den Fahrgastraum.
- Anschließend wird die Prozessluft in einem so genannten Radialverdichter wieder komprimiert und als warme Abluft nach außen abgegeben.
- Im Heizbetrieb ist der Kältekreis abgeschaltet, die Zuluft für den Fahrgastraum wird über das Hauptheizregister erwärmt.

- 1 Prozesslufteinlasskasten
- 2 Radialverdichter
- 3 Zuluftlüfter



Kühlung mit Luft als Kältemittel



- 1 Ansaugen der Prozessluft aus der Umgebung
- 2 Entspannung und damit verbundene Abkühlung der Prozessluft in der motorisierten Kühlturbine
- 3 Kalte Prozessluft kühlt Zuluft für den Fahrgastraum im Wärmetauscher
- 4 Gekühlte Zuluft wird in den Fahrgastraum geleitet
- 5 Verdichtung der Prozessluft auf Umgebungsdruck und damit verbundene Erwärmung im Verdichter der motorisierten Kühlturbine
- 6 Abgabe der Abwärme durch Ausblasen der warmen Prozessluft in die Umgebung

Vorteile

- umweltfreundlicher, da keine umweltschädlichen Kältemittel benötigt werden
- bessere Regelbarkeit im Teillastbereich, dadurch geringerer Energieverbrauch in diesem Bereich
- einfachere Instandhaltung, da kein Kältemittel eingefüllt und abgesaugt werden muss

Nachteile

- höherer Energiebedarf im Vollastbereich aufgrund des schlechteren Wirkungsgrads bei Verwendung von Luft als "Kältemittel"
- höhere Ersatzteilkosten, da teure Turbomaschinen eingesetzt werden

Hierauf wird die Prozessluft in einer zweiten Turbine, dem Radialverdichter, wieder auf den Luftdruck der Umgebung verdichtet, um sie problemlos in die Umgebung abgeben zu können. Dies ist wichtig, da ansonsten Probleme mit dem Außendruck auftreten. Bei der Verdichtung wird die Luft wieder erwärmt. Die entstandene Abwärme wird einfach durch Ausblasen der Luft in die Umgebung abgegeben.

Betrieb bei niedrigen Außentemperaturen

Der Energiebedarf (vgl. Kapitel 3.1, Seite 29) erfordert eine sehr detaillierte Betrachtung, da der Jahresenergieverbrauch in erster Linie von der Klimaanlage selbst und deren Nutzung, aber auch von zahlreichen Parametern (Außentemperatur, Außenluftfeuchte, gewünschte Innentemperatur, Personenanzahl im Zug etc.) abhängt. Die Klimaanlage ist nach der Traktion, d. h. dem Antrieb und den Hilfsbetrieben der drittgrößte Verbraucher im ICE.

Anforderungen an die Klimatisierung

→ Lufttemperaturen

Die Regelung der Lufttemperatur erfolgt mittels Außen- und Innentemperaturfühlern, deren Messwerte von einem Klimarechner verarbeitet werden. Die daraus berechnete Solltemperatur im Fahrgastraum kann zusätzlich entweder vom Zugbegleiterabteil aus oder direkt im Fahrgastraum über Temperaturstellvorrichtungen in engen Grenzen verstellt werden. Die Soll-Temperaturen sind abhängig von der Außentemperatur, da diese das Wärmeempfinden eines Menschen beeinflusst. Beispielsweise will man im Sommer bei einer Außentemperatur von 30° Celsius nicht in einen Zug einsteigen, bei dem die Temperatur so heruntergekühlt wird, dass man im Inneren des Zuges auf Grund des großen Temperaturunterschieds friert. Die Leistung der Klimaanlage muss darüber hinaus auch an die Wärme-

abgabe der einzelnen Personen angepasst werden. Die Temperaturen, die eingestellt werden, betragen je nach Situation normalerweise 22-27° C.

→ Druckkomfort

Bei Tunneldurchfahrten oder Zugbegegnungen können rasche Außendruckänderungen auftreten (vgl. Kapitel 1.2, Seite 17). Da aber die Vermeidung von Druckänderungen im Inneren ein ausschlaggebender Faktor für das Wohlbefinden des Fahrgastes ist, ist die Druckdichtigkeit des Zuges wichtig, um Komfort zu gewährleisten. Aus diesem Grund, aber auch aus Sicherheitsgründen, kann man die Fenster im ICE nicht öffnen. Ebenso wichtig ist es, die Klimaanlage mit Druckschutzkomponenten auszustatten, da die Klimaanlage die Luft aus der Umgebung ansaugt und auch dorthin wieder ausbläst.

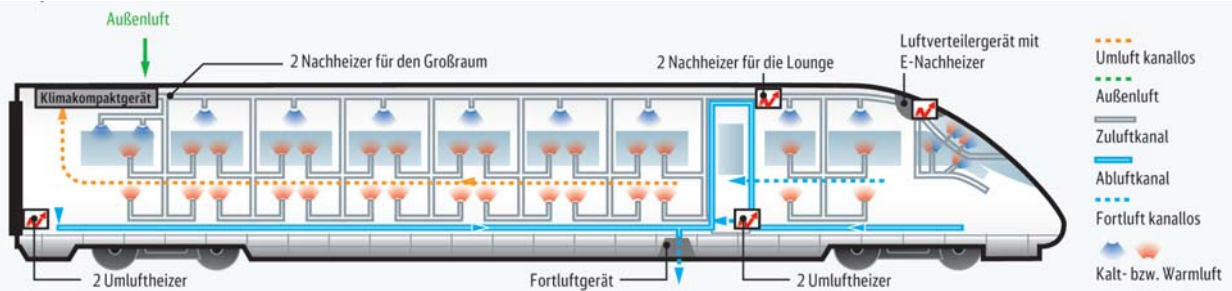
→ Luftgeschwindigkeiten

Da die Klimageräte die kalte Luft so schnell wie möglich zum Fahrgast transportieren sollen, diesen aber auch nicht durch hohe Luftgeschwindigkeiten, die man z. B. bei der Autoklimaanlage gut fühlen kann, wenn man die Hand über das Gebläse hält, stören sollen, wird die Luftzufuhr auf viele kleine Luftaustrittsöffnungen verteilt, die entweder neben bzw. unter den Sitzen oder in der Decke angeordnet sind. Die normale Luftgeschwindigkeit beträgt ungefähr 0,2 m/s. Diese wird aber von der Klimaanlage beeinflusst. Durch Änderung der Drehzahl der Zulufter kann die Zuluftmenge verändert werden. Da sich bei höherer Zuluftmenge aber die Zuluftkanäle nicht verändern, strömt die Zuluft somit schneller durch die Kanäle. Je höher die Temperaturen, desto höhere Luftgeschwindigkeiten werden vom Fahrgast noch als angenehm empfunden (zum Beispiel werden bei über 25° sogar 0,9 m/s oder mehr als angenehm angesehen).

Umsetzung im ICE

Das Luftverteilsystem

- Der aus Um- und Außenluft zusammengesetzte Zuluftstrom wird über Decken- und Seitenkanäle in den Fahrgastraum geleitet.
- Im Kühlbetrieb wird die Luft überwiegend über die Deckenauslässe eingeleitet; im Heizbetrieb über die Auslässe im Fußboden.



→ Luftfeuchte

Die Luftfeuchte wird indirekt durch die Klimaanlage beeinflusst. Bei Abkühlung der Luft durch Klimageräte steigt die relative Luftfeuchte (da kühlere Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann). Der Mensch benötigt eine Mindestluftfeuchte von etwa 15-20 % und einen Wassergehalt von unter 12 g/kg. Bei niedriger Luftfeuchte treten Atem- und Augenreizung auf. Bei höherem Wassergehalt wird das Klima als schwül empfunden und der Fahrgast fühlt sich unwohl.

→ CO₂-Gehalt

Da im ICE viele Menschen auf relativ kleinem Raum reisen, muss die Klimaanlage zusätzlich für eine gute Luftqualität sorgen. Da aber die Klimaanlage stets frische Außenluft ansaugt und die "alte" Luft ausbläst, ist im Inneren des Zuges für frische Luft gesorgt. Bei der Kalt dampf- und der luftgestützten Klimaanlage funktioniert das Ansaugen der Frischluft unabhängig von der Heiz- bzw. Kühlfunktion.

Die Klimaanlage ist vorwiegend im Dachbereich des Zuges angebracht. Ausnahmen sind zum Beispiel der ICE 1 und der ICE 2, bei denen die Klimaanlage teilweise unterflur, d. h. unter dem Fahrgastraum und teilweise im Dach angebracht wurde (Splitanlage). Teile des elektrischen Bordnetzes, die zur Energieversorgung der Klimaanlagen nötig sind (z. B. Wechselrichter), können auch im Klimagerät selbst angeordnet sein. Die Luftführung für den Fahrgastraum ist von dieser Anordnung unabhängig. Bei der Luftzuführung mittels Luftkanälen für den Fahrgastraum ist aber der Ort der Lufteinbringung sehr wichtig. Im Heizfall, also wenn die Luft von der Klimaanlage erwärmt werden muss, wird die Luft von unten in den Fahrgastraum eingeleitet, da warme Luft nach oben steigt und so für eine möglichst optimale Temperaturschichtung im Wagen gesorgt wird. Im Kühlfall, also wenn die Zuluft abgekühlt wird, strömt diese möglichst von oben, im ICE durch die sogenannte Lochdecke, in den Fahrgastraum. Eine sogenannte Heizen-/Kühlenklappe im Kanalsystem oder in der Klimaanlage sorgt dabei für den richtigen Luftweg. Diese Klappe wird ebenfalls vom Klimarechner angesteuert.

Die Ausfälle der Klimaanlagen in den ICE 2-Zügen im Sommer 2010 gingen gehäuft durch die Medien. Einige Fahrgäste litten an Kreislaufproblemen und Überhitzung. Was war passiert?

Die Kalt dampfklimaanlage der ICE 2-Züge war bei sehr hohen Außentemperaturen das Problem. Da man Energie und Gewicht sparen wollte, wurden die beiden Motoren, die den Kompressor (Verdichter) und die Ventilatoren des Verflüssigers antreiben, an die gleiche Stromversorgung angeschlossen. Somit wurde die Drehzahl dieser beiden Komponenten gekoppelt. Wenn nun eine hohe Kälteleistung benötigt wird (z. B. bei hohen Außentemperaturen im Sommer) läuft der Kompressor mit hoher Drehzahl und baut damit einen hohen Druck auf, der aus Sicherheitsgründen die Abschaltung der Klimaanlage durch

den Druckwächter zur Folge haben kann. Um dies zu vermeiden wird die Drehzahl des Kompressors wieder reduziert, was aber auch eine Reduktion der Drehzahl der Verflüssiger-Ventilatoren zur Folge hat. Da auf Grund der Eigenschaften der Maschinen bei gleicher Drehzahlreduktion die Leistung der Verflüssiger-Ventilatoren stärker abfällt als die des Kompressors, erfolgt bei hohen Außentemperaturen eine ungenügende Wärmeabfuhr am Verflüssiger, und das System schaltet sich ab. Um dies zu vermeiden, muss die Drehzahl der Verflüssigerventilatoren – und damit die Verflüssigerleistung – unabhängig von der Drehzahl des Kompressors regelbar sein.

Die Lösung war eine geteilte Energieversorgung, um somit die unabhängige Leistungssteuerung der beiden Motoren zu gewährleisten.

Kapitel 3

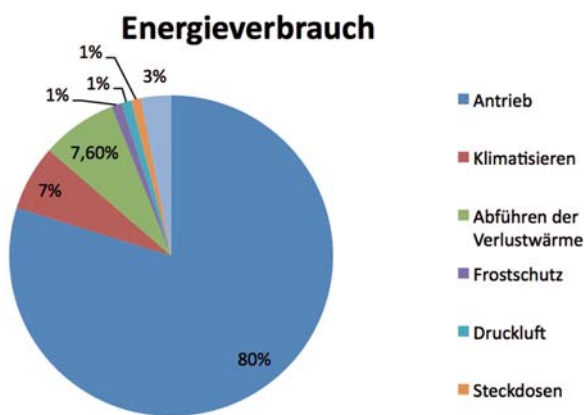
Energieversorgung der ICEs



Foto: DB AG/Uwe Miethe

3.1 Elektrischer Zugbetrieb

Die Züge der ICE-Flotte werden – mit Ausnahme des dieselbetriebenen ICE-TD – mit elektrischer Energie aus der Oberleitung betrieben. Diese Energieform bringt erhebliche Vorteile mit sich – und auch beeindruckende Zahlen.



Verbrauch einzelner Funktionsbereiche des ICE, Quelle: DB AG

Der elektrische Zugbetrieb hat neben der einfachen Nutzbarkeit erneuerbarer Energien weitere erhebliche Vorteile: Der Zug kann die elektrische Energie mit hoher Effizienz verwerten und gibt bei Bremsungen sogar die zurückgewonnene Energie wieder zurück ins Netz (vgl. Kapitel 4.3, Seite 42). Die Effizienz des elektrischen Antriebs der Züge zeigt sich beispielsweise auch im CO₂-Ausstoß. Dieser beträgt bei der Bahn pro Person und zurückgelegtem Kilometer 40 g. Beim Auto liegt dieser Wert bei 150 g, beim Flugzeug beträgt er 380 g. Die Energie wird kontinuierlich zugeführt, im Vergleich etwa mit einem dieselbetriebenen Zug entfallen also Tankvorgänge oder Ähnliches. Die Oberleitungen, die einen ICE versorgen, erlauben Stromstärken von 600-1200 A bei einer Spannung von 15 kV. Zum Vergleich: Ein Föhn braucht zum Beispiel eine Stromstärke von rund 7 A bei einer Spannung von 230 V.

Das Bahnstromnetz stellt jährlich ca. 10 - 11 TWh Energie zur Verfügung. Im Jahr 2012 betrug die größte Momentanspitze der angeforderten Leistung 2285 MW, diese tritt in der Regel zwischen 6:30 Uhr und 7:45 Uhr im Januar oder Februar auf. Die durchschnittliche Leistung liegt bei ca. 1200 MW, diese Größe hat aber nur eine geringe Aussagekraft, da das Energieversorgungssystem immer auf die Spitze und nicht auf den Durchschnitt ausgelegt sein muss.

Die Züge in Deutschland verbrauchen ungefähr so viel elektrische Energie wie der Großraum Berlin. Eine ICE 3-Doppeltraktion benötigt beim Anfahren so viel Leistung wie ein Städtchen mit 15.000 - 20.000 Einwohnern – und speist das beim Abbremsen wieder zurück: 16 MW. Der höchste Energiebedarf besteht wegen der hohen Verkehrsdichte sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr auf den Korridoren Hamburg - Fulda - München und Köln - Rhein-Main - Basel.

3.2 Bahnstrom-Versorgungsnetz

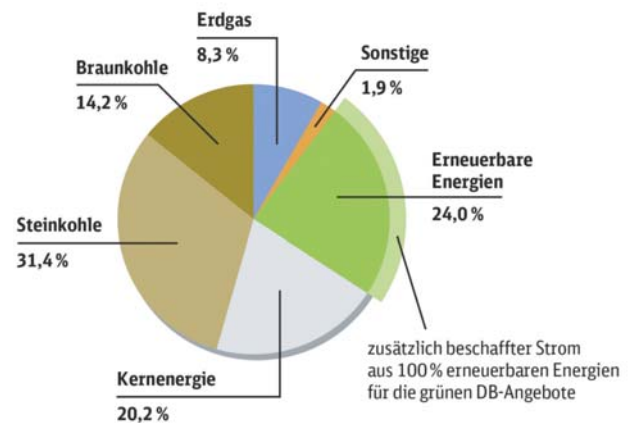
Der elektrische Antrieb der ICE-Züge muss kontinuierlich mit Energie versorgt werden. Dies erfolgt über das Oberleitungsnetz und das Verteilungsnetz der DB, welches die Oberleitungen speist. Dieses Netz unterscheidet sich in einigen wesentlichen Gesichtspunkten vom öffentlichen Stromnetz.

Die ICE-Züge nutzen elektrische Energie. Diese wird in Kraftwerken erzeugt, wobei es im Wesentlichen zwei Versorgungsmöglichkeiten gibt: Einspeisung zuerst ins öffentliche Netz und dann über Umrichter oder Umformer ins Bahnstromnetz oder direkt ins Bahnstromnetz. Eine Besonderheit bei der Bahn ist die Frequenz der Wechselspannung. Sie beträgt 16,7 Hz, wohingegen im öffentlichen Netz das Dreifache dieser Frequenz, 50 Hz, verwendet wird (zum Hintergrund siehe Textkasten unten).

Die Frequenz von 16,7 Hz:

Im Rahmen der Einführung einer Energieversorgung der Züge über Oberleitung vor über 100 Jahren gab es bei Versuchen mit der üblichen 50 Hz-Wechselspannung massive Funkenüberschläge und Lichtbögen an den Kollektoren der damals verwendeten Reihenschlussmotoren, die zur raschen Zerstörung der Motoren führten. Solche Kommutierungsprobleme sind frequenzabhängig, daher entschied man sich für eine Frequenz von 16,7 Hz, bei der die Kommutierung beherrschbar war, und eine Spannung von 15 kV. Dieses System wurde seinerzeit in Deutschland, der Schweiz, Österreich, Schweden und Norwegen eingeführt, während die restlichen Länder weiterhin Gleichstromsysteme beibehielten. In den 1950er Jahren wurde durch die Möglichkeit der Gleichrichtung zwar das Kommutierungsproblem bei 50 Hz-Bahnen beseitigt, dennoch sind die Nachteile des 16,7 Hz-Systems (im wesentlichen schwerere Transformatoren) nicht so gravierend, dass ein nachträgliches Umstellen der Frequenz auf 50 Hz in der Infrastruktur und bei den Fahrzeugen wirtschaftlich vertretbar wäre.

Für die Bahn-Energieversorgung können unterschiedliche Kraftwerke und damit Energiearten wie zum Beispiel Kern-, Wind- oder Kohleenergie benutzt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt die prozentuale Verteilung der von der Bahn genutzten Energie auf die verschiedenen Primärenergieträger im Jahre 2012. Bis zum Jahre 2020 will die Deutsche Bahn den Anteil erneuerbarer Energien auf 35% erhöhen, bis 2050 sogar auf 100%.

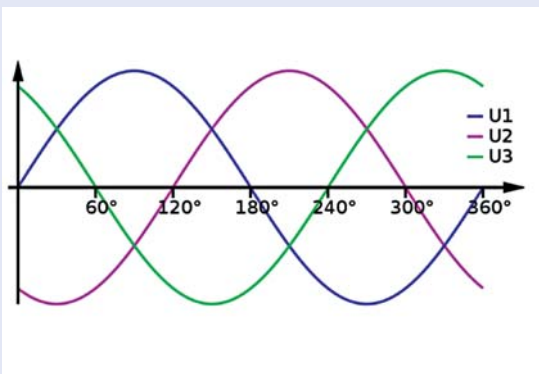


Anteile der unterschiedlichen Primärenergieträger an der Energieversorgung der DB (2012), Quelle: DB AG

Die in den Kraftwerken der DB AG erzeugte Energie wird zunächst in ein landesweites DB-eigenes 110 kV-Hochspannungsnetz mit 16,7 Hz-Netzfrequenz eingespeist, welches auch mit den Bahn-Hochspannungsnetzen in der Schweiz und in Österreich verbunden ist. Ebenfalls in dieses 110 kV-Hochspannungsnetz können Umrichter- oder Umformerwerke einspeisen, welche die Energie aus dem Landesnetz (Drehstrom/Dreiphasen-Wechselstrom, 220 kV oder 380 kV, 50 Hz) auf die DB-Netzspannung (Einphasen-Wechselstrom 110 kV, 16,7 Hz) umformen, also zusätzlich zum Spannungsniveau auch die Frequenz der Wechselspannung ändern (zum Dreiphasen-Wechselstrom siehe Textkasten auf der Folge-seite).

Bei Umformerwerken werden rotierende Maschinensätze eingesetzt, welche mit 50 Hz-Wechselstrom angetrieben werden, die daran gekuppelten Generatoren erzeugen Bahnstrom mit der Frequenz 16,7 Hz. Bei den Umrichterwerken erfolgt die Frequenz- und Spannungsänderung über Halbleiterelemente (sogenannte statische Umrichter).

Fotos: DB AG/Christian Bedeschinski 2 x, Fotolia



Dreiphasen-Wechselstrom

Der Unterschied zwischen Einphasen- und Dreiphasen-Wechselstrom lässt sich wie folgt erklären: Das Dreiphasen-Stromsystem besteht aus einem geerdeten Nulleiter und drei Phasenleitern, von denen jeder eine Nennspannung von 230 V führt. Die sinusförmige Spannungskurve ist von Phase zu Phase um 120° verschoben, so dass die Spannung zwischen zwei Phasen effektiv 400 V beträgt. Einphasen-Wechselstrom verfügt nur über den Nulleiter und eine Phase.

Das 110 kV-Bahnstromnetz hat eine Länge von etwa 7400 km. An den Hochspannungsleitungen kann man einfach erkennen, ob es sich um ein dreiphasiges Landesnetz oder um ein einphasiges Bahnstromnetz handelt: wegen des zu übertragenden Drehstroms haben die Landesnetze zusätzlich zum so genannten "Erdseil", das an der Spitze der Masten verläuft, stets drei Leiterseile oder ein Vielfaches davon, die Bahnstromnetze nur zwei Leiterseile oder ein Vielfaches davon.



Bahnstromleitung



Stromleitung des öffentlichen Landesnetzes

Die Einspeisung in die Oberleitungen erfolgt über Unterwerke. In diesen wird die Hochspannung von 110 kV aus dem Verteilnetz auf 15 kV herunter transformiert. Hierfür sind in einem Unterwerk 110 kV-Schaltanlagen,

Transformatoren und Schaltanlagen auf dem 15 kV-Niveau erforderlich. Die 15 kV-Schaltanlagen dienen dem Verteilen des Stromes auf die einzelnen Oberleitungsabschnitte und der Sicherheitsabschaltung im Falle eines Kurzschlusses. Die 110 kV-Hochspannungsanlagen werden im Freien gebaut, die Schaltanlagen auf dem 15 kV-Niveau meist in geschlossenen Gebäuden.



Transformator eines Unterwerkes

Die Oberleitungen sind in Längsrichtung in Abschnitte unterteilt, die bei Störungen oder Wartungen einfach abgeschaltet werden können. Gleiches gilt für parallele Gleise, die auch wahlweise durchgekuppelt oder getrennt geschaltet werden können. Die Schalter sind entweder in den Unterwerken (bzw. Umformer- oder Umrichterwerken) oder im Streckenbereich als Masttrennschalter ausgeführt. Masttrennschalter sind spannungsfrei schaltbare, meist motorisch über ein Gestänge angetriebene Schalter auf den Oberleitungsmasten. Die Masttrennschalter bestehen aus Messerkontakten mit sogenannten Funkenhörnern. An diesen erlöschen bei Kurzschlüssen entstehende Lichtbögen thermisch und magnetisch durch die sich nach oben vergrößernden Abstände der Hörner. Sie befinden sich immer dort wo Oberleitungsabschnitte elektrisch getrennt werden müssen, häufig in Bahnhöfen.



Der Fahrdrabt hat in der Regel einen Querschnitt von 100 oder 120 mm². Hinzu kommt der etwa gleich große Querschnitt des Tragseils. Der Werkstoff ist Kupfer oder CuAg 0,1 (was Kupfer mit 0,1% Silber als Legierungsbestandteil bedeutet), es werden aber auch Kupfer-Magnesium-Legierungen benutzt. Zum Vergleich: Der Leiterquerschnitt im Haushalt beträgt meist 1,5 mm² oder 2,5 mm².

Fotos (auch rechte Seite): DB Systemtechnik

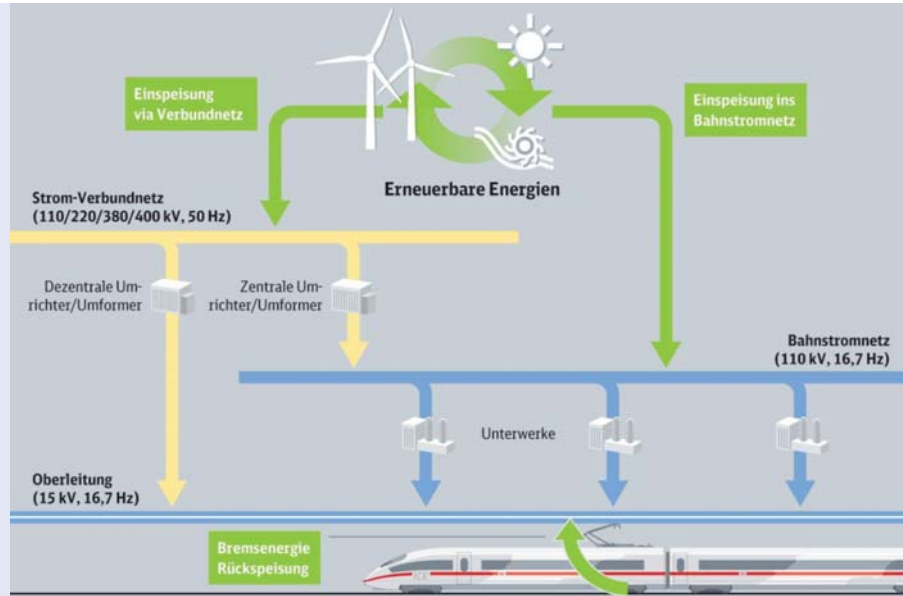


© DB Energie GmbH, Stand: 31.12.2012, Alle Rechte vorbehalten

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

Verschiedene Einspeisungswege

Neben den Unterwerken, die die Oberleitungen aus dem zentralen 110 kV-System versorgen, gibt es auch die Möglichkeit der dezentralen Einspeisung aus dem öffentlichen 50 Hz-Landesnetz. Dies geschieht in dezentralen Umrichter- oder Umformerwerken, welche die Spannung aus dem Landesnetz (Drehstrom, 220 kV oder 380 kV, 50 Hz) auf Fahrdrabtspannung (Einphasen-Wechselstrom 15 kV, 16,7 Hz) umformen. In nebenstehender Abbildung sind die verschiedenen Versorgungswege des Bahnstromsystems zusammenfassend dargestellt.



Kapitel 4

Antrieb



4.1 Energiefluss im ICE

Alle elektrischen Komponenten im ICE beziehen ihre Energie aus der Oberleitung. Ein Stromabnehmer gewährleistet den Kontakt mit der Oberleitung, der Haupttransformator versorgt die unterschiedlichen Komponenten mit den von ihnen benötigten Spannungen. Die Verbindung über die Räder und die Schiene zur Erde schließt den Stromkreis.

Hochspannungsausrüstung

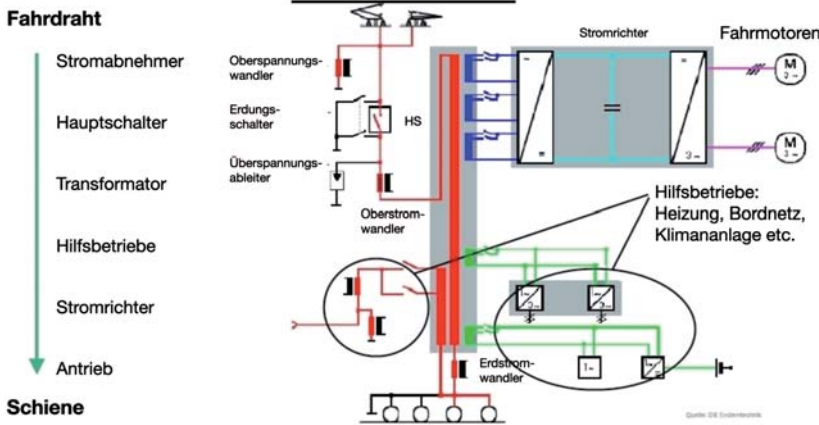
Oberleitung

Der ICE bezieht seine zum Betrieb notwendige Energie über die Stromabnehmer aus einem Oberleitungssystem (vgl. Kapitel 3.2, Seite 30). Die Oberleitung führt den Strom des Bahnnetzes oberhalb der Gleise. Das System der Oberleitung kristallisierte sich im Laufe der Zeit als das geeignetste System zur Stromversorgung eines Hochgeschwindigkeitszuges heraus. So sind alternative Versorgungssysteme für den ICE ungeeignet. Beispielsweise ist die Stromschiene, welche man häufig bei U-Bahnen findet, nur für Geschwindigkeiten bis maximal 140 km/h geeignet. Bei höheren Geschwindigkeiten kann eine kontinuierliche Stromaufnahme nicht sichergestellt werden.

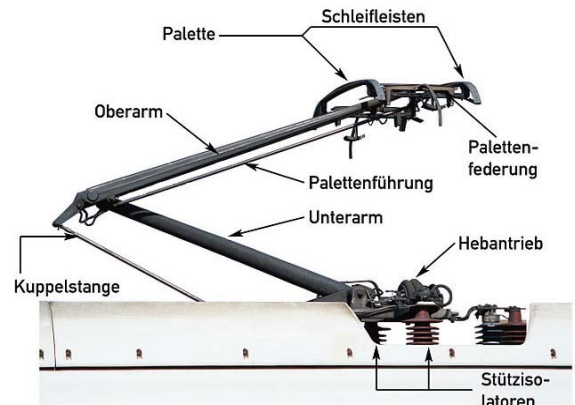


Auch sicherheitstechnisch weist die Oberleitung große Vorteile im Vergleich zur Stromschiene auf. Der Zugang muss nicht durch bauliche Maßnahmen speziell verhindert werden, da die Oberleitung hoch genug aufgehängt ist um den Sicherheitsnormen zu entsprechen.

Der Stromabnehmer befindet sich auf dem Dach des Zuges. Vom Stromabnehmer fließt der Strom weiter über den Überspannungswandler (zur Messung der eingehenden Spannung) zum Hauptschalter, welcher im Notfall automatisch den ICE komplett vom Stromnetz trennen kann. Weiter fließt er durch den Oberstromwandler (zur Messung des eingehenden Stroms) zum Transformator. Von hier zweigen der Antriebsstrang mit Umrichter und Fahrmotoren sowie die weiteren Verbraucher (sogenannte Hilfsbetriebe) im ICE ab.



Hauptstromplan des ICE 1



Skizze eines Einholmstromabnehmers, wie er beim ICE 3 verwendet wird



Stromabnehmer

Das erste Bauteil des ICE, welches mit dem Strom in Berührung kommt, ist der Stromabnehmer. Die meisten ICE-Baureihen verfügen über mindestens zwei von ihnen. So wird gewährleistet, dass beim Ausfall eines der beiden Stromabnehmer immer noch ein weiterer zur Verfügung steht. Der Stromabnehmer besteht am oberen Ende aus der mit Schleifleisten bestückten Palette.



Scherenstromabnehmer

Die aus einer Graphitlegierung bestehenden Schleifleisten schleifen am Fahrdrabt entlang, wodurch ein leitender Kontakt zwischen dem Zug und dem Bahnnetz zustande kommt. Die Palette wird durch die Konstruktion aus Ober- und Unterarm sowie Kuppelstange getragen und mittels Druckluft gegen den Fahrdrabt gedrückt. Dieser sogenannte Einholmstromabnehmer ist die heute gebräuchlichste Form des Stromabneh-

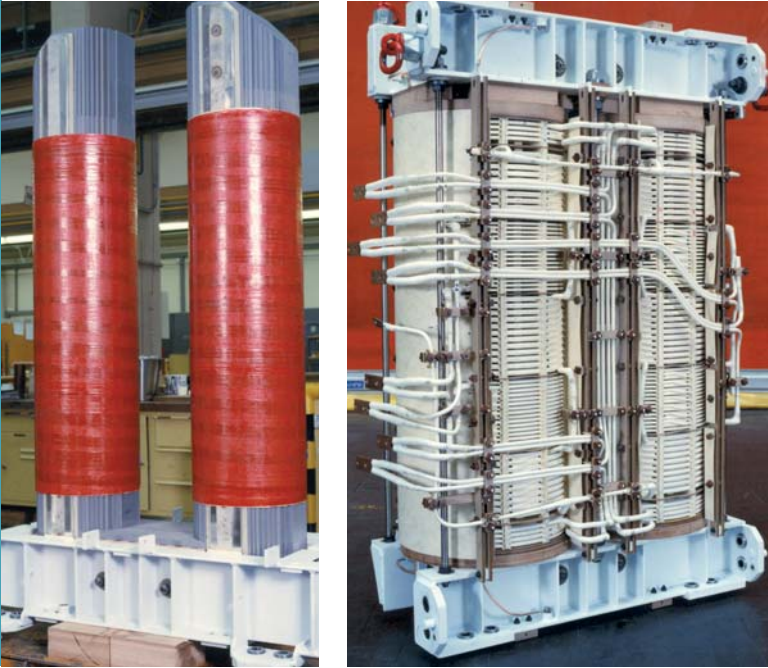
mers. Er wurde als Nachfolger des Scherenstromabnehmers entwickelt, der bei größeren Geschwindigkeiten Probleme bezüglich des dynamischen Verhaltens und somit der Herstellung einer kontinuierlichen Kontaktkraft verursacht, und ersetzt diesen seit geraumer Zeit bei Fahrzeugen der Deutschen Bahn.

Es gibt landesspezifische Richtlinien und Begrenzungen hinsichtlich der Bauform der Stromabnehmer. So dürfen die Schleifleisten in Deutschland maximal 1950 mm breit sein, in der Schweiz, aufgrund engerer Tunnel, jedoch nur 1450 mm. Daher haben Fahrzeuge, die in unterschiedliche Länder fahren, oft mehrere Stromabnehmer auf dem Dach, um das Zusammenwirken mit der Infrastruktur (d. h. der Fahrleitung) des entsprechenden Landes zu ermöglichen.

Das Heben und Senken des Stromabnehmers erfolgt mittels Druckluft. Die direkte Steuerung erfolgt über das Stromabnehmerregelventil. Die sogenannte Schleifleistenüberwachung dient dem Schutz des Oberleitungssystems und des Stromabnehmers im Falle eines Defekts: Innerhalb der Schleifleisten verläuft ein Kanal, der über eine Leitung mit Druckluft versorgt wird. Entweicht bei einem Defekt der Schleifleisten Luft aus dem System, sinkt der Druck und der Stromabnehmer wird automatisch gesenkt. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme ist der Überspannungsableiter. Dieser ist notwendig, um die Elektrik vor Spannungsspitzen zu schützen, welche beispielsweise durch Blitzschlag ausgelöst werden können.



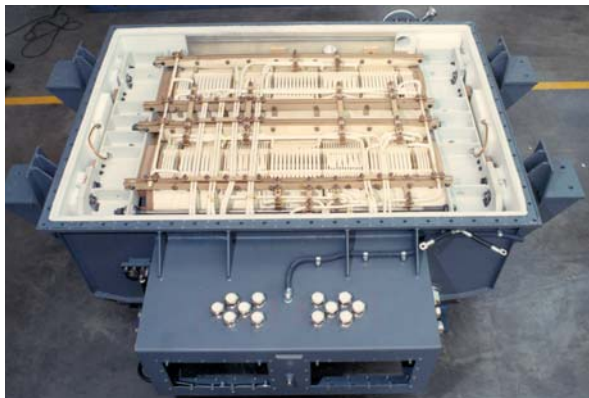
Fotos: DB AG, DB Systemtechnik



Links: Schenkel des Trafo-Eisenkerns,
Rechts: Wicklungen der Trafospulen mit Leiterausführungen

Haupttransformator

Die elektrische Energie, die dem Oberleitungsnetz entnommen wird, gelangt weiter zum Transformator, der die Fahrdrachtspannung von 15 kV auf das Spannungsniveau des Traktionskreises heruntertransformiert. Dieses beträgt 1430 V beim ICE 1 und 2. Der Grundaufbau eines Transformators besteht aus zwei Spulen bzw. Wicklungen, die durch einen massiven Eisenkern verbunden sind. Durch den Wechselstrom in der Spule (Primärwicklung) des Primärkreises mit 15 kV wird in der Sekundärwicklung ein Strom niedrigerer Spannung induziert. An diesem Punkt wird auch der Strom für die Bordverbraucher, wie beispielsweise die Beleuchtung oder die Klimaanlage, über separate Sekundärwicklungen abgegriffen.

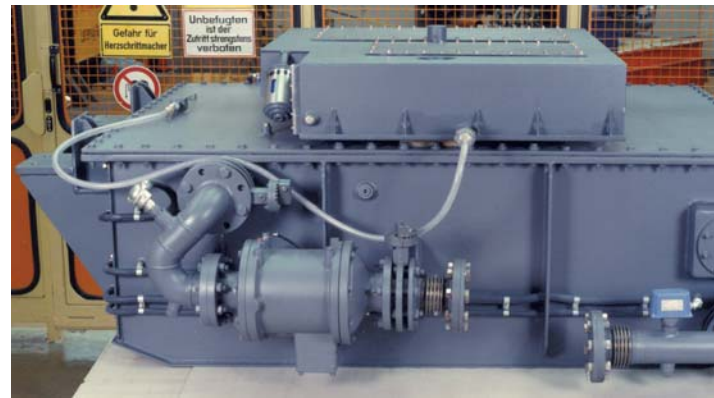


Trafospulen im noch nicht mit Öl befüllten Trafokessel

Das Gewicht des Transformators ist näherungsweise proportional zu der zu übertragenden Leistung und indirekt proportional zur Netzfrequenz. Daher wiegt der Transformator aufgrund der großen Leistung, die der ICE 2 für Traktion und Bordnetz benötigt und der im Vergleich zum Landesnetz geringeren Frequenz des Bahnstromnetzes mit 16,7 Hz je Triebkopf 10 Tonnen bei einer Leistung von 5,2 MW. Um möglichst viel Raum eines Wagens für den Transport der Fahrgäste nutzen zu können, wird der Transformator im ICE 3 unter dem Boden liegend verbaut.

Stromrichter

Der Strom, der dem Transformator für den Traktionskreis entnommen wird, durchfließt nun den Vierquadrantensteller (Kapitel 4.3, Seite 42), der den Wechselstrom aus dem Transformator in Gleichstrom umrichtet. Darauf folgt ein Zwischenkreis, in dem die Spannung geglättet und die Energie zwischengespeichert wird. Aus diesem Zwischenkreis wird der Pulswechselrichter gespeist. Der Pulswechselrichter besteht wie die Vierquadrantensteller aus Leistungshalbleitern. Durch sie wird aus der Gleichspannung des Zwischenkreises nun der dreiphasige Strom variabler Frequenz und Spannung erzeugt, welchen der Asynchronmotor benötigt. Diese Komponenten werden im Kapitel 4.3 "Leistungssteuerung" detailliert in Aufbau und Funktion beschrieben.



Außenansicht eines ICE-T-Trafos

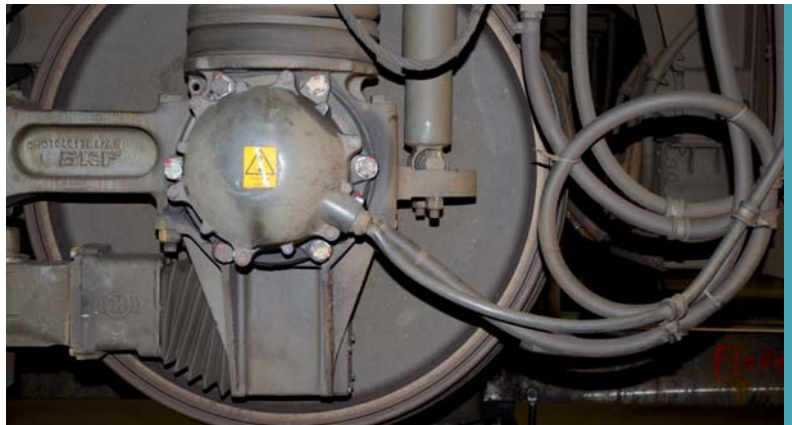
Motor

Anschließend folgt der eigentliche Verbraucher, der Asynchronmotor. Hier wird der Dreiphasenwechselstrom in die Elektromagneten im Stator eingespeist, wodurch ein sich ständig änderndes Magnetfeld den beweglichen Läufer durchsetzt. Aufgrund des Prinzips der Induktion beginnt der Läufer mitsamt seiner Achse zu rotieren und dem Wechselfeld des Erregerstroms zu folgen. Über eine Übersetzung wird die Radachse angetrieben. Der Asynchronmotor wird in Kapitel 4.2, Seite 39, detailliert in Aufbau und Funktion beschrieben.



Fahrmotor eines ICE 3 (A-Seite)

Fotos: DB AG/Christian Bedeschinski, DB Systemtechnik



Stromrückführungskabel vom Trafo zum Radsatz beim ICE 3

Stromrückführung

Zuletzt wird der Strom über leitende Kontakte in Form von Metallbürsten zum Radsatz und von dort über die Gleise abgeführt, was dazu führt, dass der ICE über die Schienen geerdet ist. Dadurch ist kein zweiter Fahrdrabt zur Stromrückführung notwendig. Der Stromkreis aus Fahrdrabt, ICE und Gleis ist nun komplett geschlossen. Da die Gleise Kontakt zur Erde haben, besteht – beispielsweise auf Bahnübergängen – keine Gefahr für den Menschen.

Wo ist eigentlich der Motor beim ICE 3?

Anders als beim ICE 1 und beim ICE 2 liegen die Fahrmotoren, die Leistungselektronik sowie die Transformatoren nicht mehr in speziellen Triebköpfen (konzentrierter Antrieb), sondern sind über mehrere Wagen verteilt (verteilter Antrieb; vgl. Kapitel 9, Seite 77). Dieses System bringt mehrere Vorteile mit sich. So bleibt zum Beispiel kein Wagen "ungenutzt", das heißt in jedem Wagen können Fahrgäste Platz nehmen, da die Transformatoren und Elektronik sowie die Fahrmotoren unterflur verbaut sind.

So kann man im ICE 3 dem Triebfahrzeugführer quasi direkt über die Schulter schauen. Außerdem werden so mehrere Achsen, über den ganzen Zug verteilt, angetrieben. Jedoch müssen vor allem die Transformatoren für den Unterflureinsatz verkleinert werden, da das Platzangebot hier stark beschränkt ist. Der Trend geht jedoch immer mehr in Richtung kompakterer Leistungselektronik, wodurch auch das für die Zukunft geplante Konzept der autarken "Power Cars" beim ICx (ebenfalls Kapitel 9, Seite 77) möglich wird.

4.2 Antriebsmotoren

Um den ICE auf eine maximale Geschwindigkeit von 330 km/h zu bringen braucht es u. a. einen leistungsfähigen Antrieb. Die für eine gewünschte Geschwindigkeit benötigte Antriebsleistung kann physikalisch berechnet werden. Die im ICE eingesetzten Asynchronmotoren funktionieren auf Grund der elektromagnetischen Induktion. Dieser Motortyp ist besonders verschleißarm.



Leistungsberechnung am Beispiel des ICE 3

In Kapitel 1.1, Seite 12, wurde der Zusammenhang $P = F \cdot v$ zwischen der Leistung P der Antriebsmotoren, der Antriebskraft F_{Motor} der Motoren und der momentan gefahrenen Geschwindigkeit v hergeleitet.

Bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit gilt:

$$|F_{\text{Motor}}| = |F_{\text{Widerstände}}|$$

Für die Widerstandskräfte gilt (vgl. Kapitel 1.1, S. 12):

$$F_{\text{Widerstände}} = F_{w,0} + F_{w,1} + F_{w,2} = a + b \cdot v + c \cdot v^2 .$$

Für eine Geschwindigkeit von 330 km/h erhält man:

$$F_{w,1} = 27,46 \frac{\text{N}}{\text{km/h}} \cdot 330 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 9,1 \text{ kN}$$

(Rollwiderstand);

$$F_{w,1} = 27,46 \frac{\text{N}}{\text{km/h}} \cdot 330 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 9,1 \text{ kN}$$

(linear von v abhängige Widerstandskräfte);

$$W_{w,2} = 0,589 \frac{\text{N}}{(\text{km/h})^2} \cdot \left(330 \frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^2 = 64,1 \text{ kN}$$

(aerodynamischer Widerstand).

Man erkennt, dass bei höheren Geschwindigkeiten der Luftwiderstand am stärksten ins Gewicht fällt. Damit ist

$$F_{\text{Widerstände}} = 4,4 \text{ kN} + 9,1 \text{ kN} + 64,1 \text{ kN} = 77,6 \text{ kN} .$$

Setzt man damit für F_{Motor} den Wert 78 kN in $P = F \cdot v$ ein, ergibt sich als nötige Antriebsleistung für eine Fahrt mit 330 km/h:

$$P = 78 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \frac{330 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 7,2 \text{ MW} .$$

In Wirklichkeit hat der Zug eine installierte Maximalleistung von 8 MW. Ein Grund dafür ist, dass ein Kraftüberschuss nötig ist, um auf 330 km/h beschleunigen zu können. Ein Kraftüberschuss wird außerdem benötigt, um Steigungen zu überwinden. Auch möchte man bei Gegenwind noch Höchstgeschwindigkeit fahren können. Im ICE 3 sorgen 16 Motoren von je 500 kW für diese Leistung. Die Motoren im ICE 3 sind nicht mehr wie bei seinen Vorgängern auf die Triebköpfe konzentriert, sondern auf vier Wagen verteilt. Da die Motoren unter der Fußbodenebene verbaut sind, sind angetriebene Wagen im Innenraum genauso zugänglich und bieten fast den gleichen Platz wie nichtangetriebene Wagen. Der verteilte Antrieb verschafft den Passagieren aber nicht nur mehr Platz, er ermöglicht es den Motoren



Schemazeichnung eines Käfigläufers

Realabbildung eines Käfigläufers

Ständerfeld und Läuferfeld

auch durch die größere Anzahl angetriebener Achsen mehr Kraft auf die Strecke zu übertragen, wodurch der Zug auch bei ungünstigen Haftwerten zwischen Rad und Schiene stärker beschleunigen kann und schneller seine Höchstgeschwindigkeit erreicht. Die Motoren, die im ICE 3 zum Einsatz kommen, sind sogenannte Asynchronmotoren. Das Prinzip des Asynchronmotors ist ein einfaches sowie geniales und wurde schon im ICE 1 und im ICE 2 verwendet.

Grundsätzlich basiert der Asynchronmotor auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Unter Induktion versteht man das Erzeugen einer Spannung in einem Leiter durch Änderung der magnetischen Flussdichte (genauer: des magnetischen Flusses). Das heißt, wenn man ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt und darin einen Leiter hält, wird im Leiter eine Spannung induziert. Ein sich änderndes Magnetfeld kann zum Beispiel durch einen Elektromagneten, der stärker oder schwächer wird, erzeugt werden.

In geschlossenen Stromkreisen bewirkt die induzierte Spannung einen Stromfluss. Bewegte Ladung erzeugt ihrerseits ein Magnetfeld. Das bedeutet, der induzierte Strom bewirkt wieder ein Magnetfeld (wie in einem Elektromagneten). Der Physiker Emil Lenz hat bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gezeigt, dass dieser induzierte Strom stets so fließt, dass das von ihm hervorgerufene Magnetfeld der eigenen Ursache

entgegenwirkt (Lenz'sche Regel). Die Ursache für den induzierten Strom ist das sich ändernde Magnetfeld. Der induzierte Strom muss also nach der Lenz'schen Regel so fließen, dass sein Magnetfeld der Änderung des ursprünglichen Magnetfelds entgegen wirkt.

Im Asynchronmotor nutzt man dieses Prinzip. In einem Käfigläufer, der mit der anzutreibenden Achse verbunden ist, wird ein Strom induziert, indem man ein Magnetfeld erzeugt, das sich um den Käfigläufer bewegt. Nach der Lenz'schen Regel bewirkt der induzierte Strom wieder ein Magnetfeld, das seiner Ursache entgegen wirkt. In unserem Fall ist die Ursache für den induzierten Strom das Magnetfeld, das sich um den Läufer bewegt. Um dieser Bewegung entgegen zu wirken, muss der Strom so fließen, dass sein Magnetfeld bewirkt, dass der Läufer vom „Drehfeld“ angezogen wird. Der Läufer versucht daher, das sich drehende Magnetfeld einzuholen, um seine ursprüngliche Position zum Magnetfeld wiederherzustellen. Doch wird er das nie schaffen: Wenn sich der Läufer genauso schnell drehen würde wie das Drehfeld, würde sich das Drehfeld relativ zum Läufer nicht mehr verändern, so dass keine Induktion mehr stattfindet - der Läufer würde nicht mehr angetrieben. Der Läufer hinkt dem Drehfeld also immer hinterher, daher rührt der Name „Asynchronmotor“.

Den Unterschied zwischen der Bewegung des Läufers und der des Drehfelds nennt man Schlupf.

Der Schlupf wird berechnet, indem man den Unterschied zwischen der Drehzahl des Drehfelds und der des Läufers durch die Drehzahl des Drehfelds teilt:

$$s = \frac{n_D - n_L}{n_D}$$

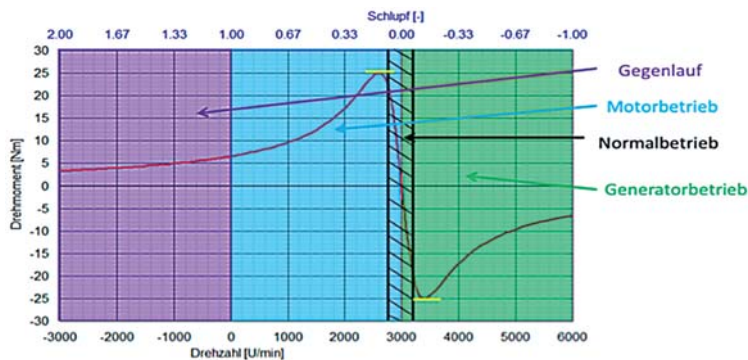
n_D = Drehzahl des Drehfelds;
 n_L = Drehzahl des Läufers.

$$\frac{n_D - 0}{n_D} = 1 \quad \text{Bei Stillstand ist der Schlupf 1}$$

und bei Leerlauf beträgt er annähernd 0

$$n_D \approx n_L \Rightarrow \frac{n_D - n_L}{n_D} \approx 0$$

Das maximale Drehmoment wird am Kippmoment erreicht, doch läuft die Maschine am Kippmoment im Überlastbereich, sodass dieser Zustand nicht lange anhalten sollte. Wird die Maschine im Motor- oder im Generatorbetrieb stärker als das Kippmoment (gelbe Striche im Diagramm) beansprucht, dreht sie durch oder bleibt stehen, was zu erheblichen Schäden führen kann.



Man versucht die Frequenz des Drehfelds immer so zu regulieren, dass der Schlupf in seinem Optimalbereich liegt, so dass das Drehmoment und der Wirkungsgrad möglichst hoch sind. Der Optimalbereich für den Schlupf liegt bei den meisten Asynchronmotoren zwischen 0,1 und -0,1. In diesem Bereich findet der Normalbetrieb statt.

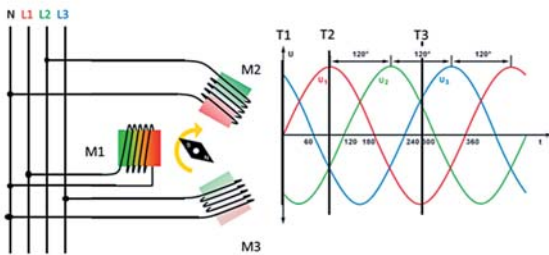
Prinzipiell ist der Aufbau des Asynchronmotors ziemlich einfach. Er besteht aus zwei Teilen: dem feststehenden Ständer oder Stator und dem beweglichen Läufer. Im Ständer sind Elektromagneten jeweils in Dreierpaaren eingelassen, die zueinander um 120° versetzt sind. Damit der Motor ausreichend gekühlt ist, ist das Gehäuse mit Kühlrippen versehen und am Läufer ist meist eine Luftschraube befestigt, die bei Betrieb für kühle Luft sorgt. Der große Vorteil des Asynchronmotors ist der unabhängige Läufer. Bei herkömmlichen Elektromotoren werden Schleifkontakte benötigt, um einen Stromfluss im Läufer zu bewirken. Schleifkontakte werden aber schnell abgenutzt, was den herkömmlichen Elektromotor sehr wartungsintensiv macht. Im Asynchronmotor nutzt man die Induktion um einen Stromfluss im Läufer zu erzeugen.



Fahrmotor eines ICE 3 (B-Seite)

Um zu erklären, wie das Drehfeld erzeugt wird und wie es wirkt, geht man von einem etwas vereinfachten Asynchronmotor aus. In der Realität besteht der Asynchronmotor natürlich aus vielen Elektromagneten. Um das Prinzip zu erklären, reichen jedoch drei Elektromagnete aus. Die Elektromagnete sind um 120° versetzt und werden an den Dreiphasen-Wechselstrom angeschlossen. Der Dreiphasen-Wechselstrom besteht, wie der Name schon sagt, aus drei Phasen L1, L2, L3 und dem Nullleiter N. Die drei Phasen sind zeitlich gegeneinander verschoben, so dass die Maxima eine Periode in drei gleiche Zeitintervalle unterteilen (vgl. Kapitel 3.2, Seite 31). Eine Periode entspricht einer vollständigen Drehung des Magnetfelds. Zunächst betrachten wir die Veränderung des Magnetfelds einer Spule in Abhängigkeit vom Stromfluss (siehe nachfolgende Abbildung). Im Leiter L1 fließt zum Zeitpunkt T1 kein Strom und somit wird vom Magneten M1 auch kein Magnetfeld erzeugt.

Zum Zeitpunkt T2 ist der Strom im Leiter L1 auf ein Maximum angestiegen und mit ihm das Magnetfeld der Spule M1 (der Zustand zum Zeitpunkt T2 ist im Bild links dargestellt). Nach T2 verringert sich der Stromfluss, sodass das Magnetfeld von M1 wieder schwächer wird. In T3 hat der Strom seine Richtung umgekehrt, wodurch der Elektromagnet seine Polung geändert hat. Nach T3 sinkt der Stromfluss wieder bis zum Nulldurchgang und die Abfolge beginnt aufs Neue.



Prinzip der Erzeugung des Drehfelds. Die Magnetnadel in der Mitte der linken Abbildung symbolisiert die Richtung des Läuferfelds; der Läufer selbst ist nicht dargestellt.

Der Ablauf spielt sich zeitlich um

$$\frac{1}{3}T \text{ und um } \frac{2}{3}T \quad (T = \text{Dauer einer Periode})$$

verschoben an den Spulen M2 und M3 ab. Durch diese Konstellation wandern der Nord- bzw. der Südpol von Elektromagnet zu Elektromagnet. Durch die Veränderung in Form einer Sinusfunktion wird immer der nächstgelegene Nord- bzw. Südpol stärker, während der Nord- bzw. Südpol, an dem sich gerade der Süd- bzw. der Nordpol des Läufers befindet, schwächer wird.

Um die Drehzahl des Drehfelds zu erhöhen steigert man die Frequenz des Stroms. Beim Beschleunigen des ICEs erhöht man sowohl die Spannung als auch die Frequenz. Die erhöhte Spannung sorgt für eine größere Stromstärke und somit auch für eine Verstärkung der Magnetfelder. Nur die Frequenz zu erhöhen um zu beschleunigen würde nicht ausreichend große Kräfte erzeugen um den Zug in Fahrt bringen. Anschaulich ist klar, dass man ein Fahrzeug nicht beschleunigen kann, indem man alleine die Frequenz des Stroms erhöht. Zwar entstehen durch den größeren

Schlupf auch größere Spannungen und somit ein stärkeres Läuferfeld, doch sollte der Schlupf nicht außerhalb seines Optimums liegen. Um den Schlupf innerhalb seines Optimalbereichs zu halten, wird auch die Spannung erhöht und somit das benötigte Drehmoment erhalten.

Beim Abbremsen kann der Asynchronmotor auch als Generator verwendet werden, wobei die kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Wenn der Zug bremst, dreht sich der Läufer schneller als das Drehfeld, was übersynchroner Betrieb genannt wird. Um seine Position zum Ständerdrehfeld beizubehalten, muss der Läufer sich verlangsamen. Im Läufer werden wieder Ströme induziert, die ein Magnetfeld zur Folge haben, das in den Ständerwicklungen wiederum eine Spannung induziert, die abgegriffen und ins Netz eingespeist werden kann.

Teelichtversuch

Dass sich ein nicht-ferromagnetischer Läufer wirklich mit einem Magneten mitbewegt, kann man ganz leicht selber ausprobieren. Alles was man dazu benötigt, ist ein Teelicht, ein Zahnstocher und ein starker Magnet (bei schwachen Magneten ist der Effekt nicht stark genug). Nun muss man das Teelicht nur noch aushöhlen, es auf die Zahnstocherspitze legen und den Magneten in leichten Kreisbewegungen über dem Teelicht bewegen. Man sollte beobachten können, wie sich das Teelicht mit dem Magneten mitbewegt.



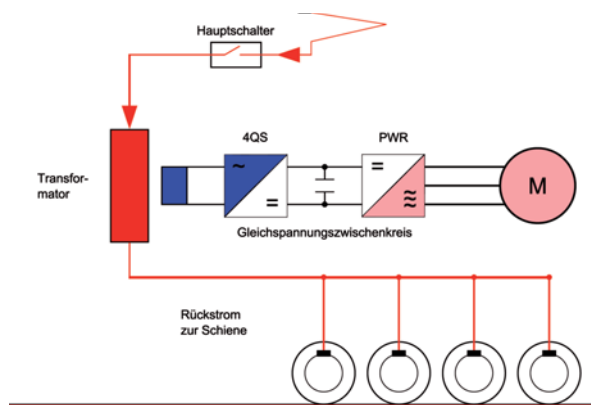
Fotos: DB Systemtechnik, Goethe-Gymnasium

4.3 Leistungssteuerung

Die Leistungssteuerung eines ICEs erfolgt zwischen dem Transformator und den Fahrmotoren. In diesem Bereich wird der Strom so verändert, dass die Motoren passend zur Eingabe des Lokführers den Zug antreiben oder bremsen.

Die Spannung im deutschen Bahnnetz beträgt 15 kV, diese Spannung ist aber zu hoch für die Motoren und Komponenten der Leistungssteuerung. Daher muss die Hochspannung auf eine niedrigere Spannung, z. B. 1,1 kV beim ICE 3, heruntertransformiert werden. Für diese Aufgabe wird ein Transformator eingesetzt (Abbildung A). Beim ICE 3 werden die jedem der beiden Transformatoren zugeordneten 8 Fahrmotoren, die auf zwei angetriebene Wagen verteilt sind, über 4 gleiche Sekundärwicklungen und die daran anschließenden Umrichter versorgt (vgl. Kapitel 4.1, Seite 36).

Hauptstromkreis im Traktionsbetrieb (Abbildung A)



Die netzseitigen Umrichter (Vierquadrantensteller) verbinden den Transformator mit den Gleichspannungszwischenkreisen, die jeweils wiederum über die motorseitigen Umrichter (Pulswechselrichter) mit den beiden ihnen zugeordneten Fahrmotoren verbunden sind. Diese Baugruppe aus Vierquadrantensteller, Gleichspannungszwischenkreis und Pulswechselrichter nennt man „Antriebs- bzw. Traktionsstromrichter“. Die Fahrmotoren werden mit Dreiphasen-Wechselstrom (Drehstrom) variabler Frequenz und Spannung betrieben. Die Umrichter können als Gleich- und als Wechselrichter arbeiten. Dadurch wird gesteuert, ob der Zug vorwärts bzw. rückwärts beschleunigen oder bremsen soll. Sie bestehen im einfachsten Fall jeweils aus 4-6 Leistungstransistoren bzw. Thyristoren (IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor oder GTO = Gate

turn off Thyristor) und 4-6 Dioden, die je nach Aktion unterschiedlich und unabhängig voneinander genutzt werden können. Wird der Strom gleichgerichtet, benutzt man die Dioden, zum Wechselrichten die Transistoren. Aufbau und Funktionsweise dieser Umrichter werden im Folgenden detailliert erläutert.

Transistoren sind elektronische Bauteile, die wie ein Schalter funktionieren. Durch eine Steuerspannung bzw. einen Steuerstrom können sie geöffnet und geschlossen werden. Sie werden zum Beispiel in Prozessoren von Computern benutzt. Da sie bei der Anwendung in Computern nur sehr kleine Ströme schalten müssen, hat ein einzelner Transistor hier sehr kleine Abmessungen. Deshalb können sich bei Prozessoren mehrere Milliarden Transistoren auf einer Fläche von wenigen Quadratzentimetern befinden. Bei Transistoren, die wie im ICE als Leistungshalbleiter benutzt werden, ist die Fläche deutlich größer, da diese wesentlich größere Ströme (bis zu 1000 A) schalten müssen. Ein Vorteil des IGBT im Vergleich zum GTO ist, dass mithilfe vergleichsweise kleiner Steuerleistungen auch sehr große Stromstärken geschaltet werden können.

Fotos: DB Systemtechnik



Leistungs-GTO



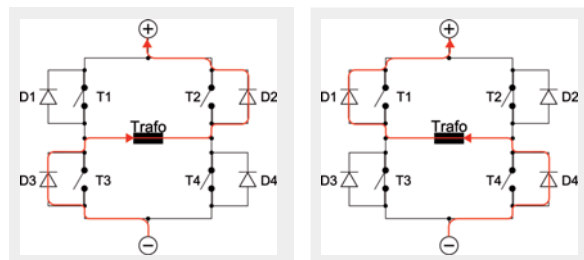
IGBT

Dioden sind Halbleiterbauelemente, die den Strom nur in einer Richtung durchlassen. Sie werden gebraucht, um den Wechselstrom gleichzurichten. Durch die Verwendung eines Gleichspannungszwischenkreises reduzieren sich die unerwünschten Wechselwirkungen zwischen Ein- und Ausgang des Stromrichters. So glättet er mit Hilfe von Kondensatoren die Ströme und dient als Energiespeicher. Der Betriebspunkt des Fahrmotors, das heißt die Kombination aus Drehzahl und Drehmoment, ist abhängig von der Frequenz und der Amplitude der Dreiphasen-Wechselspannung. Die Kombination aus Drehzahl und Drehmoment (also den Betriebspunkt) kann man sich in einem Schema aus 4 Quadranten vorstellen. Sind Drehzahl und Drehmoment positiv, beschleunigt der Zug in positive Richtung, sind beide negativ, beschleunigt der Zug in negative Richtung. Ist die Drehzahl positiv und das Drehmoment negativ, so bremst er während er in positiver Richtung fährt. Dreht man die Vorzeichen bei Drehzahl und Drehmoment wieder um, so bremst der Zug, während er in negativer Richtung fährt. So ergeben sich die genannten 4 Quadranten aus Beschleunigen und Bremsen sowie positiver und negativer Fahrtrichtung. Die für den Betriebspunkt benötigte Spannung und Frequenz werden passend zu der Eingabe des Lokführers durch eine Steuerelektronik berechnet. Die entsprechende Wechselspannung wird durch den Wechselrichter aus der Gleichspannung des Zwischenkreises erzeugt.

Funktion der Antriebssteuerung bei Motorbetrieb

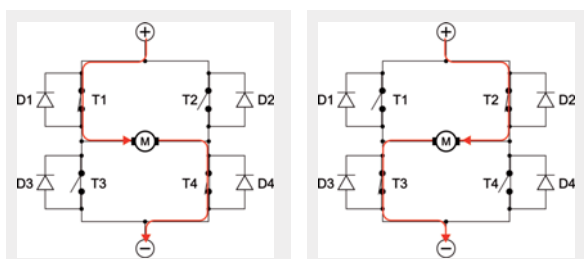
Der netzseitige Umrichter (Vierquadrantensteller) (Abb. A, Seite 42) arbeitet beim Motorbetrieb als Gleichrichter. Bei diesem Vorgang wandeln die Dioden und Thyristoren/Transistoren die Wechselspannung des Bahnnetzes in eine Gleichspannung um. Die Abbildungen B und C zeigen den Stromfluss durch die Dioden für die beiden Polaritäten der Wechselspannung, zu den Zeiten, in denen die Thyristoren/Transistoren nicht eingeschaltet sind. Die roten Linien verdeutlichen den Stromfluss. Der schwarze Kasten in der Mitte symbolisiert die Sekundärwicklung des Transformators. Für beide Polaritäten am Transformator ergibt sich auf der

Gleichspannungsseite (abgegriffen zwischen den mit Plus- und Minuszeichen markierten Stellen in der dargestellten Schaltung) dieselbe Stromrichtung.



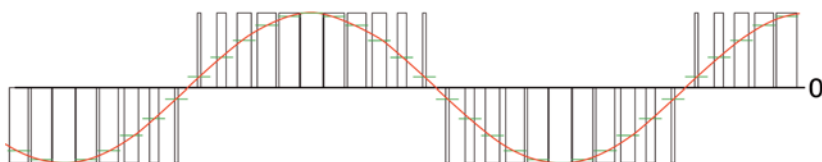
Stromfluss durch den Umrichter bei Betrieb als Gleichrichter (links: Abb. B, rechts: Abb. C)

Der motorseitige Umrichter arbeitet beim Motorbetrieb als Pulswechselrichter. Dieser hat die Aufgabe, die Gleichspannung in die erforderliche Dreiphasen-Wechselspannung umzuwandeln. Die beiden Abbildungen D und E zeigen diese Situation in vereinfachter Form. Auf der Wechselspannungsseite ist immer nur eine der drei Phasen dargestellt. Durch das wechselnde Schließen der Transistorpaare T1/T4 und T2/T3 entsteht am eingezeichneten Motor eine Wechselspannung. Würde man zwischen den beiden Situationen gleichmäßig wechseln, würde eine rechteckförmige Wechselspannung entstehen. Der Betrieb des Motors wird aber günstiger bei einer Wechselspannung in Form einer Sinuskurve, da dann eine gleichmäßigere Rotation des Feldes und damit ein gleichmäßigeres Drehmoment entsteht. Um das zu erreichen schließt man die Transistoren in bestimmten Abständen und für eine bestimmte Dauer. So entsteht ein Zeitverlauf der Wechselspannung, wie in Abb. F (Seite 44) dargestellt. Führt man hier eine Mittelung über geeignet gewählte Zeitintervalle (etwa die Periodendauer zur Schaltfrequenz) durch, so ergibt sich die in Abbildung F dargestellte Treppenfunktion, die näherungsweise einer Sinuskurve entspricht.



Stromfluss durch den Umrichter bei Betrieb als Pulswechselrichter (links: Abb. D, rechts: Abb. E)

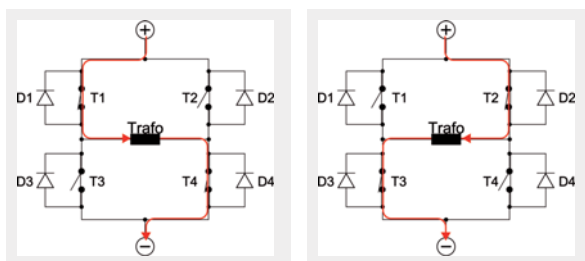
Prinzip der Pulswechselrichtung (Abb. F)



Funktion der Leistungssteuerung bei Generatorbetrieb

Beim Generatorbetrieb läuft alles in umgekehrter Richtung ab. Nun ist es der Fahrmotor, der bei angelegtem „Drehfeld“ am magnetisch erregten Asynchronmotor eine „erhöhte“ Wechselspannung erzeugt. Diese wird dann vom motorseitigen Umrichter gleichgerichtet. Es werden wieder die Thyristoren/Transistoren und Dioden zum Gleichrichten verwendet. Die Gleichspannung fließt dann über den Gleichspannungszwischenkreis zu dem netzseitigen Umrichter, der jetzt als Pulswechselrichter betrieben wird (die Bezeichnungen in Abbildung A bezieht sich auf den Motorbetrieb).

Der netzseitige Umrichter erzeugt aus der Gleichspannung wieder eine Wechselspannung (Abbildungen G und H zeigen wieder den Schaltzustand bei eingeschalteten Thyristoren/Transistoren), welche - in Frequenz und Phasenlage an das Oberleitungsnetz angepasst - über den Transformator in das Bahnnetz zurückgespeist wird. Alternativ oder zusätzlich zur geschilderten elektrischen bzw. generatorischen Bremse kann der ICE aber auch mit anderen Methoden gebremst werden (siehe Kapitel 5 ab Seite 47).



Stromfluss durch den Umrichter bei Betrieb als Pulswechselrichter bei der Rückspeisung in den Transformator (links: Abb. G, rechts: Abb. H)

Blick in den Führerstand einer Lokomotive der Baureihe 103



Bei älteren Lokomotiven (bis ca. 1980) konnte der Antrieb noch nicht über eine stufenlos einstellbare Spannung gesteuert werden, da es noch keine entsprechenden Umrichter gab. Deshalb verwendete man eine Stufensteuerung, die verschiedene Anzapfungen auf der Sekundärseite des Transformators nutzte. Der Lokführer kann mit dem Fahrerschalterhandrad (schwarzes Rad) zwischen diesen Trafoanzapfungen wechseln, welche zu unterschiedlichen Spannungen an den Fahrmotoren führen. Bei der Baureihe 103 besitzt der Fahrerschalter beispielsweise 39 Fahrstufen. Da die Motorspannungen nur stufenweise verändert werden können, ergeben sich bei anderen Fahrzeugen mit relativ wenigen Spannungsstufen insbesondere beim Anfahren ruckartige Geschwindigkeitsänderungen. Zusätzlich zum Fahrerschalterhandrad gibt es einen Fahrtrichtungsschalter, mit dem die Fahrtrichtung eingestellt wird (in Abbildung oben der metallene Hebel links vom Fahrerschalterhandrad).

Fotos: DB Systemtechnik

Kapitel 5

Bremsen



Foto: DB AG/Jet-Foto Kranert

5. Bremsen

Soll ein sich bewegender Zug oder ein anderes Fahrzeug angehalten oder seine Geschwindigkeit vermindert werden, muss die im Fahrzeug gespeicherte kinetische Energie in andere Energieformen umgewandelt werden.

Um dies zu erreichen müssen am Zug Kräfte angriffen, die entgegen seiner Bewegungsrichtung wirken. Die dadurch entstehende negative Beschleunigung wird als „Bremsen“ bezeichnet. Die Bremssysteme für den ICE wurden bereits ab Mitte der 1980er Jahre auf der Basis erprobter Technologien entwickelt und standen ab 1991 mit Beginn des ICE-Betriebes zur Verfügung. Im Schienenverkehr unterscheidet man allgemein zwischen zwei verschiedenen Arten von Bremsungen: Betriebsbremsungen und Schnellbremsungen.

Betriebsbremsungen sind die „normalen“ Bremsungen im Betrieb. Bei Schnellbremsungen ist es wichtig, dass der ICE einen möglichst kurzen Bremsweg hat und somit die maximal erreichbare Sicherheit im Schienen-

verkehr gewährleistet ist. Schnellbremsung können entweder vom Lokführer oder von technischen Systemen eingeleitet werden. Ein Ausfall der Bremsen oder Teilen davon kann fatale Folgen haben, daher ist eine hohe Zuverlässigkeit wichtig. Zusätzlich ist auch der Fahrgastkomfort ein ausschlaggebender Punkt für die Konstruktion der Bremsen. Die Fahrgäste sollen so wenig wie möglich von den Betriebsbremsungen spüren. Für diese Zwecke setzt man in den ICE-Generationen bis heute im Wesentlichen vier unterschiedliche Bremstechniken ein: die Generatorbremse, auch elektromotorische Bremse genannt, die Magnetschienenbremse, die Wirbelstrombremse und schließlich noch die Scheibenbremse, wie man sie vom Auto kennt - im ICE wird sie pneumatisch, d. h. durch Druckluft, betätigt.

5.1 Höchste Anforderungen an die Bremsen

Die Sicherheit ist das Wichtigste im Bahnverkehr. Deshalb wird dafür gesorgt, dass Züge auch unter schwierigen Bedingungen zuverlässig bremsen können. Während Autos und Fahrräder Probleme haben, wenn nasses Laub, Nässe, Eis oder Schnee auf der Straße liegen, wird dafür gesorgt, dass ein ICE bei eben diesen Bedingungen weiterhin die vorgesehene Bremsleistung aufbringen kann.

Dazu trägt die Tatsache bei, dass der ICE verschiedene Bremssysteme benutzt, die nicht alle reibwertabhängig sind. Der Reibwert ist ein Maß für die Reibungskraft im Verhältnis zur Anpresskraft zweier Körper. Die Wirbelstrombremse (siehe Kapitel 5.2, ab Seite 50) arbeitet vollkommen unabhängig vom Reibwert, sie wirkt berührungslos über ein in die Schienen induziertes Magnetfeld. Dies sorgt dafür, dass das Bindeglied nicht die Reibung ist, sondern die von äußeren Einflüssen unabhängige durch Magnetfelder vermittelte Kraft. Auch die Magnetschienenbremse, die direkt auf die Schienen abgeseht wird und dort sehr starke Reibungskräfte aufbauen kann, ist in ihrer Wirkung nahezu unabhängig von der Witterung. Lediglich die Generator- und die Scheibenbremse sind auf die Reibung zwischen Rad und Schiene angewiesen, da bei diesen die Räder gebremst werden. Somit sind sie witterungsabhängig. Zur Verbesserung des Reibwertes, beispielsweise auf

nassen Schienen, verfügen viele Züge, darunter auch die ICEs, über Sandungsanlagen. Diese streuen speziellen „Bremssand“ mit hohem Quarzanteil auf die Schiene und helfen so, die Haftreibung zwischen Rad und Schiene erhöhen. So kann die moderne Bremstechnik gewährleisten, dass der ICE 3 bei einer Schnellbremsung von 300 km/h auf 0 km/h nur ca. 2800 Meter Bremsweg benötigt. Auch mit einer Geschwindigkeit von 330 km/h braucht der ICE 3 lediglich ca. 3300 Meter, um vollständig zum Stillstand zu kommen.



Auslauf der Besandungsanlage eines ICEs

Abschätzung des Bremsweges Δx eines ICE

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot a}$$

$$\text{mit } v_0 = 300 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 83,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad v = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Mit der Annahme einer konstanten Bremsbeschleunigung $a = -1,6 \text{ m/s}^2$ (mittlerer Wert für Bremsbeschleunigung bei Not-/Schnellbremsungen) erhält man für den Bremsweg Δx :

$$\Delta x = \frac{\left(0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(83,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot \left(-1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} \approx 2168 \text{ m}$$

Die Differenz von über 600 Metern zwischen dem realen Wert (2800 m) und der vereinfachten Berechnung entsteht dadurch, dass, wie bereits erwähnt, eine konstante Bremsbeschleunigung bei der Berechnung mit der verwendeten Formel angenommen wird. Die (negative) Beschleunigung ist während des realen Bremsvorganges eines Zuges nicht konstant. Sie ist von der momentanen Geschwindigkeit des Zuges abhängig, unter anderem weil die Reibverhältnisse bei verschiedenen Relativgeschwindigkeiten zwischen den Reibpartnern teilweise sehr unterschiedlich

sind. Durch diese physikalischen Zusammenhänge ergibt sich der Unterschied zwischen dem realen und dem hier berechneten Wert. Der Wert der Bremsbeschleunigung a schwankt in der Praxis zwischen $0,5 \text{ m/s}^2$ und $2,2 \text{ m/s}^2$, jedoch sind Straßen- und U-Bahnen durchaus fähig noch höhere Bremsbeschleunigungen als $2,2 \text{ m/s}^2$ aufzubringen. Die Geschwindigkeit eines Zuges ist in der Realität an die schlechtesten zu erwartenden Wetterbedingungen angepasst und die Lokführer bekommen zusätzliche Hinweise, um in jeder Situation richtig zu handeln.

5.2 Eingesetzte Bremstypen

In den verschiedenen ICE-Generationen werden vier verschiedene Bremstypen eingesetzt: die Generatorbremse, die Scheibenbremse, die Magnetschienenbremse und die Wirbelstrombremse. Ihre Bremswirkung basiert auf ganz unterschiedlichen physikalischen Prinzipien.

Generatorbremse

Zu Beginn eines jeden Bremsvorgangs setzt man in allen ICE-Baureihen auf die generatorische Bremse, da sie eine energieeffiziente und nahezu verschleißfreie Art der Geschwindigkeitsverminderung ist. Dazu werden die Fahrmotoren genutzt. Im Grunde genommen ist ein elektrischer Fahrmotor genauso aufgebaut wie ein Generator, und im Falle des ICEs wird dieselbe Maschine als Motor und Generator verwendet (siehe Kapitel 4.2, Seite 40). Der einfache Unterschied liegt „nur“ in der Richtung der Energieumwandlung: Beim Generator wird der Läufer mechanisch, also durch die von den Rädern erzwungene Drehbewegung während der Fahrt des Zuges, angetrieben und erzeugt dadurch in den Wicklungen des Ständers (zu den Bezeichnungen siehe Kapitel 4.2, Seite 40) elektrische Energie. Wird der Motor dagegen elektrisch angetrieben, wandelt er elektrische Energie (unter anderem) in kinetische Energie um. Da der Antriebsmotor bei der Verwendung als Generatorbremse durch die Antriebssteuerung (siehe Kapitel 4.3, Seite 43) ebenso wie bei der Verwendung

Fotos: DB Systemtechnik



Fahrtwindgekühlte Bremswiderstände in Dachanordnung auf ICE-TD BR 605, Foto: DB AG

als Antrieb mit näherungsweise konstanter Leistung betrieben wird, nimmt die Bremswirkung bei sinkender Geschwindigkeit des Zuges, anders als beispielsweise bei einem Fahrraddynamo, zu (vgl. das F-v-Diagramm in Kapitel 1.1, Seite 12). Lediglich bei sehr geringen Geschwindigkeiten wird das Drehmoment so klein, dass zum vollständigen Stillstand des Zuges eine weitere Bremsart benötigt wird. Um die während der

Bremmung umgewandelte Energie „loszuwerden“, also in irgendeiner Form zu nutzen oder abzuführen, setzte man früher ausschließlich elektrische Widerstände ein. Dies hatte den bedeutenden Nachteil, dass diese Energie ausschließlich in Wärme umgewandelt wurde und somit verloren ging, soweit man sie nicht wirtschaftlich zu Heizzwecken nutzen konnte. An manchen Elektrolokomotiven, elektrischen oder dieselektrischen Triebwagen oder Zahnradbahnen kann man diese Widerstände an voluminösen „Bremslüftern“ bzw. Aufbauten auf dem Dach noch erkennen.

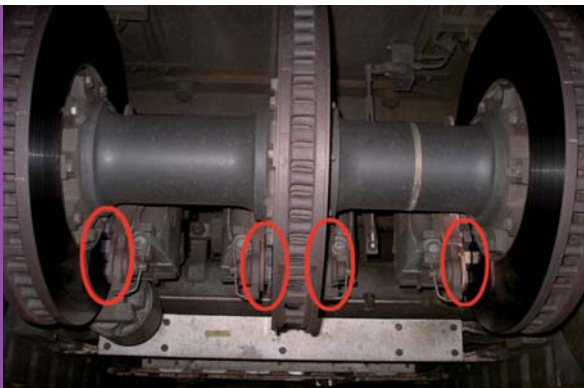
In den heutigen ICEs und bei anderen modernen Generatorbremsen wird diese Energie jedoch nicht, wie gerade beschrieben, in Wärme umgewandelt, sondern wieder zurück in das Stromnetz gespeist, da die Einsatzstrecken in Deutschland so zusammengefasst sind, dass eigentlich immer Abnehmer für die Energie

verfügbar sind. Sollten doch keine Abnehmer zur Verfügung stehen, dann kommt die Scheibenbremse anstelle der generatorischen zum Einsatz. Durch mehrere Umwandlungen im Traktionsstromrichter werden die Eigenschaften des Stroms, wie Frequenz und Spannungsamplitude, an das Oberleitungsnetz angepasst (siehe Kapitel 4.3, Seite 44). Dieser Vorgang des Rückspeisens wird auch Rekuperation genannt. In den beiden Jahren 2007 und 2009 schaffte es die Deutsche Bahn, ca. 8 Prozent ihres gesamten Strombedarfs für den Eisenbahnbetrieb, das sind immerhin ganze 820 Gigawattstunden, mit dieser Energierückgewinnung zu decken – und dieser Anteil steigt beständig. Bezogen auf eine einzelne Zugfahrt kann dieser Rückgewinn bei bis zu 40% der vom Zug aufgenommenen Traktionsenergie liegen. Neben der eigentlichen Streckenführung und dem Fahrplan kann die Fahrweise des Lokführers diesen Wert erheblich beeinflussen.

Scheibenbremse

Die wohl jedem aus dem Straßenverkehr bekannte Scheibenbremse wird auch in den ICEs eingesetzt. Bei der Scheibenbremse ist der Kräftevermittler die Reibung zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe und nachfolgend zwischen Rad und Schiene. Die Kraft wird durch die Bremsbacken auf die Bremsscheibe ausgeübt. Die Bremsscheiben sind entweder an der Radatzwelle („Wellenbremsscheiben“) oder am Radkörper („Radbremsscheiben“) befestigt.

Aufgrund der Temperaturen von bis zu 600 °C, die bei Bremsungen auftreten, verfügen die Scheibenbremsen eines Zuges zumeist über spezielle Kühlrippen im Inneren, welche die Wärme an die hindurch strömende Luft abgeben. Außerdem bestehen sie aus einem speziellen Material, wobei die Bremsscheiben selbst aus Gusseisen oder, im Falle der ICEs, aus Gussstahl und die Bremsbeläge aus einem weicheren Material wie Silicaten, Harzen oder einem weichen Metall bestehen. Es wird ein weiches Material für die Bremsbeläge benutzt, da es sich leichter abnutzt als das harte Material der Bremsscheiben und die Bremsbeläge leichter austauschbar sind als die Bremsscheiben selbst. Alle 6000 bis 8000 Kilometer werden sie überprüft. Die Bremsbeläge verschleifen relativ schnell und müssen nach Befund ausgetauscht werden. Da der Verschleiß sehr stark von der Konstruktion und vom Einsatzbereich der Züge und den eingesetzten Bremsbelägen abhängt, sind die Fristen für eine Austausch sehr unterschiedlich. Sie schwanken zwischen 6 Wochen und einem halben Jahr, im Idealfall auch bis zu einem Jahr.



Wellenbremsscheiben eines ICE 3. Die an den Bremsscheiben anliegenden Bremsbacken sind rot gekennzeichnet. Man beachte den neuen kupferfarbenen Bremsbelag ganz rechts.

Magnetschienenbremse

Reicht die Bremswirkung der elektromotorischen Bremse und der Scheibenbremse nicht mehr aus, um die vorgesehenen Bremswege einzuhalten, kommt in den ICE-Generationen 1 und 2 und beim ICE-T zusätzlich die Magnetschienenbremse ins Spiel. Sie wird üblicherweise auch in anderen schnellen Reisezügen, S-Bahnen und Straßenbahnen verwendet, also überall dort wo es auf kurze Bremswege bei vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten in Kombination mit eher „leichten“ Fahrzeugen ankommt. Das Prinzip dieser Bremsenart beruht im Allgemeinen einfach darauf, soviel Reibung wie möglich aufzubringen um so rasch wie möglich die Geschwindigkeit zu vermindern. Reibung entsteht beim Kontakt zweier Gegenstände. Es gilt, dass die Reibung um so stärker ist, d. h. der Reibwert um so größer ist, je besser die Oberfläche und das Material beider Gegenstände sich „verzahnen“.

Um sich diese Verzahnung bei der Bremsung zunutze zu machen, muss also möglichst viel Kraft auf einen Körper (Abbildung rechts: den Schleifschuh) aufgebracht werden um eben diese „Verzahnung“ mit der Schiene zu erreichen und so die kinetische Energie und als Folge daraus die Geschwindigkeit zu verringern. Die kinetische Energie wird dabei in Wärmeenergie der beiden aneinander reibenden Körper umgewandelt. Nach genau diesem Prinzip funktioniert die Magnetschienenbremse. Sie wird parallel zur Schiene zwischen den beiden Rädern eines Drehgestelles mittig aufgehängt, wobei der aus Eisen bestehende Schleifschuh während der Fahrt immer einen vorgeschriebenen Mindestabstand von mehr als 5,5 cm zur Schiene haben muss, in der Regel jedoch einen Abstand von 8 cm – 12 cm hat. Ist nun eine höhere Bremskraft erforderlich als es die übrigen Bremssysteme beim ICE leisten können, also insbesondere bei Schnellbremsungen, werden mithilfe von Druckluft die Bremschuhe bis auf wenige Millimeter an die Schiene heran geführt, dann wird ein starker Gleichstrom ($> 100 \text{ A}$) durch die Spulen hindurch geleitet. Dadurch wird der gesamte Bremsblock ein sehr starker Elektromagnet.

Diese magnetische Kraft presst das Eisen jetzt gegen die Schiene und bewirkt so eine sehr starke Reibung. Die Umwandlung der kinetischen Energie in Wärme geht aber nicht folgenlos an dem Brems Schuh vorüber: Solche Schuhe müssen regelmäßig ausgetauscht werden, da der Verschleiß recht hoch ist. Zum einen verformt sich das Metall wegen der entstehenden Hitze, andererseits wird der Belag auch einfach „abgerieben“. Wenn man sich eine solche Bremse an einem ICE einmal anschaut, fällt einem sicherlich auf, dass der Schuh aus mehreren einzelnen Segmenten besteht. Dies hat den einfachen Grund, dass ein einziges langes Stück sich durch die entstehenden Kräfte im kleinsten Bereich konvex verformen würde, so dass eine gleichmäßige Reibung auf der ganzen verfügbaren Länge nicht mehr in dem Maße vorliegen würde. Der Aufbau des Bremschuhs aus mehreren einzelnen Blöcken oder „Gliedern“ verringert dieses Problem erheblich.

Wie bereits oben genannt, wird die Magnetschienenbremse nur selten und für gewöhnlich bei Schnellbremsungen eingesetzt. (siehe Kapitel 4.2, Seite 39) Sollte sich Laub oder Eis auf den Schienen befinden, ist das für die Magnetschienenbremse, bei einer Druckkraft von 50-70 kN (entsprechend einer Gewichtskraft von 5 - 7 Tonnen) und der resultierenden Bremskraft von 35 - 40 kN (entsprechend 3,5 - 4 Tonnen) kein Problem. Unterhalb von 50 km/h reichen die konventionellen Bremsen wie die Scheibenbremsen immer aus, um den Zug zum Stillstand zu bringen. Dadurch wird auch ein zu heftiger Ruck beim Anhalten vermieden.



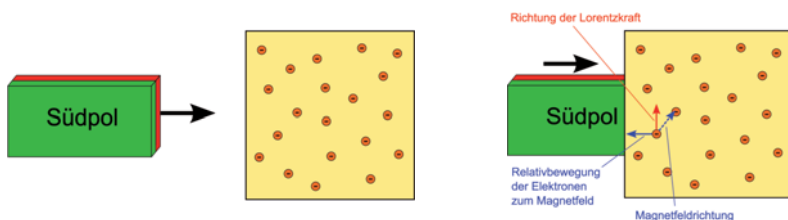
Fotos: DB Systemtechnik

Wirbelstrombremse

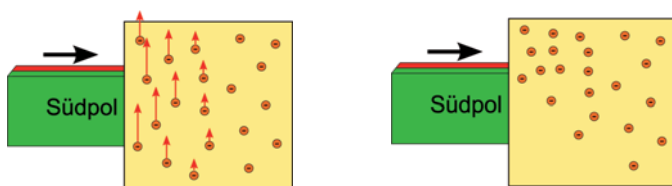
Im ICE 3 verwendet man heute eine sehr moderne und effiziente Form der Bremse, welche auf Reibung zwischen zwei Teilen verzichtet - die Wirbelstrombremse. Hier ersetzt sie die Magnetschienenbremse komplett. Sie bietet vielerlei Vorteile gegenüber anderen Bremsystemen, welche mit der Funktionsweise der Wirbelstrombremse verständlich werden.

Das Funktionsprinzip

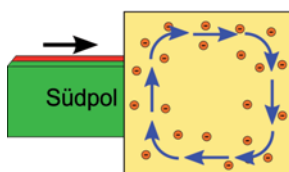
Zunächst soll an einem einfachen Beispiel das Grundprinzip beschrieben werden:



Wird ein Magnet auf eine nichtmagnetische, elektrisch leitfähige Metallplatte zu bewegt, resultiert aus der Bewegung der Elektronen im Metall relativ zum Magnetfeld eine (im Beispiel nach oben gerichtete) Kraft, welche auf die noch gleichmäßig in der Platte verteilten Elektronen wirkt. Nun wirkt diese sogenannte Lorentzkraft auf die Elektronen, die sich näher am Magneten befinden, stärker als auf die, die weiter davon entfernt sind. Dadurch entsteht auf der dem Magneten zugewandten Seite ein starker Fluss der Elektronen nach oben.

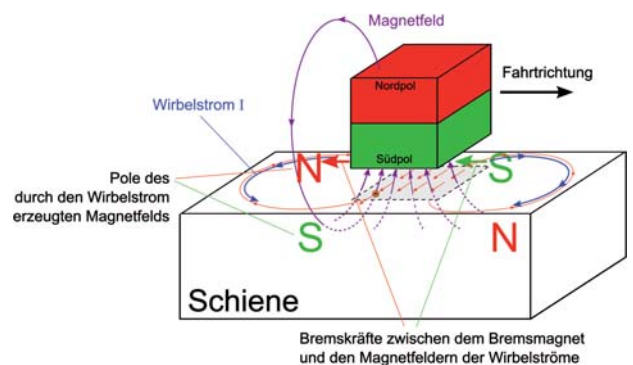


Um den entstehenden Ladungsunterschied in der Platte wieder auszugleichen, fließen die Elektronen auf der rechten Plattenseite nach unten. So entsteht durch die Ablenkung der Elektronen im Magnetfeld ein Kreisstrom, der Wirbelstrom.



Dieser kreisförmig fließende Strom erzeugt seinerseits wieder ein Magnetfeld. Die Lenzsche Regel (siehe Kapitel 4.1, Seite 39) besagt, dass dieses induzierte Magnetfeld so gerichtet ist, dass es seiner Ursache - der Annäherung des Magneten - entgegen wirkt, die Bewegung des Magneten also abbremst.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht diese Bremswirkung: Hier zeigt der Südpol eines Bremsmagneten zum Gleis hin. Aufgrund der Relativbewegung der Elektronen im Gleis zum Magnetfeld (hier nach links) werden sie im Einflussbereich des Magnetfelds durch die Lorentzkraft an die vorne liegende Seite der Schiene gedrängt. Außerhalb dieses Bereichs fließen sie auf beiden Seiten zurück. Bei der Anwendung am ICE geschieht dies, siehe unten, zum Großteil im Einflussbereich des nächstfolgenden, entgegengesetzt gepolten Bremsmagneten.

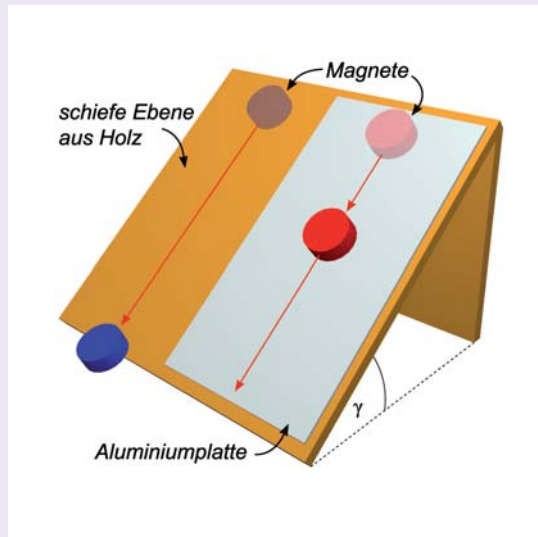


Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer Wirbelstrombremse

Diese Kreisströme erzeugen, ähnlich einem Elektromagneten, Magnetfelder, deren Orientierung in der Skizze durch die Angabe von Nord- und Südpol dargestellt ist. Aus der Lage dieser Pole relativ zum Bremsmagneten resultiert auf beiden Seiten eine abbremsende Wirkung.

Die Wirbelstrombremse im Experiment:

Dazu benötigt man wie in der Abbildung gezeigt einen starken scheibenförmigen Magneten und ein ebenes und möglichst glattes Holzbrett. Dieses belegt man etwa zur Hälfte mit mehrfach zusammengefalteter und glatter Aluminiumfolie (oder besser einer Aluminiumplatte). Nun stellt man das Brett mit der Alufolie in einem nicht zu steilen Winkel bis ca. 45 Grad auf. Anschließend lässt man den Magneten auf den beiden Materialien hinunter rutschen. Bei dem Experiment sollte man deutlich erkennen, dass der Magnet auf der Aluminiumfläche merkbar langsamer rutscht als auf der Holzfläche. Nach dem Prinzip dieses Versuchs funktioniert auch eine Wirbelstrombremse.

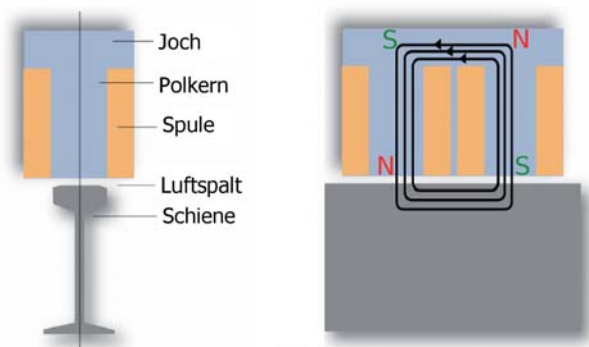


Grafiken: Goethe-Gymnasium, Knorr Bremse, Georg-August-Universität, Göttingen, modellachterbahn.de

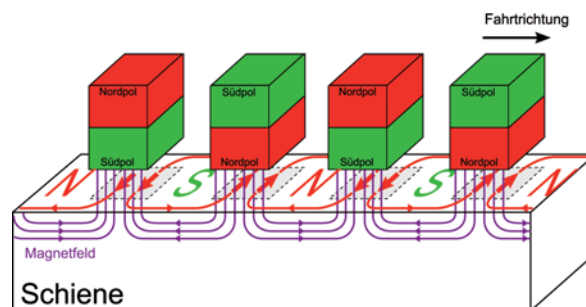
Die konkrete Realisierung in den ICEs

Die beiden untenstehenden Abbildungen zeigen, wie dieses Bremsprinzip im ICE 3 realisiert ist, wo mithilfe der Wirbelstrombremse große Bremskräfte erzeugt werden. Bewegt sich das zwischen dem Nord- und dem Südpol zweier entsprechend angeordneter, benachbarter Spulen aufgebaute starke Magnetfeld eines Elektromagneten über die Schiene, werden in ihr Wirbelströme induziert. Diese Ströme erzeugen selbst wieder ein Magnetfeld, dessen Wirkung seiner Ursache, in diesem Fall der Bewegung des einwirkenden Magnetfeldes, entgegen gerichtet ist - also eine Kraft, welche die Bewegung des Zuges bremst.

Der elektrische Widerstand der Schiene ist für die Wirbelströme ein ohmscher Verbraucher. Durch ihn wird die in elektrische Energie umgewandelte Bewegungsenergie schließlich in Wärme umgesetzt. Die Magnetisierbarkeit der Schiene spielt dabei keine wesentliche Rolle, vor allem die elektrische Leitfähigkeit ist entscheidend. Zusammenfassend sieht man, dass die Wirbelstrombremse nicht durch Reibung, sondern über die Kräfte zwischen einem eingebrachten und einem resultierenden Magnetfeld wirkt.



Prinzipieller Aufbau der Bremsmagnete einer Wirbelstrombremse



Schematische Darstellung der Funktion einer Wirbelstrombremse beim ICE 3

Aufbau der Wirbelstrombremse im Vergleich zur Magnetschienenbremse

Der prinzipielle Aufbau einer Wirbelstrombremse ist relativ einfach: Wie in der Magnetschienenbremse sind auch hier Elektromagnete vorzufinden, die mittig zwischen den Rädern im Drehgestell aufgehängt sind. Vom Aussehen her sind sie auch relativ ähnlich, es gibt aber zwei bedeutende Unterschiede zwischen Magnetschienenbremse und Wirbelstrombremse: Wie beschrieben wird bei der Magnetschienenbremse die Bremsverzögerung mit Hilfe der Reibung des Bremschuhs auf der Schiene, erzeugt durch die reine magnetische Anziehungskraft zwischen Brems Schuh und Schiene, erreicht.

Bei der Wirbelstrombremse erfolgt dagegen kein materieller Kontakt zwischen Elektromagnet und Schiene. Hier werden die Magnetblöcke lediglich bis auf etwa 5-7 mm Abstand zur Schiene herabgesenkt und die Wirbelströme in der Schiene durch das Magnetfeld induziert. Dies hat den angestrebten Vorteil, dass die Wirbelstrombremse auch bei nassen Schienen oder Herbstlaub auf der Schiene zuverlässig arbeitet, da der verminderte Haftungsreibungswert auf den Schienen hier nicht von Bedeutung ist. Ferner ist die Bremskraft der Wirbelstrombremse im Unterschied zur Magnetschienenbremse durch Regelung der Stromzufuhr stufenlos steuerbar. Damit ist die Wirbelstrombremse auch gut für Betriebsbremsungen geeignet. Diese Methode zur Bremsung wird aufgrund des nicht vorhandenen Verschleißes auch in vielen anderen alltäglichen Bereichen eingesetzt. Neben Bahnfahrzeugen wird die Wirbelstrombremse beispielsweise auch in Fitnessgeräten und sogar in Fahrgeschäften in Freizeitparks, sprich in Achterbahnen oder Free-Fall Türmen, eingesetzt.

Einsatzmöglichkeiten auf den Strecken: Vor- und Nachteile

Bei einer starken Bremsung mit der Wirbelstrombremse kann die Temperatur in der Schiene um bis zu 5 °C steigen. Dadurch können an einem heißen und sonnigen

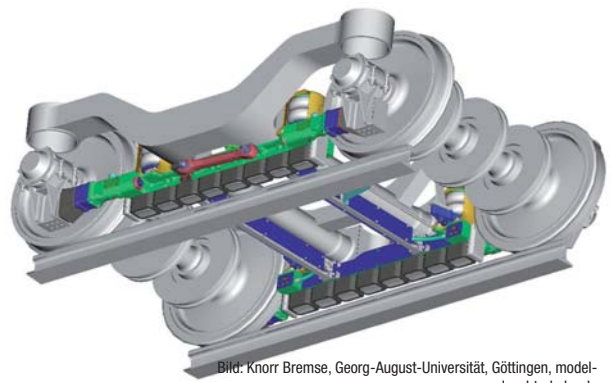


Bild: Knorr Bremse, Georg-August-Universität, Göttingen, model-lauchterbahn.de

Sommertag, bei einer normalen Schienentemperatur von ca. 60 °C, schon Temperaturen von bis zu 70 °C nach mehreren Bremsungen an der gleichen Stelle erreicht werden. In Schottergleisen könnte bei noch höheren Temperaturen durch die steigende Druckspannung in den Schienen die Gleislagestabilität beeinträchtigt werden. Im Gegensatz zur Magnetschienenbremse entsteht hier die Wärme durch die Wirbelströme nicht nur an der unmittelbar gegenüberliegenden Oberfläche der Schiene. Bei der Magnetschienenbremse entsteht lediglich an der Lauffläche des Gleises eine allerdings kurzzeitig sehr hohe Temperatur. Diese wird durch die Umgebungsluft relativ rasch abgebaut. Die Wärme, die bei Wirbelstrombremsungen in der gesamten Schiene entsteht, wird nicht so rasch an die Umgebung abgegeben und bleibt deutlich länger gespeichert. Die Stärke der Wirbelstrombremse ist daher zur Vermeidung zu hoher Wärmeeinträge auf einen bestimmten Wert begrenzt. Zudem können die zur Bremsung benötigten Magnetfelder der Wirbelstrombremse auch Störungen in Teilen der Sicherheitstechnik, vor allem bei Achszählkontakten, die am Gleis montiert sind (vgl. Kapitel 8.3, Seite 71), verursachen.

Um diese zwei Probleme zu beherrschen, müssen die betroffenen Strecken speziell für dieses System erüchtigt werden. So kann der Einsatz von festen Bahnhöfen die hitzebedingte Neigung zur Verwerfung der Gleise durch den Einsatz der Wirbelstrombremsen wirksam verhindern, und moderne Bauarten von Achszählkontakten sind wirbelstromfest.

Weitere Bremstypen

Neben den im Schienenverkehr bewährten Bremsen gab und gibt es noch zahlreiche mehr oder weniger erfolgreiche Ansätze, die die Geschwindigkeit eines Zuges zu vermindern. Zum einen gab es in Japan Experimente, Hochgeschwindigkeitszüge durch Luftwiderstand zu bremsen. Dabei wurden große Flächen, die auf dem Dach des Zuges angebracht waren, nach außen geklappt und so der Luftwiderstand vergrößert. Obwohl dieser aerodynamischen Bremsen durchaus wirksam sind, wurden sie in der Praxis nie eingesetzt, da es zu große Lärmbelastigungen gab, sie sehr stark ge-

schwindigkeitsabhängig waren und viel Platz benötigt wurde. Einen anderen Ansatz - das Prinzip der Gegenkraft durch „Schubumkehr“ - machen sich zum einen hydraulisch wirkende Bremsen bei Dieselfahrzeugen bei den dort oft verwendeten hydraulischen Getrieben zunutze. Zum anderen gab es bei der klassischen Dampflok ein solches Verfahren, das vor allem bei Lokomotiven in Gebirgsregionen angewandt wurde. Hier wurde Luft angesaugt und in den Zylindern entgegen der Bewegungsrichtung der Kolben verdichtet, die Fahrt also dadurch verzögert.

5.3 Bremsmanagement

Das Bremsen beispielsweise des ICE 3 geschieht mit Hilfe einer Kombination der drei dort installierten Bremsysteme. Als erstes wird normalerweise die Generatorbremse benutzt, da diese die Möglichkeit zur Energierückgewinnung bietet. Mit der Generatorbremse sind aber nur Bremsbeschleunigungen von bis zu $0,6 \text{ m/s}^2$ zu realisieren. Außerdem hängt ihre Wirkung von der möglichen Reibung zwischen Rad und Schiene mit allen ihren Einflüssen und damit auch von der Geschwindigkeit ab. Sind größere Bremsbeschleunigungen für den Zug erforderlich, wird entweder die druckluftgesteuerte Scheibenbremse an den nicht angetriebenen Radsätzen oder die Wirbelstrombremse hinzugenommen. Beide werden elektronisch angesteuert, jedoch wird die Wirbelstrombremse überall dort, wo sie eingesetzt werden darf, bevorzugt.

Insbesondere auf den teilweise stark geneigten Neubaustrecken wird die Wirbelstrombremse regelmäßig verwendet, und erst wenn auch die durch beide Bremsen erzeugte Verzögerung nicht mehr ausreicht oder eine Bremse gerade technisch nicht verfügbar ist, kommt die Scheibenbremse hinzu. Die Kombination aller drei Bremsen kann so bei Notbremsungen maximale Verzögerungen von ca. $1,6 \text{ m/s}^2$ (Mittelwert) erreichen. Auf speziell dafür geeigneten Neubaustrecken wird die Wirbelstrombremse wegen der Möglichkeit, den Verschleiß an den Scheibenbremsen zu vermeiden sogar anstelle der Scheibenbremsen als Betriebsbremse verwendet. Hier tritt die pneumatische Scheibenbremse erst im Fall von Not- und Zwangsbremsungen zusätzlich in Aktion.

Neben den genannten Möglichkeiten gibt es zudem noch eine sehr simple Art einen Zug negativ zu beschleunigen, nämlich das Ausnutzen der natürlichen Fahrwiderstände (z. B. Luftwiderstände, Rollwiderstände, Neigungswiderstände). Das heißt, dass der Zug einfach „sich selbst überlassen“ wird und so seine Geschwindigkeit, wie beispielsweise ein rollendes Fahrrad, vermindert. Dieses planmäßige „Ausrollen lassen“ wird auch tatsächlich sehr häufig praktiziert, um Energie zu sparen. Die auf diese Weise antriebslos zurückgelegte Strecke kann vor Haltebahnhöfen durchaus in der Größenordnung von 50 km liegen, wenn günstige Verhältnisse vorliegen. Ein ICE kann sich, beispielsweise auf der Strecke nach Hannover, so lange „Ausrollen lassen“, da sein Fahrwiderstand relativ gering ist. Hiermit steht auch ein Puffer zur Verfügung, um im Falle einer Verspätung wieder Fahrzeit gutzumachen: Dann wird auf dieses Ausrollen verzichtet. Diese Möglichkeit der Geschwindigkeitsverringerung kann natürlich nicht genutzt werden wenn ein Vorsignal die Bremsung verlangt. (Mehr hierzu in Kapitel 8.3, Seite 71).

Was riecht im Zug, wenn dieser bremst?

Wenn man oft mit dem Zug fährt, dürfte einem das Phänomen bekannt sein: Bei manchen Bremsungen riecht es seltsam im Inneren des Zuges oder auch am Bahnsteig, wenn der Zug hält.

Verantwortlich dafür sind die Scheibenbremsen, die jedoch nicht bei jeder Bremsung massiv zum Einsatz kommen (weshalb es auch nicht bei jeder Bremsung zu dieser Geruchsentwicklung kommt). Um genau zu sein, sind die sich erheizenden und dabei ausdampfenden Bremsbeläge dafür verantwortlich, die, wie bereits erwähnt, aus Harzen, Silicaten oder besonderen Metallen bestehen. Der Geruch ist jedoch, obwohl er sehr unangenehm sein kann, gesundheitlich unbedenklich.

Reicht der Abstand Vorsignal – Hauptsignal aus?

Der Abstand zwischen Vorsignal und Hauptsignal beträgt auf Hauptstrecken 1000 Meter. Die maximale Geschwindigkeit im Hauptsignal-/Vorsignalsignal-System ist 160 km/h, also rund $44,4 \text{ m/s}$. Nun stellt sich die Frage, welche Bremsbeschleunigung nötig ist, um den Zug zum Stillstand zu bringen, und ob diese im Rahmen von „normalen“ Betriebsbremsungen liegt. Um die erforderliche Bremsbeschleunigung herauszufinden, stellt man folgende Formel nach der Bremsbeschleunigung a um:

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot a} \Leftrightarrow a = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \cdot \Delta x}$$

Nach dem Einsetzen obiger Werte ergibt sich eine Bremsbeschleunigung von ca. $0,99 \text{ m/s}^2$. Dies ist ein für Betriebsbremsungen eher hoher Wert.

Kapitel 6

Rad und Schiene



Bild: DB AG

6.1 Aufbau des Rades

Der Radsatz eines ICEs besteht im Kern aus zwei Komponenten: Zum einen aus der Radsatzwelle, die mit der Achse eines PKW verglichen werden kann, und zum anderen aus den aufgespressten Rädern, die entweder aus Radscheiben mit tauschbaren Radreifen oder aus Vollrädern, wie es beim ICE der Fall ist, bestehen.



Bilder: Bochumer Verein Verkehrstechnik

Der Ursprung eines Rades sind Stahlbrammen, die in gleich lange Blöcke geschnitten werden. Diese Blöcke werden anschließend auf eine Temperatur von 1300 °C erhitzt und in mehreren komplexen Schritten geschmiedet. Nach der folgenden mechanischen Feinbearbeitung werden die Räder auf die Radsatzwelle aufgespresst. Das Aufpresen der Räder kann mit der Reifenmontage eines PKWs verglichen werden. Jedoch werden hier die Reifen nicht mit Hilfe von Schrauben festgehalten. Vielmehr werden die Räder unter hohem Druck auf die Achse gepresst, welche ein gewisses Übermaß hat, und sitzen dann sehr fest auf der Radsatzwelle. Anschließend wird der fertige Radsatz auf etwaige Fehler, wie zum Beispiel Risse im Material oder Unebenheiten auf der Oberfläche, untersucht und daraufhin mit einer Produktionsnummer versehen. Vielfach werden vor den Rädern auch noch Bremsscheiben auf die Radsatzwelle gebracht. Auf die äußeren Achsschenkel werden die Radsatzlager und anschließend deren Gehäuse montiert.

Herstellungsprozess eines Radsatzes



1 Pressen, Walzen und Vermessen eines Vollrades



2 Nachbearbeitung im Härteofen



3 Ultraschallprüfung des Radkranzes (Tauchttechnik)



4 Konturschmieden einer Radsatzwelle



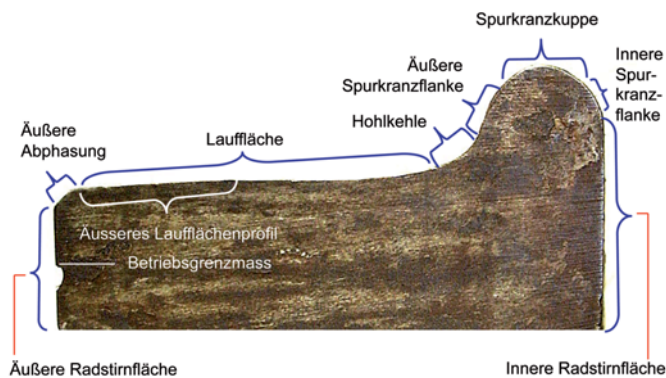
5 Wärmebehandlung von Radsatzwellen



6 Aufpresen eines Rades

Aufbau eines Rades

Eines der markantesten Merkmale eines Eisenbahnrades sind die Radprofile. Diese zeichnen sich vor allem durch die verschiedenen geneigten Laufflächen, die Hohlkehlen und die Spurkränze aus. Als Lauffläche bezeichnet man die Auflagefläche der Räder auf den Schienen.



Die Neigung der Lauffläche ist die Ursache für den Sinuslauf. Der Sinuslauf eines Schienenfahrzeuges ist der Grund dafür, dass der Zug ohne weitere „Hilfsmittel“ auf den Gleisen bleibt. Da dies ein zentrales Merkmal der Spurführung ist, wird der Sinuslauf in Kapitel 6.2, Seite 57 detailliert beschrieben. Die Hohlkehle ist der kreisförmige Übergangsbereich der geneigten Lauffläche hin zum Spurkranz. Dieser Spurkranz kann als Absicherung des Sinuslaufes bezeichnet werden, da er die Querbewegung der Räder im Gleis begrenzt und den Zug sicher auf den Gleisen hält. Des Weiteren unterstützt er den Zug bei Kurvenfahrten.

Radverschleiß

Ständig wirkende Kräfte beim Abrollen, Bremsen, Beschleunigen und Befahren von Gleisbögen führen zu einem permanenten Verschleiß. Dabei kann man zwei verschiedene Verschleißtypen unterscheiden, zum

Bilder: Bochumer Verein Verkehrstechnik, DB Systemtechnik



Rad mit Verschleißspuren (links) und neues Rad (rechts)

einen den Gleisverschleiß und zum anderen den Radverschleiß. Den Radverschleiß kann man in zwei weitere Gruppen unterteilen. Der Laufflächenverschleiß wird vor allem bei geraden Fahrten mit hoher Geschwindigkeit und beim Beschleunigen beziehungsweise beim Bremsen hervorgerufen. Typische Merkmale dieser Art von Verschleiß sind Änderungen in der Neigung der Laufflächen.

Der ständige Abrieb von Metall an den Laufflächen hat zur Folge, dass der Spurkranz immer höher wird. Diese stetig anwachsende Spurkranzhöhe dient als Indikator des Laufflächenverschleißes. Die zweite mögliche Verschleißart, die bei einem Eisenbahnrad auftreten kann, ist der Spurkranzverschleiß, der besonders bei Kurvenfahrten hervorgerufen wird. Diese Art von Radverschleiß kann an dem stets dünner und steiler werdenden Spurkranz erkannt werden.

Der Gleisverschleiß hingegen wird durch das ständige Befahren der Schienen mit großen Lasten hervorgerufen. Aus diesem Grund sind die Schienen auf Eisenbahnstrecken meist aus härterem Metall als die Eisenbahnräder, da es ein geringerer Aufwand ist, ein Eisenbahnrad zu erneuern als die kompletten Schienen auszutauschen. Da übermäßiger Verschleiß den Fahrkomfort und schlimmstenfalls die Fahrsicherheit des ICEs beeinträchtigen kann, ist die Wartung von Streckennetz und Rad ein zentrales Thema der Deutschen Bahn. So werden zum Beispiel die Schienen, die von Schnellzügen befahren werden, in regelmäßigen Intervallen von 2 Jahren neu geschliffen. Die Liegedauer von ICE-Gleisen beträgt je nach Belastung 8 bis 20 Jahre. Nach dieser Zeit werden die Schienen auf Nebenstrecken verlegt, bei denen die Beanspruchung der Gleise nicht so stark ist.

Da die ICE-Räder einer stetigen Belastung unterliegen und damit der Verschleiß spürbar ist, werden die ICE-Räder etwa alle 300.000 Kilometer, was einem Intervall von circa 8 Monaten entspricht, auf Unterflurdrehbänken im eingebauten Zustand bearbeitet und das ursprüngliche Radprofil wieder hergestellt. Diese sogenannte Reprofilierung auf der Unterflurdrehbank hat den Vorteil, dass trotz der Maßnahme der Radsatz nicht ausgebaut werden muss, was eine enorme Zeiteinsparung zur Folge hat. Die maximale Laufleistung eines ICE-Rades bis zum Erreichen des kleinsten zulässigen Durchmessers beträgt ungefähr 1.000.000 Kilometer, was einer Lebensdauer von zwei bis drei Jahren entspricht. Durch die beschriebenen Wartungsmaßnahmen kann eine stets risikofreie Fahrt mit einem ICE gewährleistet werden.

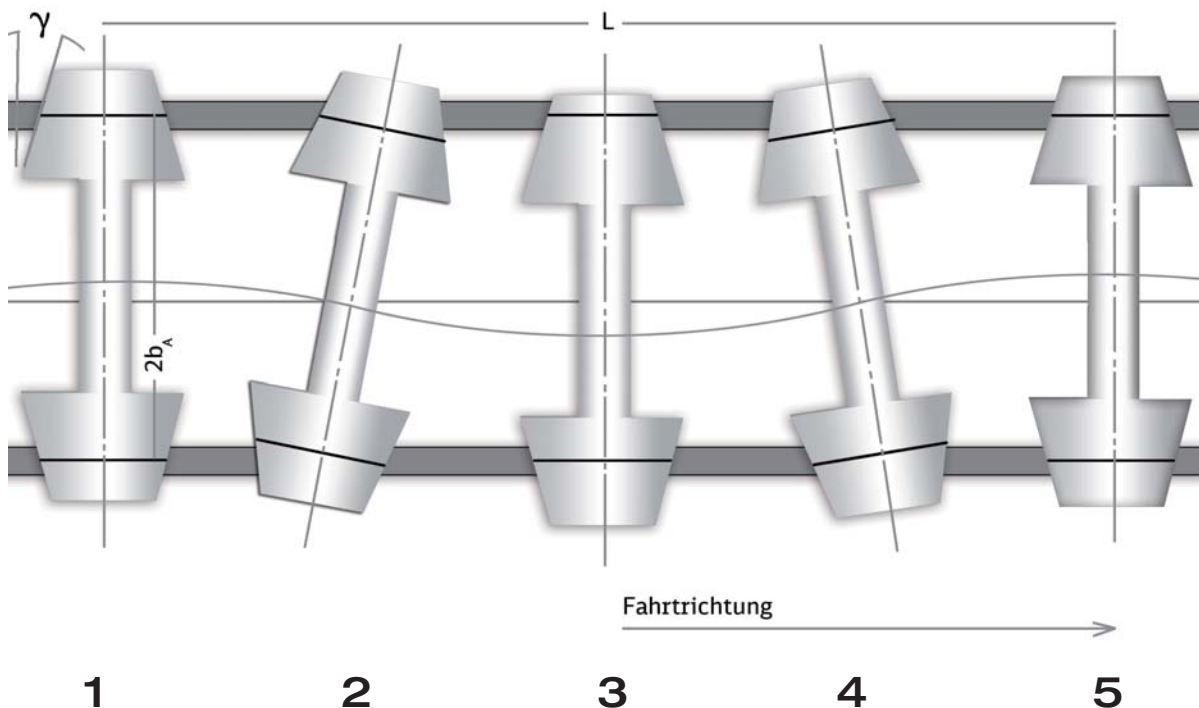
6.2 Sinuslauf

Anders als von den meisten Menschen gedacht, halten grundsätzlich nicht die Spurräder, sondern der Sinuslauf den Zug sicher auf den Gleisen. Dieser Sinuslauf wird im Wesentlichen durch das Profil der Räder hervorgerufen.

Beschreibung eines Sinuslaufes

Die Ursachen für den sinusförmigen Lauf eines Radsatzes im Gleis sind sowohl die Rad- als auch die Gleisprofile. Die beiden konisch profilierten, also sich nach außen verjüngenden Räder sind mit einer starren Achse verbunden. Aufgrund dieser Starrachse sind die Winkelgeschwindigkeiten der beiden Räder gleich groß. Wenn der Radsatz genau mittig zwischen den beiden Schienen liegt, sind auch die Laufkreisdurchmesser (Durchmesser des Rades in der Laufkreisebene) der beiden Räder gleich groß. Dies hat zur Folge, dass die Räder während einer gemeinsamen Umdrehung die gleiche Strecke zurücklegen.

Befindet sich der Radsatz jedoch außerhalb der idealen Gleismitte (Situation 1), sind diese Laufkreisdurchmesser nicht mehr gleich groß. Während einer Umdrehung der Achse legt das nach außen verschobene Rad aufgrund seines größeren Umfanges beim Rollen eine größere Strecke zurück, es „überholt“ sozusagen das andere Rad (siehe Situation 2). Dadurch liegt die Achse nicht mehr senkrecht zu den Schienen, was schließlich dazu führt, dass kurz danach das andere Rad in die Position kommt, in der es wegen seiner Verschiebung in die andere Richtung nach außen den weiteren Weg zurücklegt (Situation 3). Dieser Zyklus wiederholt sich.



Der Radsatz befindet sich in einer außermittigen Position (In diesem Falle nach oben verschoben).

Daher ist auf Grund der konischen Lauffläche der Räder der Radius beim oberen Rad größer als beim unteren. Dies hat zur Folge, dass das obere Rad das untere sozusagen überholt.

Das obere Rad fährt auf dem kleinsten Radius, das untere auf dem größten.

Hier wird nun, wie bei Abschnitt 2, das Rad mit dem kleineren Laufkreisradius (oben) vom Rad mit dem größeren Laufkreisradius (unten) überholt.

Die beiden Räder befinden sich wieder in ihrer Ausgangslage.

Beispielrechnung: Durchschnittliche Wellenlänge des Sinuslaufs eines ICE 3

Die während eines Zyklus dieses Sinuslaufs zurückgelegte Strecke bezeichnet man als die Wellenlänge L des Sinuslaufs. Für sie erhält man

$$L = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{750 \text{ mm} \cdot r}{\tan \gamma}}$$

wobei r den mittleren Laufkreisradius und γ den Neigungswinkel der Laufflächen bezeichnet. Der in dieser Formel verwendete Wert von 750 mm gilt für die in Deutschland übliche Spurweite von 1435 mm. Für die durchschnittliche Wellenlänge L des Sinuslaufes eines ICEs erhält man damit:

$$L = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{750 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm}}{\tan 2,8^\circ}} = 16505 \text{ mm}$$

also rund 16,5 m.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich trotz hoher Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h und mehr die Wellenlänge des Sinuslaufes eines ICEs im Vergleich zu geringeren Geschwindigkeiten nicht verändert. Die Frequenz des Sinuslaufes nimmt dagegen mit steigender Geschwindigkeit zu, da die gleiche Wellenlänge dann in kürzerer Zeit durchlaufen wird.

Versuchsbeschreibung eines Sinuslaufes zum Nachbauen

Um den Sinuslauf nachvollziehen zu können, benötigt man zwei Joghurtbecher, bei denen der Boden einen geringeren Radius als der Deckel haben muss. Des Weiteren benötigt man zwei Holzleisten und einen Zylinder (z. B. eine Küchenpapierrolle). Als erstes klebt man die beiden Becher so zusammen, dass jeweils die Fläche mit dem kleineren Radius außen liegt. Anschließend imitiert man mit den beiden Holzleisten die Eisenbahnschienen und lässt zuerst den Zylinder hinunter rollen. Man bemerkt, dass es unvorteilhaft wäre eine zylindrische Lauffläche bei Schienenfahrzeugen zu verwenden, da die sichere Spurführung dadurch nicht gewährleistet werden könnte. Nun wiederholt man diesen Versuch mit den beiden Joghurtbechern. Mit diesem Versuch lässt sich der Grund für die konischen Laufflächen bei Schienenfahrzeugen demonstrieren: Durch ihren sinusförmigen Lauf bleiben die Joghurtbecher von selbst auf den „Schienen“.

Bilder: Goethe-Gymnasium



6.3 Kurvenfahrt und Kurvenüberhöhung

Der Sinuslauf trägt auch zur Richtungsänderung in Kurven bei. Kurvenüberhöhungen erlauben es zudem, Kurven mit höheren Geschwindigkeiten zu durchfahren.

Damit ein Fahrzeug um die Kurve fährt, muss eine Kraft, die Zentripetalkraft, auf es einwirken, da es sich sonst gleichförmig weiterbewegen würde (Trägheitssatz). Da sich der Zug, wenn er in eine Kurve einfährt, zunächst geradeaus weiterbewegen möchte, werden die bogen- außen laufenden Räder auf Grund des Radprofils stärker in Richtung des größer werdenden Raddurchmessers bzw. des Spurkranzes auf der Schiene laufen und daher einen noch größeren Weg als beim normalen Sinuslauf im geraden Gleis zurücklegen. Dies führt zur gewünschten Richtungsänderung in der Kurve. Bei enger werdenden Kurven verschiebt sich der Radaufstandspunkt immer mehr in Richtung Spurkranz und aufgrund der Geometrie des Radprofils wird die auf die Räder wirkende Zentripetalkraft immer größer. Für die zum Durchfahren einer Kurve nötige Zentripetalkraft gilt:

$$F_z = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

F_z = Zentripetalkraft
 m = Masse des Körpers (Fahrzeuges)
 v = Geschwindigkeit
 r = Radius der Kreisbahn

Diese Kraft führt den Zug durch die Kurve und wird von mitfahrenden Passagieren als Zentrifugalkraft wahrgenommen, welche sie nach außen drückt. Um nun diese auf den Zug und die Fahrgäste wirkende Kraft nicht zu groß werden zu lassen, sind die Gleise in Kurven meist überhöht, die äußere Schiene liegt dabei höher als die innere Schiene. Dadurch trägt gewissermaßen ein Teil der Gewichtskraft zur Zentripetalkraft bei. So wird auch die wahrgenommene Zentrifugalkraft reduziert. Ist der Neigungswinkel des Gleises in der Kurve so gewählt, dass beim vorliegenden Kurvenradius und einer bestimmten Geschwindigkeit, der sogenannten Ausgleichsgeschwindigkeit, die Zentripetalkraft allein durch diese Kurvenüberhöhung aufgebracht wird, spüren auch die Fahrzeuge und die Passagiere keine seitlichen Kräfte mehr. Dieser Winkel kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{r \cdot g}$$

α = Neigungswinkel
 v = Geschwindigkeit
 r = Kurvenradius
 g = Erdbeschleunigung

Die maximale Kurvenüberhöhung wird jedoch von der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung auf 180 mm eingeschränkt, da jederzeit ein Halt möglich sein muss, ohne dass ein Zug beim Wiederanfahren nach innen kippen könnte. Dies entspricht einer Neigung von 12,5 % bzw. einem Neigungswinkel rund 7°. Neben diesem absoluten Grenzwert wird zusätzlich zwischen Schot-

teroberbau und fester Fahrbahn sowie den auf der Strecke verkehrenden Zugtypen unterschieden. Überhöhungen können nicht schlagartig mit Beginn einer Kurve eingebaut werden, sondern werden durch sogenannte Überhöhungsrampen am Anfang und Ende einer Kurve aufgebaut. Die Höchstgeschwindigkeit von Zügen ist in der Regel größer als die Ausgleichsgeschwindigkeit in den Kurven. Aus dieser Differenz der Überhöhung, die nötig wäre, um den Zug bei zulässiger Höchstgeschwindigkeit ohne Querkräfte die Kurve durchfahren zu lassen, und der maximal erlaubten Überhöhung ergibt sich der Überhöhungsfehlbetrag, der 150 mm nicht überschreiten soll. Dieser Betrag ist zusätzlich ein Maß für die resultierenden Querkräfte (als Zentrifugalkräfte wahrgenommen), denen Mitfahrende ausgesetzt sind.

Möchte man noch schneller durch Kurven fahren, so muss man die durch den Fahrgast gefühlte Zentrifugalkraft auf den Wert begrenzen, der bei maximalem Überhöhungsfehlbetrag entstünde. Dies ist möglich, indem man den Wagenkasten des Zuges aktiv gegenüber dem Gleis bzw. dem Fahrwerk weiter zum Kurveninneren hin neigt (Neigetechnik). Mit Hilfe dieser Technik sind Überhöhungsfehlbeträge bis zu 280 mm möglich, wovon der Reisende nur 150 mm „spürt“. Über eine solche Technik verfügen die ICE-T der Baureihen 411 und 415 sowie die dieselgetriebenen ICE der Baureihe 605.

Auf den Zug wirkt neben seiner Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ die Kraft F_N , welche das Gleis – senkrecht zur Gleislage – auf ihn ausübt. Im Idealfall, d. h. wenn der Zug ohne weitere Querkräfte durch die Kurve geführt wird, ergibt die Summe der Kräfte F_G und F_N die genau radial nach innen gerichtete Kraft F_{rad} , deren Betrag der benötigten Zentripetalkraft entspricht (vgl. die Abbildung in Kapitel 8.2, Seite 69). Dann ist

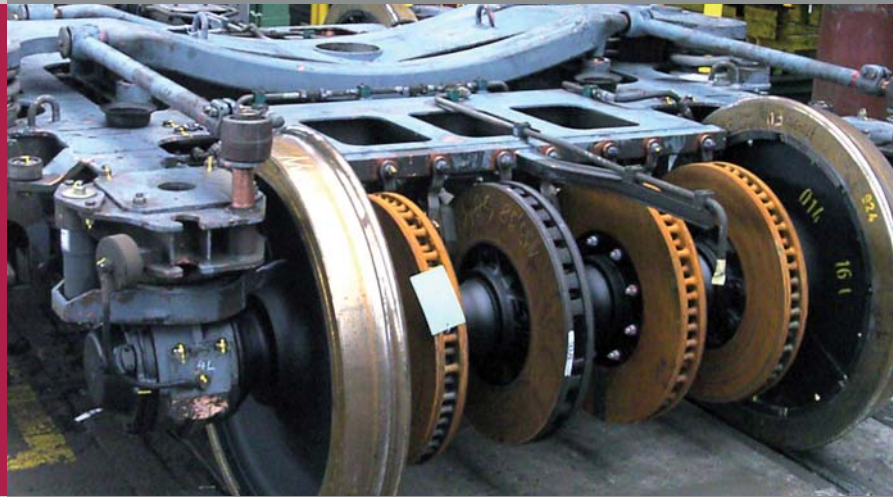
$$F_{rad} = F_G \cdot \tan \alpha = m \cdot g \cdot \tan \alpha = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Für den benötigten Neigungswinkel des Gleises gilt also

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{g \cdot r}$$

Kapitel 7

Drehgestelle



7.1 Anforderungen an das Drehgestell

Das Drehgestell ist das Laufwerk eines ICE, auf dem der Wagenkasten ruht. Es besteht unter anderem aus dem Drehgestellrahmen, Radsätzen, Federn und Bremsen. Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Drehgestellen, zum einen die Triebdrehgestelle und zum anderen die Laufdrehgestelle.

An bzw. in den Triebdrehgestellen der ICE-Züge sind Motoren angebracht, welche den Zug antreiben. Die Laufdrehgestelle haben keinen Antrieb. An jedem Drehgestell des Zuges sind Bremsen befestigt: bei Triebdrehgestellen mechanische Bremsen und Generatorbremsen in Form der Motoren und bei Laufdrehgestellen mechanische Bremsen und Magnetschienen- oder Wirbelstrombremsen (siehe Kapitel 5.2, Seite 49). Die Konstruktion des Drehgestells ist für den stabilen Lauf des Zuges im Gleis von wesentlicher Bedeutung. Der bei der Fahrt entstehende Sinuslauf steigert seine Frequenz mit wachsender Fahrgeschwindigkeit und führt irgendwann zur Instabilität, d. h. zum „Flattern“ des Drehgestells um seinen Drehpunkt und damit zum Schlingern des Fahrzeuges. Diese Bewegung wird durch die Schlingerdämpfer zwischen Drehgestell und Wagenkasten abgedämpft, wodurch die Stabilität des

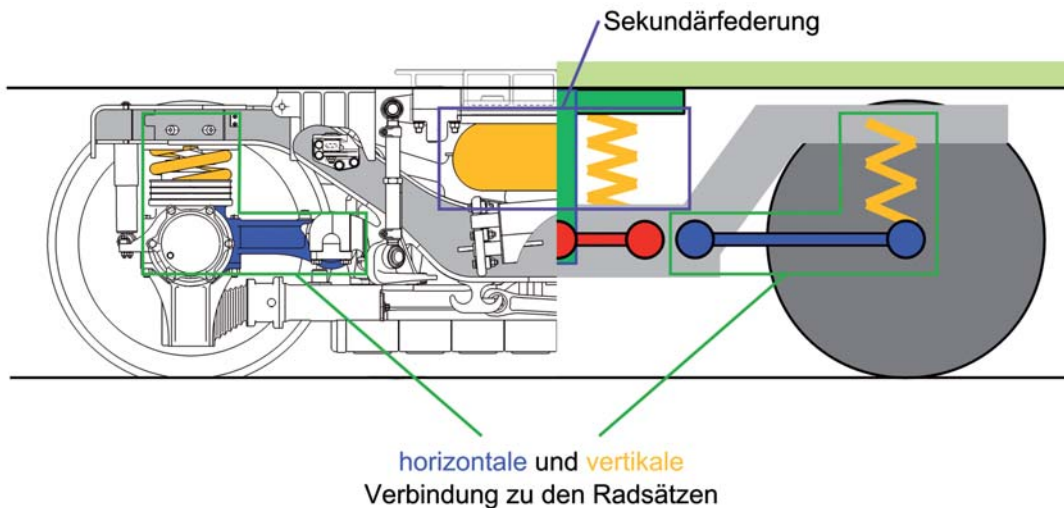
Fahrzeugs auch bei hohen Geschwindigkeiten gewährleistet wird. Ein ICE-Drehgestell wird spätestens alle 1,4 Millionen Kilometer vom Zug abmontiert und in die Einzelteile zerlegt. Danach wird es gereinigt und anschließend auf Risse und sonstige Schäden untersucht. Sollten Schäden gefunden werden, werden diese behoben und die Teile nach der Reparatur dann wieder eingebaut. Wenn die Schäden zu gravierend sind, werden neue Teile verwendet. Nach der Risskontrolle wird das Drehgestell neu beschichtet und weiter verwendet. Die Lebensdauer eines Drehgestells sollte mindestens 30 Jahre, was der Lebensdauer eines Zuges entspricht, betragen. Dies wird schon vor Verwendung des Drehgestells in speziellen Laboren unter Überlast-Bedingungen getestet. Mit diesen Extrembedingungen werden in einigen Wochen die Belastungen von 30 Jahren auf das Drehgestell gebracht.



Bilder: DB AG/Martin Busbach

7.2 Grundlegender Aufbau des Drehgestells

Für den Aufbau eines Drehgestells ist es von entscheidender Bedeutung, dass die einzelnen Bestandteile so fest miteinander verbunden sind, dass große Kräfte übertragen werden können - sie andererseits aber gegeneinander beweglich bleiben.



Verbindung mit dem Wagenkasten

Drehgestelle sind mit dem Wagenkasten meist über einen an diesem angebrachten Drehzapfen, einem zentralen Gelenkbolzen zur Übertragung von Zug-, Brems- und Spurführungskräften, verbunden (in der Abbildung oben grün dargestellt). Dieser Drehzapfen wird von einem drehgestellseitigen Joch, einer Art Ummantelung, umgeben. Dieses Joch ist wiederum über Lenker als

Verbindungsstücke, die zur Kraftübertragung dienen, mit dem Drehgestellrahmen verbunden (rot dargestellt). Bei manchen Triebdrehgestellen, z. B. denen der Triebköpfe von ICE 1 und ICE 2, wird der Wagenkasten anstatt der Verbindung über Drehzapfen, Joch und Lenker

mit Hilfe einer Stahlstange mit dem Drehgestellrahmen verbunden. Bei dieser Bauweise ist aufgrund der Lage der Motoren in der Drehgestellmitte kein Platz für einen Drehzapfen, deshalb wird eine Stahlstange verwendet, die den zur Fahrzeugmitte zeigenden Koppträger des Drehgestellrahmens mit einer Konsole nahe der Mitte des Wagenkastens verbindet. Bei der vom Drehgestell ausgehenden Zugkraft wirkt diese aufgrund der genannten Verbindungen auch auf den Wagenkasten, beim Bremsen verläuft der Vorgang der Kraftübertragung nach dem gleichen Prinzip.

Verbindung mit den Rädern

Die Räder bzw. die Radsätze sind am Drehgestellrahmen mittels der Radsatzführungen befestigt, welche die Zug- und Bremskräfte übertragen. Diese Verbindungen können konstruktiv stark unterschiedlich sein, müssen allerdings stabil und gleichzeitig beweglich sein. Dies wird in den meisten Fällen über Lenker erreicht, welche den Radsatz horizontal mit dem Rahmen verbinden (blau dargestellt). Die Fixpunkte am Rahmen und am Radsatz sind elastisch, so dass der Radsatz nicht nur nach oben und nach unten Spiel hat, sondern auch eine radiale Einstellung des Radsatzes bei Kurvenfahrt ermöglicht wird. Der Fixpunkt des Lenkers am Radsatz greift beim Radsatzlagergehäuse an. Vertikal sind die Achslagergehäuse mittels der Primärfedern mit dem Drehgestellrahmen verbunden, welche die vertikalen Massenkräfte des Fahrzeuges übertragen (gelb dargestellt). Die Radsatzlager werden ca. alle 1,2 Millionen Kilometer auseinander gebaut, gereinigt und bei Schäden repariert, bei der zweiten Reparatur bzw. Kontrolle werden die Radsatzlager dann gegen neue ausgetauscht.

Verbindung mit den Bremsen und dem Antriebsmotor

Aufgrund der verschiedenen Bremsarten variiert auch die Position der Bremsen. Bei den Scheibenbremsen sind die Bremsscheiben entweder auf der Radsatzwelle zwischen den Rädern oder an den Rädern selbst angebracht. Die Bremszangen sind jedoch in allen Fällen am Drehgestellrahmen befestigt. Im Gegensatz dazu ist die Generatorbremse im Motor „eingebaut“, welcher am Triebdrehgestell selbst angebracht ist.



Beim ICE 3 wird der Motor zwischen den Achsen und der Drehgestellmitte eingebaut. Bei der Magnetschienenbremse und der Wirbelstrombremse ist die Position am Drehgestell jeweils die gleiche, und zwar zwischen den Rädern exakt über der Schiene. Der Unterschied zwischen den beiden liegt nur in der Aufhängung: Während die Magnetschienenbremsen ganz auf

die Schiene abgesenkt werden, stellt die Aufhängung der Wirbelstrombremse einen Luftspalt zwischen der Bremse und den Schienen sicher. Die Übertragung der Bremskräfte zwischen dem Drehgestellrahmen und der Magnetschienen- oder Wirbelstrombremse erfolgt über Lenker, die sich mit dem Bremsträger nach unten verdrehen können.

7.3 Federungen

Um Sicherheit und Komfort zu gewährleisten, sind an mehreren Stellen im Drehgestell Federungen und Dämpfungen nötig. Dabei finden ganz unterschiedliche Techniken Verwendung.

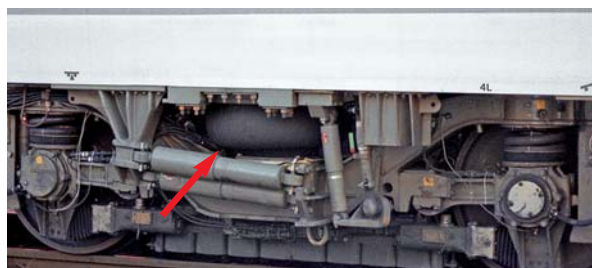


Primärfederung

Die Primärfederung ist die vertikale Verbindung zwischen dem Radsatzlagergehäuse und dem Drehgestellrahmen. Sie hat zwei Funktionen, zum einen die Übertragung der vertikalen Massenkräfte des Fahrzeuges und zum anderen das Federn. Sie soll die vertikalen Unebenheiten des Gleises ausgleichen und somit den Fahrkomfort gemeinsam mit den Sekundärfedern maximieren. Meist werden Schraubenfedern als Primärfedern verwendet, es kommen aber auch Stahl-Gummifedern und Kombinationen aus Schrauben- und Gummifedern zum Einsatz. Parallel zu den Schraubenfedern wird ein hydraulischer Dämpfer angebracht.

Sekundärfederung

Die Sekundärfedern sind die Federn zwischen dem Drehgestellrahmen und dem Wagenkasten. Meist werden als Sekundärfedern von Personenverkehrsfahrzeugen Luftfedern eingesetzt. Diese bestehen aus einem ringförmigen Gummibalg, der ähnlich wie ein horizontal liegender Reifen aussieht. Er überträgt die vertikalen Massenkräfte zwischen Wagenkasten und Drehgestellrahmen. Je nach Beladungszustand des Fahrzeuges wird der Luftdruck in der Luftfeder gesteuert, um stets gleichen Federungskomfort zu garantieren: Steigt die Beladung an, so wird der Luftdruck in der Feder erhöht, sinkt die Beladung, so wird auch der Luftdruck wieder abgesenkt. Bei Lokomotiven und älteren Personenverkehrsfahrzeugen findet man meist Stahl-Schraubenfedern als Sekundärfedern. Um hier einen ähnlichen Effekt bei unterschiedlichen Beladungen zu erzielen, werden oft mehrere konzentrisch angeordnete Schraubenfedern benutzt. Diese sind so dimensioniert, dass dann, wenn die erste der Federn fast komplett ausgelastet ist, die nächste Feder einzugreifen beginnt. Parallel zu den Sekundärfedern wird in der Regel ein hydraulischer Dämpfer angebracht. Meist fehlt die Sekundärfederung bei Güterwagen, da sie dort nicht von Nutzen ist, weil keine Menschen an Bord sind und man somit den Komfort nicht maximieren muss.



Bilder: DB AG, DB AG/Annette Koch, DB Systemtechnik



Bilder: DB AG/Bartłomiej Banaszak, DB AG/Silvia Bunke, DB Systemtechnik

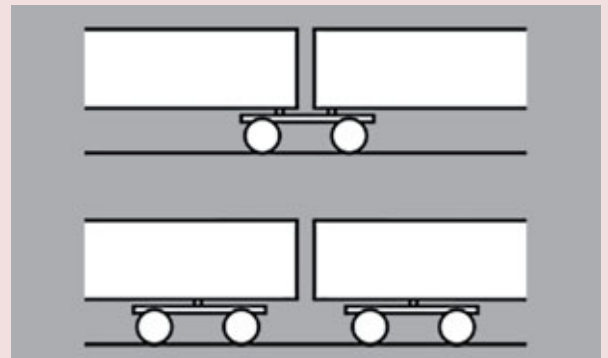
Schlinderdämpfer

Schlinderdämpfer werden bei Fahrzeugen ab einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 160 km/h, und damit auch bei Hochgeschwindigkeitszügen wie dem ICE, eingesetzt. Sind werden horizontal zwischen Wagenkästen und Drehgestell angebracht, um den Sinuslauf zu dämpfen. Dieser entsteht beim Fahren aufgrund der Form des Rades (siehe Kapitel 6.2, Seite 57). Schlinderdämpfer funktionieren wie ein Stoßdämpfer. An jedem Drehgestell sind mindestens zwei Schlinderdämpfer angebracht, einer an jeder Seite. Die Wellenlänge des Sinuslaufes ist unabhängig von der Geschwindigkeit.

Daher erhöht sich die Frequenz, mit der das Drehgestell um die Hochachse schwingt, mit zunehmender Geschwindigkeit. So werden die auf das Drehgestell wirkenden Beschleunigungen größer und müssen ausgeglichen werden, da ansonsten eine Entgleisungsgefahr bei höherer Geschwindigkeit nicht ausgeschlossen werden könnte. Deshalb sind Schlinderdämpfer für den ICE von großer Bedeutung. Sollte ein Schlinderdämpfer ausfallen bzw. beschädigt werden, wird der Lokführer mit Hilfe einer elektronischen Stabilitätsüberwachung sofort informiert und die Geschwindigkeit des Zuges verringert.

Sonderbauarten

Es gibt hunderte verschiedene Konstruktionen von Drehgestellen, die sich in Federung, Achszahl, Radgröße, Rahmenart usw. unterscheiden können. Eine sehr bekannte Sonderbauart ist das Jakobsdrehgestell. Bei dieser Bauweise stützen sich jeweils zwei Wagenkästen auf ein gemeinsames Drehgestell. Das Drehgestell befindet sich direkt unter dem Übergang zweier Wagenteile, womit kürzere Wagenübergänge möglich sind. Diese Bauart wird vor allem für Nahverkehrs- und S-Bahn-Triebzüge verwendet, da diese durch den Wegfall von Drehgestellen, von Überhängen und damit kürzeren Wagenkästen leichter werden. Ein Nachteil des Jakobsdrehgestells ist allerdings, dass man die Länge der Züge bzw. die Anzahl der Wagen nur in der Werkstatt variieren kann, da man die Wagen nicht einfach abkuppeln, sondern die Drehgestelle nur in der Werkstatt von den Wagenkästen trennen kann. Jakobsdrehgestelle kommen auch beim italienischen Hochgeschwindigkeitszug "Italo" und bei allen französischen TGVs zum Einsatz.



Kapitel 8

Fahrweg

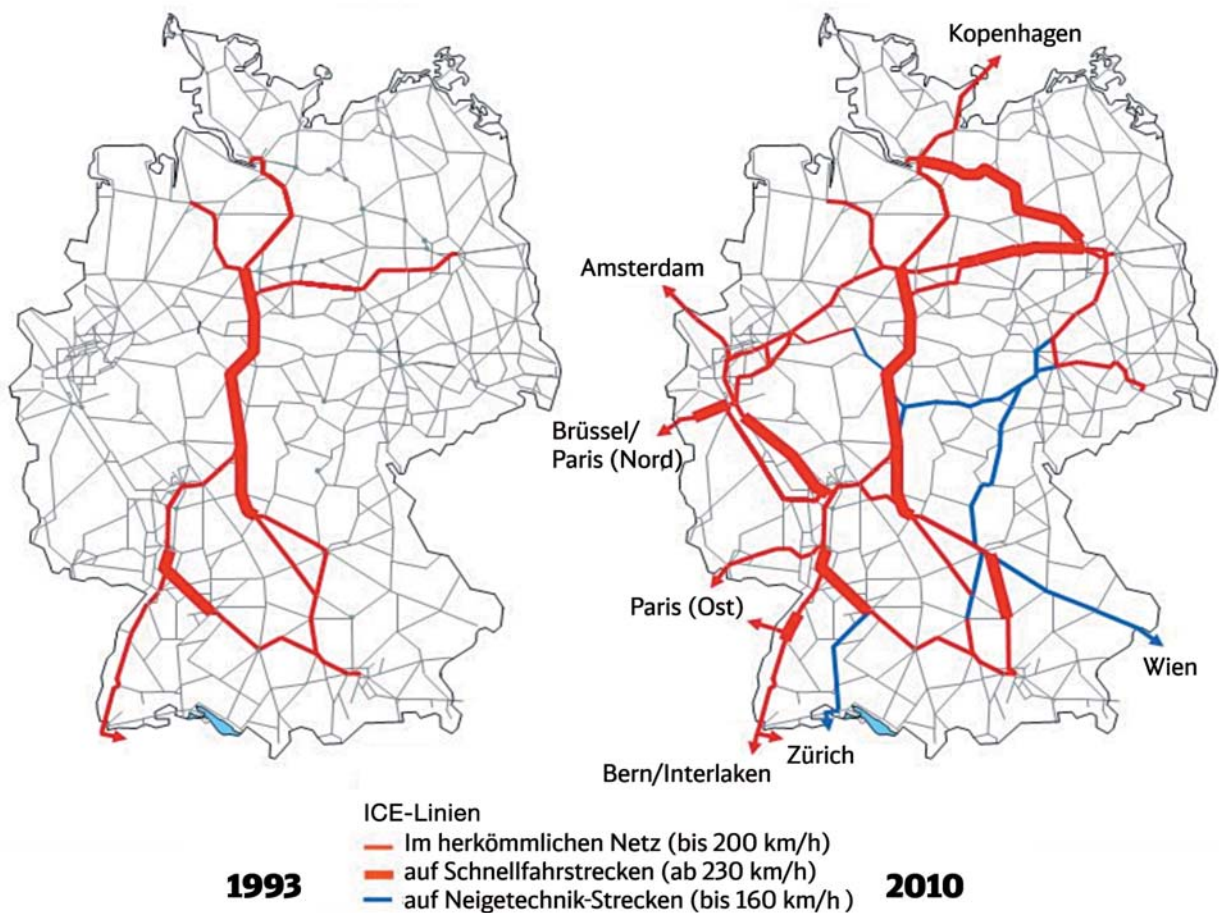


8.1 ICE-Streckennetz

Das Streckennetz der Deutschen Bahn und speziell das für die Hochgeschwindigkeitszüge wird immer wieder erweitert und modernisiert.

Folgende Grafik verdeutlicht die Zunahme der durch den ICE befahrenen Strecken. Deutlich zu erkennen ist auch der Zuwachs an echten Schnellfahrstrecken (rote, dicke Linien) und der Neigetechnik-Strecken (blaue Linien).

HGV-Infrastruktur und ICE-Liniennetz
Vergleich 1993 und 2010



Der stetige Ausbau führt dazu, dass immer mehr Reisende die Bahn / den ICE alternativ zum Auto oder Flugzeug nutzen. Dieser Trend wird an nebenstehender Grafik verdeutlicht. Der angestrebte Effekt wird, wie aus der Grafik hervorgeht, tatsächlich erreicht.

8.2 Gleisführung

Die sichere und ruhige Führung des Zuges auf dem Gleis ist einer der wesentlichen Gesichtspunkte beim Bau von Strecken, nicht nur für die ICE-Züge. Bei der Planung und dem Bau einer Trasse sind eine Vielzahl von Aspekten zu berücksichtigen. Mit der Festen Fahrbahn kommt eine neue Bauweise zum Einsatz, die den Anforderungen an Hochgeschwindigkeitsstrecken besonders gut gerecht wird.

Beim Bau oder Ausbau einer Trasse, also dem Verlauf einer (geplanten) Strecke, müssen viele Faktoren vorab mitberücksichtigt werden, wie beispielsweise angestrebte Höchstgeschwindigkeiten und Zwangspunkte wie Siedlungen und Gewässer, die nicht einfach überbaut werden können, um dem Zug eine schnelle Fahrt und eine kurze Strecke zu ermöglichen. Diese Faktoren sind wiederum später entscheidend für einen problemlosen und nutzerfreundlichen Dauerbetrieb.

Von der Planung bis zur fertigen Strecke

Zunächst wird vor dem Bau einer Trasse die Wirtschaftlichkeit der geplanten Verbindung ermittelt. Die Deutsche Bahn beabsichtigt dabei neben der Gewinnung neuer Kunden oftmals eine Entlastung zwischen zwei stark belasteten Verkehrspunkten wie zwischen den Verkehrspunkten Nürnberg und Ingolstadt oder auch Hamburg und Berlin (siehe Kapitel 8.4, Seite 75). Unterstützung findet die Bahn für solche Projekte in Politik und Gesellschaft auch durch Nachfragen aus der Bevölkerung

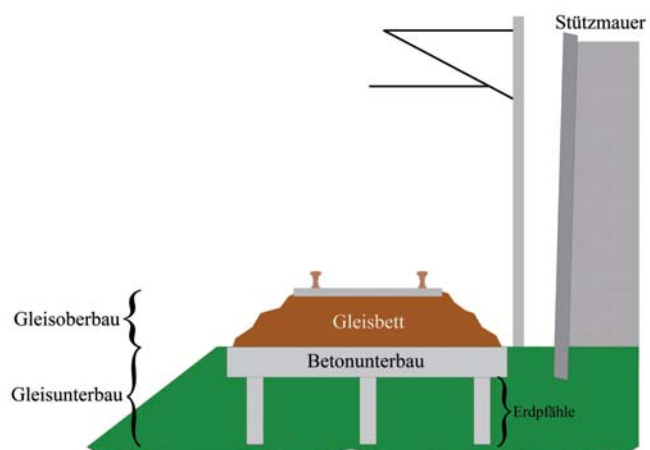
und der Wirtschaft. Finanziert werden die Strecken durch öffentliche Gelder auf der Basis des vom Parlament bestätigten „Bundes-Verkehrswegeplans“ der Bundesregierung. Wissen muss man, dass die Strecken selbst Eigentum des Bundes sind und die DB Netz AG die Strecken verwaltet und bewirtschaftet und deren Instandhaltung besorgt. Die Deutsche Bahn strebt bei der Planung einer Trasse einen Ausgleich zwischen der Notwendigkeit der Anlage von Neigungen, Tunneln, Kurven etc. und dem Landschaftsverbrauch sowie der Lage zu Siedlungen und Naturschutzgebieten an. Damit ergeben sich auch unter Umständen Abweichungen von den durch das Parlament beschlossenen Planungen. Im Rahmen des sogenannten Planfeststellungsverfahrens wird demokratisch zwischen den einzelnen Interessenslagen vermittelt und im Ergebnis entschieden. Wenn alle Interessenskonflikte geklärt und die Planungen abgeschlossen wurden sowie die notwendigen Gelder im Bundeshaushalt bereit gestellt sind, beginnt der Bau oder Ausbau der Strecke.

Der Bahnkörper - das Herzstück einer jeden Bahnstrecke

Aufbau und Funktionsweise eines Bahnkörpers

Generell besteht der Bahnkörper aus dem Oberbau, also dem eigentlichen Gleis und seinem (Schotter)Bett, und dem Unterbau. Der Oberbau dient der Aufnahme und Verteilung der einwirkenden Kräfte, die durch Masse, Beschleunigung, Sinuslauf und mit steigender Geschwindigkeit auch durch Querkräfte in Kurven sowie durch thermische Belastungen vor allem durch die jahreszeitlich bedingten Temperaturwechsel hervorgerufen werden.

Der Unterbau, der Körper auf dem die Gleisanlage ruhen soll, dient der Ableitung der durch den Oberbau aufgenommenen Kräfte und sorgt für eine gleichmäßige Lage des Oberbaus, indem er Unebenheiten des Geländes beseitigt. Als Form eines möglichen Unterbaus gibt es neben dem klassischen Erdkörper auch Kunstbauten wie Brücken und Stützmauern am Rande des Gleises oder auch Tunnel. Die Ausführung des Ober- und Unterbaus sowie deren technische Belastbarkeit sind die Grundlage für die Festlegung der späteren Höchstgeschwindigkeit, da sie die in unterschiedlichem Maße von der beabsichtigten Geschwindigkeit



Betonunterbau und Erdpfähle (nur bei schlechtem Untergrund)

abhängigen einwirkenden Kräfte aufnehmen und verteilen müssen. Sie bestimmen auch wesentlich die maximal mögliche Achslast der Züge auf dem betreffenden Streckenabschnitt.

1435 mm als klassische Spurweite deutscher Trassen

Einen weiteren wichtigen Aspekt im Gleisbau stellt die Wahl einer einheitlichen Spurweite dar. Sie bestimmt sich durch den gemessenen Abstand der Innenkanten der Schienenköpfe des Gleises. Dieser beträgt im deutschen Schienennetz für ICEs ausschließlich 1435 mm. Lediglich Gebirgsbahnen sowie noch anzutreffende Schmalspurbahnen nutzen eine andere Spurweite, die bei der Schmalspurbahn weit unter den 1435mm liegt und meist für touristische Zwecke und nur selten noch für regulären Fahrbetrieb genutzt wird. Der Wert von 1435 mm findet seinen Ursprung im 19. Jahrhundert, als damals die ersten Lokomotiven auf einer Spurweite von 4 Fuß 8 $\frac{3}{4}$ Zoll fuhren (ungefähr 1438 mm). Daraus wurden dann im Laufe des 19. Jahrhunderts die heutigen 1435 mm abgeleitet. Dieser Wert wurde als Standard festgelegt und gilt auch noch heute als Normalspur in Deutschland und weiten Teilen der Welt. Abweichungen im Toleranzbereich von diesem Maß sind bei Hauptgleisen von 1430 mm bis maximal 1465 mm, bei Nebengleisen von 1430 mm bis 1470 mm gestattet, da diese Abweichungen im Millimeterbereich in Relation zu der Aufstandsfläche des Rades von ca. 10 cm Breite bei einem ICE eine minimale Abweichung darstellen.

Die Spurweite weicht allerdings in einigen Ländern erheblich von diesem Wert ab (siehe Kasten). Die Einheitlichkeit der Spurweite innerhalb eines Landes ist insofern besonders wichtig, da sie die einfache Erreichbarkeit aller Punkte eines Streckennetzes und ggf. auch den Lichtraum (siehe Kapitel 2.1, Seite 19) der Gleisanlagen beeinflusst.

Repräsentative Spurweiten weltweit:

Meterspur:	1000 mm; Nutzung in Brasilien und u. a. auch bei zahlreichen deutschen Straßenbahnen und der Harzer Schmalspurbahn.
Kapspur:	1067 mm; Nutzung u.a. in Südafrika, Taiwan, Indonesien und Japan.
Normalspur:	1435 mm; verbreitet in weiten Teilen Europas, Chinas, Nordamerikas und Mexikos.
Breitspur:	1520 mm, z. B. die sogenannte Russische Breitspur in weiten Teilen Osteuropas und Finnland.
Breiteste Spurweite:	1676 mm in Portugal und Spanien, die sogenannte „Iberische Normalspur“

Tradition trifft auf Moderne

Traditionell bildet ein Schotterbett mit Holz- oder Betonschwellen, seltener Stahlschwellen, die Gleisunterlage, das sogenannte Schwellenrostbett. Doch neue Herausforderungen an das Gleisbett, wie höhere Geschwindigkeiten sowie schwerere Züge und die wachsenden Ansprüche hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Instandhaltung und Lebensdauer einer Bahnstrecke

haben ein Umdenken in dieser Bauweise bewirkt. Ein ICE in voller Fahrt beansprucht auf Dauer die Lagestabilität des Gleisbetts in deutlich höherem Maße als z. B. ein langsamerer Nahverkehrszug. Eine Verformung des Oberbaus und die damit verbundenen Gleislagefehler haben erhebliche Auswirkungen auf das Fahrverhalten des ICE, und die dadurch resultierende unruhigere Fahrt vermindert den Fahrkomfort und somit das Wohlbefinden der Reisenden. Auch das Problem des Schotterfluges (siehe Kapitel 1.2, Seite 15) ist neben den stetig voranschreitenden Lageänderungen im Oberbau ein Problem, das erhebliche Folgekosten verursachen kann.

Die feste Fahrbahn als Alternative zum bisherigen System

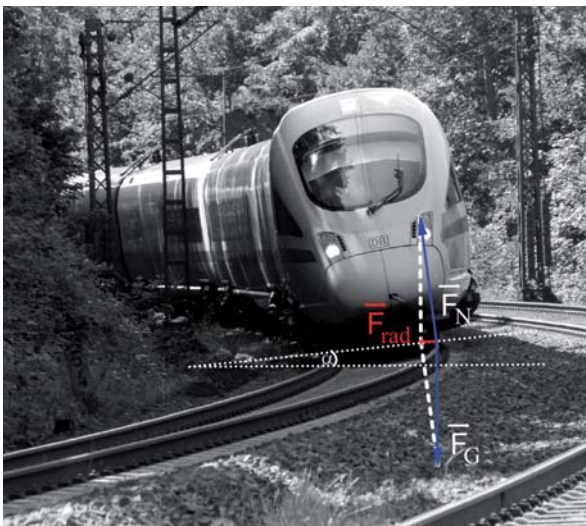
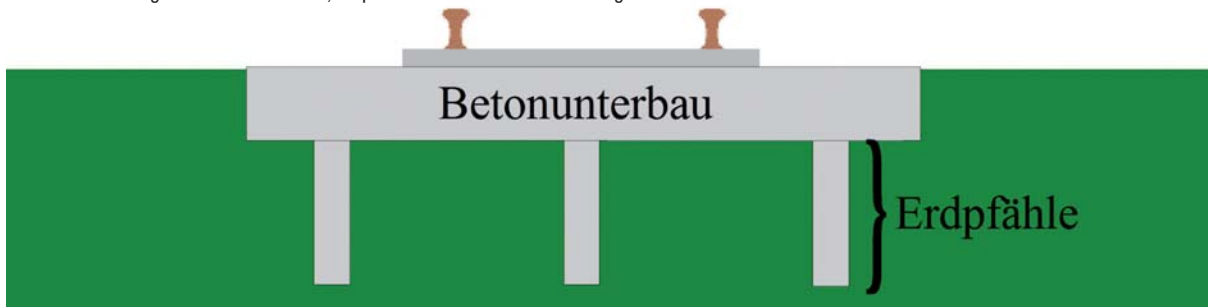
Eine mögliche Lösung liegt in einer neuen Form des Oberbaus, der sogenannten „Festen Fahrbahn“. Diese schotterlose Gleisunterlage setzt an Stelle von losem Schotter auf einen Oberbaustrang aus Beton und/oder Asphalt. Damit können auch die größeren Geschwindigkeiten eines ICEs bei langandauernder Erhaltung der Lagequalität der Gleise beherrscht werden. Die mit der Geschwindigkeit des ICE 3 mit dem technisch möglichen Spitzenwert von 330 km/h und seiner tatsächlich in Deutschland genutzten Höchstgeschwindigkeit von 300 km/h verbundene Belastung wird von dieser Art der Fahrbahn wesentlich besser ertragen.

Die Vorteile einer Festen Fahrbahn liegen u. a. in der höheren Lagestabilität des Gleisbaues, da der Gleiskomplex großflächig mit dem Untergrund verbunden wird. Des Weiteren sind größere Instandhaltungsintervalle und der stets mögliche Einsatz der Wirbelstrombremse als Betriebsbremse große Vorteile der festen Fahrbahn. Ferner ist diese auch verformungs- und witterungsbeständiger, da Wind und Wetter, vor allem aber Eis und Schnee dem Betonsockel weniger anhaben können als den losen Schottersteinen. Dies führt zu einem deutlich verminderten Risiko von Gleislagefehlern und verspricht somit eine größere Gesamtwirtschaftlichkeit (mittlere Lebenszeiterwartung etwa 60 Jahre). Auch sorgt die Feste Fahrbahn für eine bessere Verteilung der einwirkenden Kräfte und zieht keine Notwendigkeit des „Nachstopfens“ mit Schotter und der Schotterreinigung nach sich. Als Nachteile gelten der zunächst höhere Preis beim Neubau und ein erhöhter Lautstärkepegel, der aber durch Ausrüstung mit sog. Schalldämmplatten minimiert werden kann.

Ein weiteres Problem der festen Fahrbahn ist, dass sie im Falle einer größeren Beschädigung einen höheren Reparaturaufwand verursacht als ein normales Schottergleis. Bei letzterem kann mitunter in wenigen Stunden das Gleis einfach neu verlegt werden, bei einer Festen Fahrbahn müssen oft mehrere Hundert Meter neu gebaut werden, da diese aus einem festen Betonkörper besteht, welcher fest im Erdreich verankert ist.



Bild einer Gleisanlage auf Schotter (links); Bild einer festen Fahrbahn (rechts).
 Unten: Verankerung der Festen Fahrbahn, Erdpfähle nur bei schlechtem Untergrund



Bilder: DB AG, DB Systemtechnik

Die Kurvendurchfahrt - über Probleme und deren Lösungen

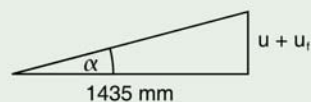
Auch Kurven stellen die Ingenieure und Architekten auf die Probe, da ein Radius gewählt werden muss, auf welchem später alle planmäßig zum Einsatz kommenden Schienenfahrzeuge die Kurve sicher und möglichst schnell und zwanglos durchlaufen können. Bei Gleisen mit der Normalspur 1435 mm, die von allen Fahrzeugen befahren werden sollen, muss der Radius r mindestens 150 m betragen, bei manchen gekoppelten Zügen ist auch ein Radius unter 125 m bei langsamer Fahrtgeschwindigkeit möglich. Diese Begrenzung von 150 m rührt daher, dass unterhalb dieser Radien die Fahrtgeschwindigkeit massiv gesenkt werden muss, um die Belastung der Laufwerke in erträglichem Maß zu halten. Auch spielen die notwendige Erweiterung des Lichtraums, die Freigängigkeit des Drehgestells unter dem Wagenkasten und die Beanspruchung der Kupplungen eine wesentliche Rolle.

Berechnung von Kurvenradien

Aus Kapitel 6.3 (Seite 59) kennt man für die Kurvendurchfahrt die Bedingung

$$\tan \alpha = \frac{v^2}{r \cdot g}, \text{ mit } \tan \alpha = \frac{u + u_f}{1435}$$

(alle Längen in mm).



Das ergibt für den Kurvenradius:

$$r = \frac{v^2}{\tan \alpha \cdot g} = \frac{1435}{u + u_f} \cdot \frac{v^2}{g} \text{ (mit } v \text{ in der Einheit m/s)}$$

bzw. $r = \frac{1435}{u + u_f} \cdot \frac{v^2}{3,6^2 \cdot g}$ (mit v in km/h),

also $r = \frac{1435}{3,6^2 \cdot g} \cdot \frac{v^2}{u + u_f} = 11,3 \cdot \frac{v^2}{u + u_f}$

Die in der Praxis verwendete Formel $r = 11,8 \cdot \frac{v^2}{u + u_f}$

- v : Geschwindigkeit in km/h;
 - u : Kurvenüberhöhung in mm;
 - u_f : Überhöhungsfehlbetrag in mm
- führt zu geringfügig größeren Kurvenradien.

Mit ihr erhält man beispielsweise für eine Geschwindigkeit von 300 km/h, eine Kurvenüberhöhung von 160 mm und einen Überhöhungsfehlbetrag von 100 mm (vgl. Kapitel 6.3, Seite 59) einen Kurvenradius von rund 4,1 km. Solche Kurvenradien sind für Hochgeschwindigkeitsstrecken üblich.

8.3 Betriebssicherung und Zugfahrtsicherung

Geschwindigkeiten jenseits der 300 km/h und eine möglichst gute Auslastung des Schienennetzes stellen höchste Anforderungen nicht nur an den Gleiskörper, sondern auch an die Betriebssicherheit. So ist es kaum verwunderlich, dass in den letzten Jahren im Rahmen des Ausbaus sogenannter Hochgeschwindigkeitsstrecken auch eine neue Art der Zugfahrtsicherung entwickelt wurde, um Reisegeschwindigkeiten von über 160 km/h zu ermöglichen.

Der Streckenblock, die Gleisfreimeldung und die Signale

Zunächst ist es wichtig zu wissen wie eine Eisenbahnstrecke grundsätzlich aufgebaut ist. Jede Strecke besteht aus „Streckenblöcken“. Ein Streckenblock bezeichnet immer den Abschnitt zwischen zwei Hauptsignalen. Die Länge der Blockabschnitte wird von der Zugdichte (wie viele Züge fahren hier pro Stunde), der zulässigen Geschwindigkeit und der Länge der Züge bestimmt. Ein Blockabschnitt muss mindestens so lang sein, dass ein Zug nach der Vorankündigung eines Halt zeigenden Hauptsignals durch ein Vorsignal sicher anhalten kann. Diese Strecke beträgt in Deutschland auf Nebenstrecken meist 700 m, auf Hauptstrecken 1000 m. Die zugrunde liegende Idee ist, dass sich immer nur ein Zug in einem Streckenblock befindet und ein Signal (ein sogenanntes Blocksignal), welches vor einem besetzten Streckenblock steht, Halt anzeigt. Erst wenn der Blockabschnitt wieder frei ist kann das Signal Fahrt anzeigen. Wenn ein Blockabschnitt nur die oben genannte Mindestlänge hat, befindet sich das Vorsignal zum nächsten Block-

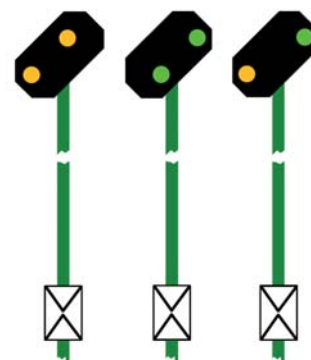
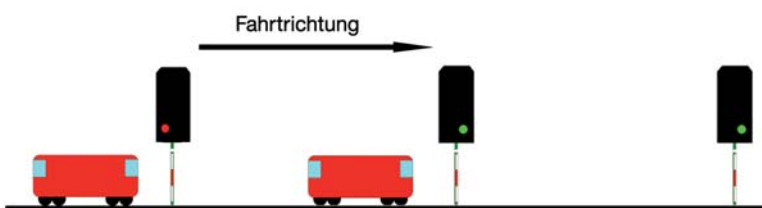
eingespeister Stromkreis zwischen den beiden Schienen durch die Achsen des Zuges geschlossen. Dies zeigt, dass das Gleis besetzt ist. Der betreffende Abschnitt wird durch Isolierstöße in den Gleisen beschränkt. Zum anderen gibt es den Tonfrequenzgleisstromkreis. Durch Überfahrt erkennt das System den Zug bei der Ein- und bei der Ausfahrt aus einem Streckenblock. Im Prinzip funktioniert dies so ähnlich wie der Gleisstromkreis, nur dass hier eine bestimmte Frequenz initiiert wird (meist 9500 Hz), welche durch einen Empfänger, der etwas vom Sender entfernt ist, registriert wird. Fährt nun ein Schienenfahrzeug zwischen Sender und Empfänger, wird das Signal gestört und die Gleisfreimeldanlage meldet „besetzt“.

Das dritte mögliche Funktionsprinzip ist der Achszähler. Er zählt die Anzahl der Achsen bei der Einfahrt und bei der Ausfahrt aus Streckenblöcken. Dies geschieht heute völlig berührungsfrei durch das Metall eines jeden Radsatzes, welches ein mittels spezieller Geräte erzeugtes elektromagnetisches Feld verändert. Wenn die Zählung bei der Einfahrt und bei der Ausfahrt ein gleiches Ergebnis liefert, wird die Strecke wieder freigegeben, wenn nicht, bleibt das Blocksignal auf „Halt“. Früher geschah dies auch durch einen einfachen Taster auf der Schieneninnenseite, der durch die Spurkränze gedrückt wurde. Aufgrund des Verschleißes und mehreren Problemen bezüglich der Genauigkeit wurde dieses System aber wie beschrieben abgeändert.

An einem Vorsignal können folgende Informationen gegeben werden:

abschnitt meist direkt unter dem Blocksignal des kurzen Abschnittes am gleichen Standort. Bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts findet dieses doch sehr einfache System der Regulierung des Zugverkehrs Anwendung in ganz Europa. Auf Strecken, bei denen wegen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die 1000 m Bremsweg nicht ausreichen, kommt die Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) zum Einsatz, welche im weiteren Verlauf detailliert erklärt wird.

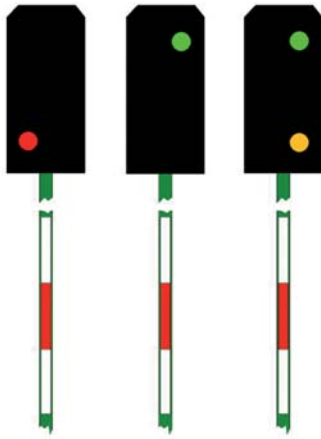
Ob nun ein Streckenblock besetzt oder frei ist, erkennt heute die Gleisfreimeldanlage, von der es drei unterschiedliche Bauformen gibt. Zum einen gibt es das System des Gleisstromkreises. Dabei wird ein extern



Vorsignale (von links): Halt erwarten, freie Fahrt erwarten, Fahrt mit Geschwindigkeitsbeschränkung (gewöhnlich 40 km/h oder 60 km/h) erwarten

Bilder: DB AG, DB Systemtechnik

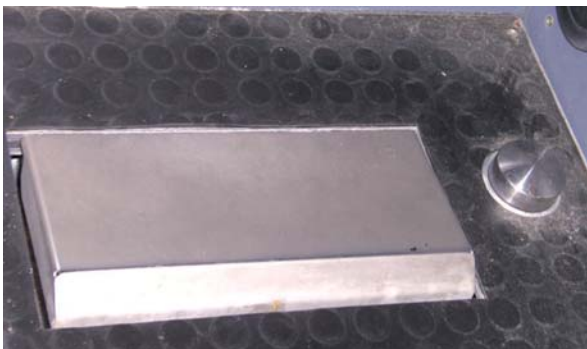
Am Hauptsignal wird diese Information dementsprechend wiedergegeben:



Hauptsignale (von links): Halt, freie Fahrt, Fahrt mit Geschwindigkeitsbeschränkung

Die Sicherheitsfahrerschaltung (Sifa) ermöglicht den Einmannbetrieb

Doch all dies hilft nichts, wenn der Lokführer nicht mehr bei Bewusstsein oder unaufmerksam ist. Deshalb ist in allen Führerständen die sogenannte Sicherheitsfahrerschaltung, kurz „Sifa“, eingebaut. Das Prinzip hier ist wieder denkbar einfach: Der Lokführer muss in bestimmten Zeitintervallen ein Fußpedal oder einen Knopf drücken bzw. wieder loslassen. Erkennt das System innerhalb von 30 Sekunden keine Reaktion seitens des Lokführers, warnt zuerst ein optisches Signal (Leuchtmelder). Sollte immer noch keine Reaktion erfolgen, ertönt bei neueren Fahrzeugen nach 2,5 - 3 Sekunden ein Warnton (bei älteren Fahrzeugen nach 75 Metern Wegstrecke). Wenn erneut nicht reagiert wird, bremst der Zug nach weiteren 2,5 - 3 Sekunden bzw. weiteren 75 m automatisch bis zum Stillstand ab und der Antrieb wird sofort abgeschaltet.



Sifa Pedal im ICE (Quelle: DB AG)

Die Punktförmige Zugbeeinflussung erzwingt die Beachtung der Signale

Was aber passiert, wenn der Lokführer zwar regelmäßig die Sifa betätigt, aber ein Halt ankündigendes Vorsignal übersieht und nicht abbremst? Hier kommt die sogenannte „Punktförmige Zugbeeinflussung“ (PZB) zum Einsatz. In Deutschland hat sich dafür auch, nach der Typbezeichnung eines der ersten dafür eingesetzten Produkte, die Bezeichnung „INDUSI“ (Induktive Zug-sicherung) eingebürgert. Diese Punktförmige Zugbeeinflussung verwendet zur Kommunikation zwischen dem Zug und der Strecke drei feste elektromagnetische Frequenzen. Dazu befindet sich an der führenden Zug-einheit auf der rechten Seite in der Nähe der Räder an der Außenseite ein Fahrzeugmagnet und streckenseitig neben dem Gleis drei unterschiedliche Gleismagnete. Der Fahrzeugmagnet besteht insgesamt aus drei Spulen, welche permanent mit einer Wechselspannung von 500 Hz, 1000 Hz bzw. 2000 Hz gespeist sind.

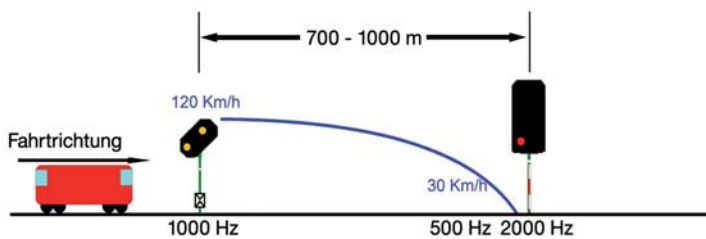


Gleismagnet (links) und Fahrzeugmagnet (rechts)

Bei der Vorbeifahrt an einem „Halt“ ankündigenden Vorsignal bekommt der Zug eine auf 1000 Hz abgestimmte Beeinflussung durch den Gleismagneten, dadurch wird der 1000 Hz-Stromkreis des Fahrzeugmagneten verstimmt. Der Lokführer muss draufhin die „Wachsamkeitstaste“ betätigen, damit das Fahrzeug weiß, dass das Signal von ihm erkannt wurde. Er hat dazu vier Sekunden Zeit, sonst löst das System eine Zwangsbremmung aus. Bei der Ankündigung der „freien Fahrt“ unterbindet das Vorsignal, das mit dem Gleismagneten verbunden ist, diese 1000 Hz-Beeinflussung.

Gleichzeitig mit der 1000 Hz-Induktion am Vorsignal fängt ein Computer im Zug, der die Verstimmung des Fahrzeugmagneten mitgeteilt bekommt, an, eine Bremskurve für den Zug zu errechnen. Sollte diese „Überwachungskurve“ nicht eingehalten werden, wird der Zug automatisch zum Stillstand gebracht. Am „Halt“ zeigenden Hauptsignal ist ein 2000-Hz-Magnet aktiv. Sollte der Zug auch über diesen fahren, wird immer sofort und unverzüglich eine Zwangsbremmung eingeleitet. Dies alles basiert auf dem System der Kommunikation vom Signal zum Zug, um benötigte Informationen unabhängig von der Wahrnehmung durch den Lokführer zu übertragen bzw. errechnen zu können. Um das Einhalten der Bremsanforderungen zu über-

wachen, dient als weitere Übertragungsfrequenz eine 500 Hz-Information, die ebenfalls die Überwachung bestimmter Geschwindigkeitsschwellen und Bremskurven im Fahrzeugrechner anstößt. Sie befindet sich ca. 250 m vor dem zugehörigen Hauptsignal und überprüft, dass ein bestimmter Wert der Geschwindigkeit nicht überschritten wird (30-60 km/h).



Orte der 500 Hz-, 1000 Hz- und der 2000 Hz-Induktion. Die blaue Linie zeigt einen schematischen Verlauf der Bremskurve. Für eine Ausgangsgeschwindigkeit am Vorsignal größer als 100 km/h wird ein Bremsweg auf 1000 m berechnet, darunter auf 700 m.

Die Linienförmige Zugbeeinflussung ermöglicht zusätzlich hohe Fahrgeschwindigkeiten

Ein weiterer Schritt in Richtung Sicherheit wird mit der Linienförmigen Zugbeeinflussung (kurz: LZB) getan. Ursprünglich wurde diese entwickelt, um die Fahrgeschwindigkeit auch auf Werte steigern zu können, die der Streckenverlauf zwar erlaubt, die aber aufgrund des zu langen Bremswegs bezogen auf den festen Abstand zwischen Vor- und Hauptsignal nicht möglich sind. Diese Grenze liegt in Deutschland bei 160 km/h für 1000 m Bremsweg bzw. Blocklänge.

Im Gegensatz zur PZB wird bei der LZB der Zug ständig und vor allem lückenlos überwacht. Die Überwachung betrifft hierbei speziell die Geschwindigkeit, welche sogar direkt, d. h. ohne Zutun des Lokführers, von der Automatischen Fahr- und Bremssteuerung (AFB, entspricht einem „Tempomat“) gesteuert werden kann. Durch diese Überwachung ist das „Fahren auf elektronische Sicht“ möglich, das heißt, dass die Fahrt schon über mehrere Blockabschnitte hinweg berechnet wird und die vorhandene „freie Fahrt“ immer mit dem erforderlichen Bremsweg verglichen wird. Dies hat auch den großen Vorteil einer verbesserten Streckenauslastung bei gleichzeitig erhöhter Fahrgeschwindigkeit. Wichtig ist hierbei auch, dass die LZB den Anzeigen der nach wie vor an den Strecken vorhandenen Vor- bzw. Hauptsignale übergeordnet ist, so dass der Lokführer sich nur an die Anzeigen der LZB im Fahrzeug und nicht an die Anzeigen der Signale halten muss.

Zunächst wird eine LZB-Streckenzentrale benötigt, in welcher die Fahrbefehle für die Fahrzeuge abhängig vom Streckenzustand berechnet werden. Damit die LZB funktioniert, müssen sowohl das Gleis als auch der Zug mit entsprechender Technik ausgerüstet sein. Im Gleis befindet sich dafür ein Kabel, der Linienleiter, eine Art „Antenne“ für die Streckenzentrale. Dabei wird das Kabel abwechselnd in der Gleismitte und am Schienenfuß befestigt. Der Linienleiter wird in Schleifen verlegt: Nach jeweils 100 Metern tauscht der hin laufende Strang (weg von der Zentrale) mit dem rückkehrenden Teil des Kabels (hin zur Zentrale) diese Position.



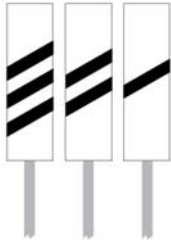
Lage der Linienleiter im Gleis. Dargestellt ist eine Kreuzungsstelle.



LZB-Antenne mit Schutzblech am ICE (Quelle: DB AG)

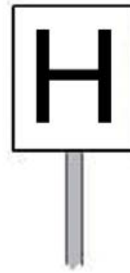
Die auffälligsten Signale am Gleis (Auswahl)

Vorsignalbalken:



Diese Schilder finden sich vor den meisten Vorsignalen und geben die Entfernung zu jenen an. Sie sind vergleichbar mit den Schildern, die auf der Autobahn eine Ausfahrt ankündigen. Jeder Balken steht repräsentativ für 100 m, welche noch bis zum Vorsignal verbleiben. Die erste Tafel steht somit 300 m vor dem Vorsignal und soll den Lokführer aufmerksam machen, dass er eventuelle Fahrtänderungen vollziehen muss.

Haltetafel:



Sie gibt den Ort an, an dem die Zugspitze am Bahnsteig zum Stehen kommen muss.

Gleissperrsignal



Von links: Halt, Fahrt, Rückseite des Gleissperrsignals.

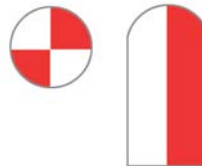
Diese Signale, welche auch scherzhaft "Schotterzwerge" genannt werden, sind dazu da, bestimmte Streckenabschnitte für Rangierfahrten (und Zugfahrten) zu sperren oder freizugeben. Sie finden ihre Verwendung in den Gleisanlagen der Bahnhöfe oder Anschlußgleise.

Pfeiftafel:



Sie weist den Lokführer an, ein einmaliges Tonsignal mit Druckluftpfeife bzw. Makrofon abzugeben. Ein Makrofon ist eine Drucklufthupe, die eine feste Frequenz benutzt, um einen lauten Warnton zu erzeugen. Eingesetzt werden diese Signale meist in der Nähe von Bahnübergängen (hier wird die Tafel zweimal angebracht, da das Tonsignal zweimal abgegeben werden muss) oder bei Gefahrenstellen.

Grenzzeichen:



Das Grenzzeichen, welches gerne als „Polizist“ bezeichnet wird, gibt an, bis zu welchem Punkt Weichen von stehenden Schienenfahrzeugen freizuhalten sind. Fährt ein Schienenfahrzeug näher heran, wird eine Kollision mit einem vorbeifahrenden Zug riskiert, da der Lichtraum des anderen Gleises beschränkt wird. Das Grenzzeichen steht immer 3,5 m weiter entfernt als nötig, da sich Züge nach dem Anhalten um bis zu diesem Maß „entspannen“ können.

8.4 Hochgeschwindigkeitsstrecken

Damit ein ICE oder ein ähnlicher Hochgeschwindigkeitszug mit der Geschwindigkeit fahren kann, für die er ausgelegt ist, gibt es in Europa inzwischen viele speziell ausgebaute Strecken, die sogenannten Hochgeschwindigkeitsstrecken.

Sie bieten viele Vorteile, unter anderem, dass die Züge darauf deutlich schneller fahren können, die Verbindungen verkürzt und die Anwohner besser vor Lärm geschützt werden. Solche Strecken sind aber auch teuer zu bauen. Es gibt in Deutschland zwei Arten von Hochgeschwindigkeitsstrecken: die Neubaustrecken und die Ausbaustrecken. Beide werden nun anhand ausgewählter Beispiele genauer erläutert.

Neubaustrecke (NBS) Nürnberg-Ingolstadt

In den Jahren 1998 bis 2006 wurde die 89 km lange zweigleisige Strecke zwischen den bayerischen Städten Nürnberg und Ingolstadt gebaut. In diesem Abschnitt fährt der ICE bis zu 300 km/h schnell. Die Strecke ist in Fester Fahrbahn anstelle des Schottergleises errichtet worden (vgl. Kapitel 8.2, Seite 68). Es entstanden 65 Brücken, von denen die längste 305 Meter lang ist, und 9 Tunnels, der längste davon 7,7 Kilometer lang. Die Gesamtkosten für dieses Projekt betragen 3,6 Milliarden Euro. Diese Neubaustrecke zeigt die Besonderheiten von Hochgeschwindigkeitsstrecken recht deutlich. Dazu gehören unter anderem große Kurvenradien, viele Brücken, Tunnels, Lärmschutzmaßnahmen und Einschnitte. Fast ein Drittel der gesamten Strecke verläuft in Tunnels.

Ausbaustrecke (ABS) Hamburg-Berlin

Diese 284 km lange Strecke wurde nicht komplett neu gebaut, sondern für den modernen Schienenverkehr modifiziert. Das heißt, die Strecke wurde im Bereich von Kurvenüberhöhungen angepasst, Bahnübergänge wurden durch Brücken und Unterführungen ersetzt und die technische Ausrüstung (siehe die Kapitel 3.2, Seite 30 und 8.3, Seite 70) wurde für die höheren Geschwindigkeiten erneuert. Ende 2004 waren die Umbaumaßnahmen abgeschlossen. Auf dieser Strecke fährt der ICE bis zu 230 km/h schnell. Die Gesamtkosten beliefen sich auf 638 Millionen Euro.



Ein ICE auf der Neubaustrecke Nürnberg - Ingolstadt



Fotos: DB AG/Claus Weber, Uwe Miethe, Hartmut Reiche

Kapitel 9

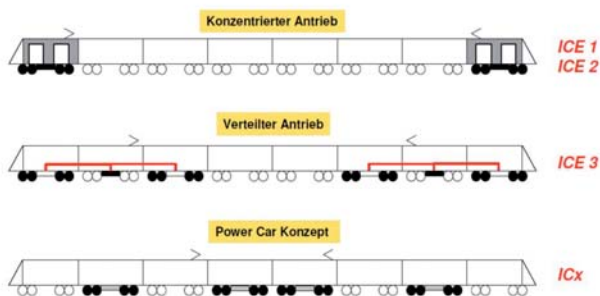
Zukünftige Entwicklungen



9 Zukünftige Entwicklungsschritte des ICEs

Die nächste zu erwartende Entwicklungsstufe des ICEs läuft unter dem Arbeitstitel „ICx“. Dieser Zug befindet sich heute, 2013, noch in der Entwicklungsphase.

Vergleich möglicher Zugkonzepte bezüglich Antriebskonzeption



Die wesentlichste Neuerung des ICx ist das sogenannte "Powercar"-Konzept, bei dem einzelne Wagen komplett autark mit einer Traktionsausrüstung versehen sind. So beinhaltet ein solcher Wagen Transformator, Traktionsstromrichter und Fahrmotoren. Durch diese Technik wird das Ziel erfüllt, den Zug so flexibel wie möglich zu gestalten. Die verschiedensten Zugkonfigurationen sind dann möglich, wobei die vorhandene Antriebsleistung an die jeweiligen Strecken individuell angepasst werden kann.

Was gibt es darüberhinaus an Innovationen in der Bahntechnik?

Eine weitere essentielle Neuerung für künftige Züge kann der Schalttransformator sein, welcher eine Möglichkeit ist, um die Gewichts- und Größenproblematik der heutigen Spulentransformatoren zu beseitigen. Der große Unterschied zu den herkömmlichen Transformatoren besteht darin, dass nun statt Spulen wesentlich kleinere Transistoren die Spannungsänderung bewerkstelligen. Zwar haben Schalttransformatoren inzwischen bereits in vielen Haushaltsgeräten den Spulentransformator ersetzt, die Entwicklung ist aber bisher noch nicht weit genug vorangeschritten, um die hohe Spannung aus der Oberleitung alltagstauglich in den Griff zu bekommen. Es wird jedoch in Zukunft mit der Einführung dieser Art von Transformatoren zu rechnen sein, eine erste Lokomotive dieser Art fährt in der Schweiz. Für den ICx kommt diese Entwicklung aber zu spät.

Ferner wird auch das Ziel verfolgt, den Asynchronmotor durch einen vollsynchron laufenden Motor zu ersetzen. Dieser wird voraussichtlich ein Permanentmagnetmotor sein, was bedeutet, dass der Rotor nun kein Elektromagnet mehr ist, wodurch Verluste reduziert werden und dadurch weitere Energie eingespart werden kann. Da der Synchronmotor im Vergleich mit dem Asynchronmotor ein höheres Drehmoment zur Verfügung stellt, führt diese Maßnahme auch zu weiteren Gewichts- und Platzeinsparungen. Die nächste mögliche Ausbaustufe wäre dann der Direktantrieb, d. h. die Radsatz- und die Motorwelle sind hier identisch. Das bedeutet, dass die Notwendigkeit einer Übersetzung durch ein Getriebe nun nicht mehr gegeben ist.

Letztendlich ist auch der Einfluss ausländischer Hochgeschwindigkeitszugprojekte auf die Entwicklung des ICEs nicht von der Hand zu weisen. So ist die Entwicklung des Schienenverkehrs in asiatischen Ländern wie China und Südkorea in den letzten Jahren enorm vorangeschritten und könnte somit bald auch Einfluss auf den europäischen Zugverkehr sowie den ICE haben. Zur Zeit wird der ICE zwar noch in andere Länder verkauft, jedoch kann in Ländern wie China wesentlich billiger produziert werden. Das bedeutet, sobald man dort auf dem Entwicklungsstand des ICEs angelangt ist, kann man dortige Hochgeschwindigkeitszüge günstig anbieten, was somit zu einer ernstzunehmenden Konkurrenz für den ICE führen könnte.

Quellen, Autoren

Den Schülern zur Verfügung gestellte Bücher:

Handbuch: Das System Bahn

Markus Hecht, Eberhard Jänsch, Hans Peter Lang,
Dietmar Lübke, Joachim Mayer, Walter Mittmann, Jörn
Pachl, Jürgen Siegmann, Werner Weigand
DVG Media Group GmbH/DVG Rail Media
(Eurailpress), Hamburg, 2008¹

Schienenfahrzeugtechnik

Jürgen Janicki, Horst Reinhard
Bahn Fachverlag
Mainz, 2008²

ICE. Neue Züge für Deutschlands Schnellverkehr

Daniel Riechers
transpress Verlag
Stuttgart, 2001¹

Internetquellen:

www.deutschebahn.com

www.db-systemtechnik.com

de.wikipedia.org

www.designwissen.net

www.ice-fansite.com

Das Team der Deutschen Bahn

Technische Beratung

Dr. Franz Hörli

DB Systemtechnik GmbH
Leiter Antriebs- und Informationstechnik, Bordnetze
(T.TVI 31)

Dipl. Ing. Peter Lankes

Deutsche Bahn AG
Leiter Technik Schienenfahrzeuge
(TEF 3)

Dr. Helmut Möller

Deutsche Bahn AG
Leiter Antrieb, Bremse, RAMS, Anforderungsmanagement
(TEF 33)

Dipl. Ing. Frank Panier

Deutsche Bahn AG
Projekte HGV-Triebzüge international,
Projektleiter BR 407
(TEF 1(H))

Dr. Thorsten Tielkes

DB Systemtechnik GmbH
Leiter Akustik, Erschütterungen,
Aerodynamik, Klimatechnik
(T.TVI 32)

Redaktionelle Betreuung und Gestaltung

Alfred Hechenberger

DB Systemtechnik GmbH
Leiter Marketing

Andreas Assfalg

Mediengestaltung
Produktions- und Reinzeichnungsservice

Das Team des Goethe-Gymnasiums

Autoren:

Otto Bechert
Andreas Bergner
David Bielefeld
Philip Bortner
Alexander Dierl
Thomas Forchhammer
Florian Heyder
Christian Hopf
Lukas Kastner
Dominik Kemeter
Robin Kunath
Matthias Ludwig
Michael Siweris
Johannes Stopfer
Leonard Weigl



Oberstufenjahrgang 2011/2013
am Goethe-Gymnasium Regensburg

Betreuer:

Dr. Michael Sinzinger

Fotos: Goethe-Gymnasium

Der ICE



Jeder kennt ihn, fast jeder ist schon einmal mit ihm gefahren – der ICE – die bekannteste Zuggattung Deutschlands. Doch aus welchen technischen Bauteilen er besteht und wie diese im Detail und gemeinsam funktionieren, das wissen nur die Wenigsten. In dieser Broschüre erfahren Sie, wie ein ICE aufgebaut ist und wie die einzelnen Komponenten funktionieren. Danach werden Sie eine Zugfahrt mit ganz anderen Augen betrachten!



Eine Publikation des

Goethe-Gymnasium
Goethestraße 1
D - 93049 Regensburg

MINT-EC-Schule (www.mint-ec.de)
<http://schulen.regensburg.de/goegy/>
goethe-gymnasium@regensburg.de

in Zusammenarbeit mit

Deutsche Bahn AG
DB Systemtechnik GmbH
Alfred Hechenberger
Völckerstraße 5
D - 80939 München

www.deutschebahn.com
www.db-systemtechnik.de

Erscheinungstermin

Juni 2013, 1. Auflage