

Christian Schindler (Hrsg.)

# HANDBUCH Schienenfahrzeuge

Entwicklung • Produktion • Instandhaltung

Michael Brandhorst • Torsten Dellmann • Andreas Haigermoser •  
Markus Hecht • Stefan Karch • Günter Löffler • Wolfgang Rösch



Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler (Hrsg.)

# HANDBUCH **Schienenfahrzeuge**

Entwicklung • Produktion • Instandhaltung

Dipl.-Ing. (FH) Michael Brandhorst

Prof. Dr.-Ing. Torsten Dellmann

Dr. techn. Dipl.-Ing. Andreas Haigermoser

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Prof. Dr.-Ing. Stefan Karch

Prof. Dr.-Ing. Günter Löffler

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rösch

---

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Vorwort des Herausgebers .....</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Fahrzeugtechnik .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Grundbegriffe .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Zugfördertechnik .....</b>	<b>16</b>
2.2.1	Fahrzeuggrundfunktionen .....	16
2.2.2	Geometrie Rad/Schiene.....	23
2.2.3	Rad/Schiene-Kontakt .....	28
2.2.4	Fahrwiderstände .....	48
2.2.5	Fahrleistungen .....	71
2.2.6	Antriebsstrang .....	77
2.2.7	Bremse .....	85
<b>2.3</b>	<b>(Quasi-)Statik und Dynamik der Spurführung .....</b>	<b>99</b>
2.3.1	Spurführungskräfte und Rad/Schiene-Effekte.....	99
2.3.2	Spurführungsprinzip Radsatz .....	102
2.3.3	Spurführungsprinzip Losrad .....	130
2.3.4	Spurführungsverhalten von Fahrzeugen .....	132
2.3.5	Entgleisungssicherheit in Verwindungen .....	138
<b>2.4</b>	<b>Störverhalten der Schienenfahrzeuge .....</b>	<b>139</b>
2.4.1	Modellierung .....	139
2.4.2	Störgrößen.....	141
2.4.3	Bewertung .....	146
2.4.4	Übertragungsverhalten der Fahrzeuge .....	151
<b>2.5</b>	<b>Akustik.....</b>	<b>154</b>
2.5.1	Grundlagen der Akustik .....	155
2.5.2	Schallquellen am Schienenfahrzeug .....	159
2.5.3	Messvorschriften, Grenzwerte und Spezifikationsvorschläge .....	168
2.5.4	Lärmreduktionsmaßnahmen .....	171
2.5.5	Erschütterungen und Körperschall .....	176

<b>3</b>	<b>Fahrzeugarten und Zugkonfigurationen.....</b>	<b>183</b>
3.1	Einteilung der Schienenfahrzeuge.....	187
3.2	Vollbahn-Personenzüge .....	189
3.3	Lokomotiven .....	193
3.4	Güterwaggons und -züge.....	194
3.5	Nahverkehrsfahrzeuge nach <i>BOStrab</i> .....	195
3.6	Tram-Trains und Train-Trams.....	202
<b>4</b>	<b>Fahrzeugauslegung.....</b>	<b>207</b>
4.1	Hauptparameter.....	207
4.1.1	System- und Marktanforderungen.....	207
4.1.2	Gewichtsmanagement .....	209
4.1.3	Hauptabmessungen .....	215
4.2	<b>Auslegung der tragenden Fahrzeugstrukturen.....</b>	<b>226</b>
4.2.1	Grundsätzliches Vorgehen beim Festigkeitsnachweis.....	227
4.2.2	Festigkeitsnachweis Wagenkasten.....	232
4.2.3	Fahrwerk .....	244
4.2.4	Radsatz .....	251
4.3	<b>Fahrtechnische Prüfung zur Zulassung von Schienenfahrzeugen.....</b>	<b>259</b>
4.3.1	Ziel der Zulassung.....	259
4.3.2	Stationäre Versuche.....	259
4.3.3	Streckenversuch.....	259
4.4	<b>Antriebsauslegung.....</b>	<b>263</b>
4.4.1	Das Antriebssystem eines Triebfahrzeugs .....	263
4.4.2	Auslegung der Antriebsleistung und Zugkraftberechnung.....	265
4.4.3	Nachweise für Antriebskomponenten.....	277
4.5	<b>Auslegung der Bremse .....</b>	<b>281</b>
4.5.1	Anforderungen .....	281
4.5.2	Auslegung .....	282
<b>5</b>	<b>Fahrzeugkonstruktion .....</b>	<b>315</b>
5.1	<b>Wagenkasten .....</b>	<b>315</b>
5.1.1	Anforderungen an den Wagenkasten .....	315

5.1.2	Generelle Bauprinzipien .....	318
5.1.3	Wagenkastenwerkstoffe.....	320
5.1.4	Füge- und Schutztechniken .....	326
5.1.5	Wagenkastenbauweisen .....	338
5.1.6	Ausblick.....	349
<b>5.2</b>	<b>Fahrwerk .....</b>	<b>349</b>
5.2.1	Übersicht .....	350
5.2.2	Fahrwerkskonstruktion.....	352
5.2.3	Fahrwerkskonzepte .....	354
5.2.4	Baugruppen und Komponenten.....	359
5.2.5	Neigetechnik .....	371
<b>5.3</b>	<b>Antrieb.....</b>	<b>378</b>
5.3.1	Antriebsübertragungssysteme.....	378
5.3.2	Elektrische Antriebe .....	388
5.3.3	Verbrennungsantriebe.....	403
5.3.4	Hybridantriebe .....	415
<b>5.4</b>	<b>Bremse .....</b>	<b>420</b>
5.4.1	Systemaufbau.....	420
5.4.2	Druckluftbremse .....	422
5.4.3	Elektrohydraulische Bremse.....	429
5.4.4	Schienenbremsen .....	431
5.4.5	Bremsmanagement .....	435
<b>5.5</b>	<b>Zug- und Stoßeinrichtungen .....</b>	<b>436</b>
5.5.1	Schraubenkupplung.....	436
5.5.2	Amerikanische Klauenkupplung .....	437
5.5.3	Russische Klauenkupplung .....	439
5.5.4	Automatische Mittelpufferkupplung .....	440
5.5.5	Rangierkupplung auf UIC-Zughaken .....	442
5.5.6	Albertkupplung .....	442
5.5.7	Energieverzehreinrichtungen .....	443
<b>5.6</b>	<b>Fahrzeugübergang .....</b>	<b>444</b>
5.6.1	Anforderungen an Übergänge.....	446
5.6.2	Bauarten von Übergängen .....	447

<b>5.7</b>	<b>Führerstand.....</b>	<b>453</b>
5.7.1	Entwicklung Führerstand .....	453
5.7.2	Einheitsführerstand .....	454
5.7.3	Führerraum für Straßenbahnen .....	457
<b>5.8</b>	<b>Türsysteme.....</b>	<b>457</b>
5.8.1	Anforderungen an Türsysteme .....	458
5.8.2	Aufbau eines Einstiegssystems .....	459
5.8.3	Steuerung des Türsystems .....	466
5.8.4	Weitere Türsysteme am Zug.....	467
<b>5.9</b>	<b>Fenster .....</b>	<b>468</b>
5.9.1	Anforderungen und Normen .....	468
5.9.2	Verglasung.....	469
5.9.3	Seitenfenster.....	471
5.9.4	Frontfenster .....	471
5.9.5	Notausstiegfenster .....	471
<b>5.10</b>	<b>Innenbeleuchtung .....</b>	<b>471</b>
5.10.1	Anforderungen an Beleuchtungssysteme.....	472
5.10.2	Elemente der Innenbeleuchtung.....	472
5.10.3	Lichttechnische Ausführung.....	474
5.10.4	Mechanische Ausführung.....	475
<b>5.11</b>	<b>Heizung, Lüftung, Klimatisierung.....</b>	<b>475</b>
5.11.1	Aufbau, Funktion und Einteilung der HLK-Anlagen .....	477
5.11.2	Normen, Vorschriften, Auslegungsrandbedingungen.....	478
5.11.3	Historie und Entwicklung der HLK-Anlagen.....	479
5.11.4	HLK-Anlagen für Fahrgasträume .....	480
5.11.5	Klimaaggregate.....	483
5.11.6	Luftverteilssysteme sowie Luftein- und -auslasssysteme.....	484
5.11.7	HLK-Anlagen für Führerstände.....	485
5.11.8	Entwicklungstrends bei HLK-Anlagen .....	487
<b>5.12</b>	<b>Sanitärsysteme .....</b>	<b>487</b>
<b>6</b>	<b>Fahrzeugproduktion .....</b>	<b>497</b>
<b>6.1</b>	<b>Rohbau.....</b>	<b>499</b>
6.1.1	Fertigungsschritte .....	502
6.1.2	Fertigungsvorrichtungen .....	510

<b>6.2</b>	<b>Korrosionsschutz</b> .....	<b>510</b>
6.2.1	Fertigungsschritte .....	511
6.2.2	Fertigungssysteme .....	513
6.2.3	Fertigungstechnologie.....	514
<b>6.3</b>	<b>Innenausbau</b> .....	<b>515</b>
6.3.1	Fertigungsschritte .....	515
6.3.2	Fertigungssysteme .....	516
6.3.3	Fertigungstechnologie.....	516
<b>6.4</b>	<b>Fahrwerk</b> .....	<b>517</b>
<b>6.5</b>	<b>Räder, Radsatzwellen, Radsätze</b> .....	<b>522</b>
<b>6.6</b>	<b>Inbetriebsetzung und Abnahme</b> .....	<b>526</b>
<b>7</b>	<b>Instandhaltung</b> .....	<b>529</b>
<b>7.1</b>	<b>Grundlagen der Instandhaltung</b> .....	<b>529</b>
7.1.1	Begriffe .....	529
7.1.2	Zielsetzungen.....	530
<b>7.2</b>	<b>Regeln und Normen</b> .....	<b>534</b>
7.2.1	Allgemeine Regeln und Normen .....	534
7.2.2	Schienenfahrzeugbezogene Regeln und Normen .....	537
7.2.3	Instandhaltungsbezogene Regeln und Normen .....	537
<b>7.3</b>	<b>Methoden</b> .....	<b>538</b>
7.3.1	Methodenspektrum.....	538
7.3.2	Korrektive Instandhaltung.....	540
7.3.3	Präventive Instandhaltung .....	540
7.3.4	Zustandsbezogene Instandhaltung CBM .....	541
7.3.5	Zuverlässigkeitszentrierte Instandhaltung RCM .....	541
7.3.6	Beanspruchungsbezogene Instandhaltung .....	541
<b>7.4</b>	<b>Prozesse</b> .....	<b>543</b>
7.4.1	Fahrzeugbezogener Prozess .....	543
7.4.2	Komponentenbezogener Prozess .....	545
7.4.3	Materialwirtschaftliche Prozesse.....	545
7.4.4	Logistikprozesse .....	546
<b>7.5</b>	<b>Verfahren</b> .....	<b>546</b>
7.5.1	Inspektive Verfahren.....	546
7.5.2	Wartungsverfahren .....	548
7.5.3	Instandsetzungsverfahren .....	550

<b>7.6</b>	<b>Anlagen .....</b>	<b>551</b>
7.6.1	Werkstattgestaltung .....	551
7.6.2	Werkstattausrüstung .....	555
<b>8</b>	<b>Zukünftige Entwicklung der Schienenfahrzeugtechnik .....</b>	<b>561</b>
<b>8.1</b>	<b>Globalisierung .....</b>	<b>561</b>
<b>8.2</b>	<b>Energie .....</b>	<b>563</b>
<b>8.3</b>	<b>Klima .....</b>	<b>565</b>
<b>8.4</b>	<b>Demografie .....</b>	<b>567</b>
<b>8.5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>569</b>
	Das Autorenteam .....	571
	Inserentenverzeichnis .....	576



## Vorwort des Herausgebers

Schienenfahrzeuge sind hochkomplexe technische Systeme. Sie zu entwickeln, herzustellen, zu betreiben und instand zu halten, erfordert unterschiedliches technisches Wissen von so großem Umfang, dass es von einem Fachmann allein kaum mehr ausreichend beherrscht werden kann. Zudem werden nahezu täglich neue wissenschaftlich-technische Erkenntnisse sowie Vorschriften und Normen veröffentlicht, deren Inhalte nur mit viel Aufwand nachverfolgt werden können.

Auf dem Büchermarkt existiert eine Reihe von Fachbüchern zur Technik von Schienenfahrzeugen. Einige widmen sich der Fahrzeugdynamik und Spurführungstechnik, andere eher den konstruktiven Bauweisen. Wieder andere fokussieren nur auf eine Fahrzeugart, z.B. die elektrischen Triebfahrzeuge. Auch gibt es bezüglich des ingenieur-wissenschaftlichen Tiefgangs solcher Bücher große Unterschiede. Einige wenden sich an den studierten oder studierenden Theoretiker ohne Praxiserfahrung, andere zielen auf den erfahrenen Praktiker, dem oft die theoretischen Grundlagen fehlen oder abhandengekommen sind.

Die Autoren, der Verlag und der Herausgeber sind sich darin einig, dass das vorliegende Handbuch längst überfällig ist. Als Kompendium schließt es die Lücke zwischen Theorie und Praxis und behandelt nahezu alle Bereiche der Schienenfahrzeugtechnik – sowohl bezogen auf den Produktlebenszyklus als auch auf die Fahrzeugarten. So ist es ein wertvoller Begleiter sowohl für die Studierenden der Eisenbahn- oder Schienenfahrzeugtechnik als auch für den Ingenieur in der Praxis, sei er in der Systementwicklung, der Konstruktion, der Berechnung, der Produktion oder der Instandhaltung angesiedelt.

Ich bin stolz darauf, einige der renommiertesten deutschsprachigen Fachleute unserer Zeit als Autoren für dieses Buch gewonnen zu haben. Sie stammen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, sind an der Universität oder in der Industrie beschäftigt. Sie alle haben ihre Aufgabe nebenberuflich und in ihrer Freizeit erledigt. Selbst berufliche Veränderungen hielten die Betroffenen nicht davon ab, ihre zugesagten Kapitel zu verfassen. Dafür möchte ich allen Autoren danken.

Weiterhin danke ich den vielen Helfern, die Texte gegengelesen, Informationen beschafft, Copyrights besorgt bzw. erteilt oder Kontakte hergestellt haben. Namentlich seien hier genannt: Reinhard Frank (Dresdner Verkehrsbetriebe), Jürgen Holl (Verkehrsbetriebe Karlsruhe), Tim Ortner, Achim Brüggemann (beide Alstom, Salzgitter), Michael Görner, Jürgen Schnaas, Andreas Bege, Martin Walcher (alle Siemens, Erlangen), Olaf Budig (Siemens, Nürnberg), Gerd Meyer (Siemens, Krefeld) und meine studentische Hilfskraft Nils Buschhorn, der einige Grafiken neu gezeichnet hat. Weiterhin gilt mein Dank dem Verlag, hier besonders Bettina Guiot und Ulrike Schüring für das Lektorat und dem Verlagsleiter Detlev Suchanek, der von Anfang an von dem Projekt begeistert war.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Frau, die in den vergangenen vier Jahren meinetwegen auf vieles verzichten musste.

Ihnen, liebe Leser, wünsche ich dasselbe, was mir auch widerfuhr: Viel Spaß und einen Zuegewinn an Wissen über die hochmoderne Technik des Schienenfahrzeugs.

Kaiserslautern, im Oktober 2014  
Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler

# 1 Einleitung

*Markus Hecht*

Schienenfahrzeuge sind zum einen wichtige Elemente im System Schienenverkehr, auch Eisenbahn oder kurz Bahn genannt. Zum anderen sind diese Fahrzeuge selbst hochkomplexe Systeme, die sich aus vielen Subsystemen zusammensetzen. Die großen Vorteile des Schienenverkehrs gegenüber anderen Landverkehrssystemen, wie geringer Raum- und Energiebedarf sowie niedrige Treibhausgasemissionen, kommen nur zum Tragen, wenn sowohl die Schnittstellen zur Einbindung des Fahrzeugs in das Verkehrssystem mit seiner Infrastruktur und Betriebsführungstechnik richtig ausgebildet, als auch innerhalb des Systems die Subsysteme zueinander und deren Funktionen richtig ausgeführt sind. Je nach Beförderungsaufgabe und gesetzlichen Rahmenbedingungen werden einerseits Vollbahn- und Nahverkehrsfahrzeuge, andererseits Personen- und Güterverkehrsfahrzeuge unterschieden. Eine ihren Aufgaben entsprechende Entwicklung der Fahrzeuge soll nicht nur die optimale Erfüllung der jeweiligen Anforderungen sicherstellen, sondern auch die Investitions- und Betriebskosten in tragbarem Rahmen halten.

Der Aufbau des vorliegenden Handbuchs:

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik erläutert. Nach einer begrifflichen Klärung werden die physikalischen Randbedingungen aufgezeigt. Dies sind der Rad-Schiene-Kontakt mit seinen Aufgaben Tragen und Führen sowie Antriebs- und Bremskraftübertragung. Die Fahrwiderstände – viele als Funktion der Fahrgeschwindigkeit – müssen zur Dimensionierung der Antriebsanlage bekannt sein. Die Bremstechnik in enger Abstimmung mit der Signaltechnik und der daran angeschlossenen Zugsicherungstechnik bestimmt zum einen die fahrbaren Höchstgeschwindigkeiten und zum anderen die bewegbaren Zugmassen. Die fahrdynamische Auslegung, insbesondere die Dimensionierung der Feder- und Dämpferkennwerte, ist eine weitere wichtige Disziplin zur Gewährleistung der Fahrsicherheit und eines möglichst guten Fahrkomforts. Durch die moderne Rechentechnik kann mittels fahrdynamischer Simulationen die Optimierung der Fahrzeuge mit sehr vielen Freiheitsgraden kostengünstig durchgeführt werden. Nur dadurch ist der heutige Hochgeschwindigkeitsverkehr mit planmäßigen maximalen Betriebsgeschwindigkeiten von 350 km/h und mehr praktikabel. Der Bahnlärm stört heute nicht nur bei Hochgeschwindigkeitszügen, sondern vor allem bei vornehmlich nachts fahrenden Güterzügen. Hier sind in naher Zukunft deutliche Verbesserungen umzusetzen, um auch weiterhin den Status der Bahn als umweltfreundlichstes Landverkehrsmittel zu halten.

Es folgt in **Kapitel 3** ein Überblick über die gängigen Fahrzeugkonzepte, die stark vom Einsatzzweck und von den gegebenen Randbedingungen des Fahrzeugs abhängen. So sind Fahrzeugaufbauten zunächst von dem zur Verfügung stehenden lichten Raum sowie durch Tunnel, Brücken, Bahnsteige und Signalstandorte begrenzt. Außer der reinen Funktionalität bestimmen auch der Zeitgeschmack, die Aerodynamik, die passive Sicherheit, Reinigungsanlagen und vieles mehr die Konstruktion. Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sind nicht interoperable Schienenverkehrssysteme. Deshalb können ihre Fahrzeuge sehr spezifisch auf die jeweiligen Netze und Bedürfnisse angepasst werden. Im Vergleich zu ihrer direkten Konkurrenz, dem Omnibus, besitzen sie Vorteile wie geringer Flächenbedarf und niedriger Energieverbrauch, große Beförderungsleistungsfähigkeit sowie, bei eigenem Bahnkörper, kurze Reisezeiten und Pünktlichkeit. Dem stehen die deutlich höheren Investitions- und Betriebskosten gegenüber. Niederflur-Straßenbahnfahrzeuge ermöglichen nicht nur Behinderten eine gute Zugänglichkeit, sondern reduzieren die Fahrgastwechselzeiten für alle Fahrgäste.

**Kapitel 4** beinhaltet die wichtigsten grundlegenden Rahmenvorgaben, die bei der Auslegung eines Schienenfahrzeugs zu berücksichtigen sind. Am Beispiel des Gewichtsmagements wird deutlich, dass im Produktentstehungsprozess sehr viele Schnittstellen kontinuierlich beobachtet und beeinflusst werden müssen, um bei Fertigstellung des Fahrzeugs die geforderten Radlasten genau einzuhalten. Durch die Spurführung wird zwar eine enge Begrenzung der Fahrzeugbewegung im Rahmen des Lichtraumprofils bis auf Federspiele und Verschleißmaße ermöglicht, aber gerade ältere Schienennetze aus der Frühzeit der Eisenbahn wurden auf kurze Fahrzeuge ausgelegt, insbesondere in Großbritannien und in Zentraleuropa. Für lange Fahrzeuge ergeben sich dort erhebliche Breitereinschränkungen, während jüngere Netze, z. B. in Skandinavien, mit großzügigen Profilerweiterungen im Bogen diese Probleme nicht aufweisen.

Da Schienenfahrzeuge hinsichtlich Spurführung sowie Signal- und Bremstechnik eng mit der Infrastruktur verknüpft sind, kann ihre Zulassung nur zum Teil wie gewünscht gesamteuropäisch erfolgen. Nationale Eigenheiten müssen weiterhin gebührend berücksichtigt werden, damit ein unbedenklicher Einsatz im öffentlichen Verkehr mit vertretbarem Risiko möglich ist. Die seit 1990 betriebene Vereinheitlichung der Rahmenbedingungen in Europa sollte in den kommenden Jahren zu einer Verringerung des Aufwands führen.

Als Antriebstechnik werden heute und in absehbarer Zukunft Elektro- und Dieselantrieb verwendet. Ersterer hat eindeutig Vorteile durch eine höhere Leistungsdichte, die Möglichkeit der Bremsenergieerückspeisung mit der generatorischen Bremse sowie die Verwendbarkeit „grünen“ Stroms. Vor allem bezüglich der Rückspeisefähigkeit und wegen der geringen Energieverluste sind Wechselstromsysteme im Fernbahnbereich Gleichstromsystemen überlegen. Nur im Nahverkehr sind die wesentlich leichteren und kostengünstigen Gleichstromfahrzeuge im Vorteil. Jedoch verhindern die weiterhin sehr hohen Investitionskosten der elektrischen Streckenausrüstung deren ausschließliche Nutzung. Insbesondere auf Strecken mit seltenerem Zugverkehr sind Dieselantriebe weiterhin sinnvoll und weit verbreitet, selbst wenn die einzelnen Züge mehrere 10.000 t schwer sein können, wie bei Schwerlastbahnen oder in amerikanischen geprägten Bahnsystemen. Die Antriebskonzeptalternativen Dieselhydraulik und Dieselelektrik sind hier schon lange konkurrierende Prinzipien. Bei allen elektrischen Systemen, egal ob Wechselstrom, Gleichstrom oder Dieselelektrik, werden die Drehstromfahrmotoren durch frequenz- und spannungsvariierende Umrichter gespeist.

Die klassische Eisenbahnbremse ist die druckluftbetätigte mechanische Bremse am Rad oder an der Radsatzwelle, die zwar beim Bremsen alle Bewegungsenergie in Wärme umwandelt, aber aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und damit hohen Sicherheit und guten Bremsverzögerung zum Fahrzeitgewinn bei Verspätungen unabdingbar ist. Die Sicherheit ist zum einen durch das Einleitungsprinzip mit indirekter Wirkung gewährleistet, d. h. ein Druckabfall bewirkt das Anlegen der Bremsen, zum anderen durch die Durchgängigkeit, d. h. von jedem Fahrzeug eines Zuges kann die Bremsung eingeleitet werden.

Das ausführliche **Kapitel 5** beschreibt die unterschiedlichen konstruktiv ausgeführten Lösungen für die Fahrzeugsysteme. Besonders beim Wagenkasten und bei den Fahrwerken herrscht hier eine große Vielfalt und es können nur exemplarische Beispiele vorgestellt werden.

Die Investitionskosten für Schienenfahrzeuge sind meist der wesentliche Teil der Lebenszykluskosten und so werden große Anstrengungen zur Kostensenkung bei der Fertigung unternommen. Je nach Randbedingungen können Stahl-, Aluminium- oder Hybridbauweisen mit Kunststoffbauteilen für die Wagenkästen zu den besten Ergebnissen führen. Neben der Herstellung ist die Reparierbarkeit ein weiteres Kriterium für die Materialwahl. Auch die Fügeverfahren Schweißen, Lötten, Nieten, Kleben und Schrauben werden alle im Wagenkastenbau, je nach Randbedingung, eingesetzt. Kaltfügetechniken erlauben in der Regel eine weitgehende Vormontage von Komponenten und damit eine Verkürzung der Herstellungszeit der Strukturen

gegenüber Schweißen oder Löten. Allerdings sind dann wegen der Materialdopplungen die Bauteile etwas schwerer.

Die Fahrwerke müssen eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen, Tragen, Führen, Antreiben, Bremsen sind die wesentlichen Schwingungsreduktionen in vertikaler und lateraler Richtung bei möglichst niedrigem Rollgeräusch, geringer Masse und minimalem Raumbedarf sind weitere Anforderungen. Die beiden letztgenannten Kriterien sind der Grund für die Renaissance der bereits in der Frühzeit der Eisenbahn praktizierten Innenlagerung der Radsätze. Mit Neigetechnik kann auf bestehenden kurvenreichen Strecken schneller gefahren werden. Dies sicher zu tun, für die Reisenden komfortabel, zuverlässig und mit möglichst geringen Einschränkungen am Fahrzeugumgrenzungsprofil, erfordert sehr viel Aufmerksamkeit im Entwicklungsprozess und eine aufwändigere Wartung als bei Fahrzeugen mit nicht neigenden Wagenkästen.

Weitere wichtige Subsysteme, die im Kapitel 5 behandelt werden, sind der Antrieb mit Fokus auf die elektrische und verbrennungsmotorische Leistungsbereitstellung, die Brems- und die Zug-Stoß-Einrichtung inklusive Fahrzeugübergang, die für Fahrgastfluss und -sicherheit so wichtigen Türen sowie einige die Innenraumgestaltung beeinflussenden Systeme wie Fenster, Beleuchtung, Klimatisierung und Sanitärsysteme.

In **Kapitel 6** werden die Fertigungs-, Montage- und Inbetriebnahmeprozesse für Schienenfahrzeuge erläutert. Durch die Europäisierung der Märkte sind die Stückzahlen für die einzelnen Fahrzeuggrundtypen in den letzten Jahren angewachsen, auch wenn sie, je nach Fahrzeugbetreiber, im Detail weiterhin stark voneinander abweichen können. Dadurch lohnen sich zunehmend kostengünstige Fertigungsverfahren mit aufwandsminimierenden Vorrichtungen.

Die Prozesse der modernen Instandhaltungstechnik werden in **Kapitel 7** erläutert. Die hohen Investitionskosten bei der Beschaffung verlangen eine möglichst lange Lebensdauer der Fahrzeuge von üblicherweise 30 bis 40 Jahren bei jährlichen Laufleistungen von 60.000 km bis 150.000 km im Nahverkehr und bis zu über 500.000 km im Fernverkehr. Dies ist nur mit sorgfältiger Instandhaltung erreichbar. Hohe Zuverlässigkeit bei hoher Verfügbarkeit durch kurze Werkstattaufenthalte erfordert eine gute Instandhaltbarkeit mit geeigneten Hilfsmitteln. Sowohl die Fahrzeugkonstruktion, als auch die Werkstattausrüstung und die Qualifikation des Personals müssen darauf ausgerichtet sein.

Die zukünftigen Herausforderungen und Entwicklungstendenzen sind Thema des abschließenden **Kapitels 8**. Obwohl der Verkehrsträger Schiene heute im Modal Split landesweit meistens eher klein erscheint, sind gerade in Großstädten die Marktanteile wesentlich größer und stark wachsend. Auf viele Trends wie Verstädterung, Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission und demografischer Wandel kann der Schienenverkehr mit seinen Stärken reagieren. Es ist deshalb in Zukunft klar von einer Zunahme seiner Bedeutung auszugehen. In manchen Ländern wie den Niederlanden, der Schweiz und Großbritannien ist das generell der Trend. In Ländern wie Frankreich erfreut sich der Fernverkehr wachsender Bedeutung, während in Deutschland der Schienennahverkehr leicht zunimmt.

Im vorliegenden Buch sind somit einerseits vertieft die Grundlagen der Technik eines Schienenfahrzeugs, die wichtigsten Auslegungskriterien, Konzepte und Konstruktionsprinzipien zusammengestellt. Andererseits werden auch der heute gängige Produktionsprozess und die Vorgehensweise bei der Instandhaltung behandelt. Das Buch gibt somit einen Überblick über die wichtigsten Zusammenhänge und Technologien des komplexen Systems Schienenfahrzeug.



## 2 Grundlagen der Fahrzeugtechnik

### 2.1 Grundbegriffe

Torsten Dellmann

Unter Transport ist eine bewusst vorgenommene Ortsveränderung von Personen, Gütern, Energie und Nachrichten unter Benutzung besonderer organisatorischer Maßnahmen und technischer Einrichtungen zu verstehen. Erfolgt die Beförderung von Personen oder Gütern im öffentlichen Raum (außerbetrieblich), so spricht man von Verkehrstechnik. Ist dieser begrenzt (innerbetrieblich), so handelt es sich um Fördertechnik. Beide Transportbereiche nutzen technische Einrichtungen, welche aus dem eigentlichen Verkehrsmittel – darunter ist das Transportgefäß, sprich das Fahrzeug, zu verstehen – und ortsfesten Anlagen, wie Verkehrswege und Verkehrsanlagen, bestehen, *Abb. 2.1-1*. Zusammen mit organisatorischen Maßnahmen wie Fahrplänen, Verkehrsregeln und Sicherungsmaßnahmen entsteht ein Verkehrssystem.

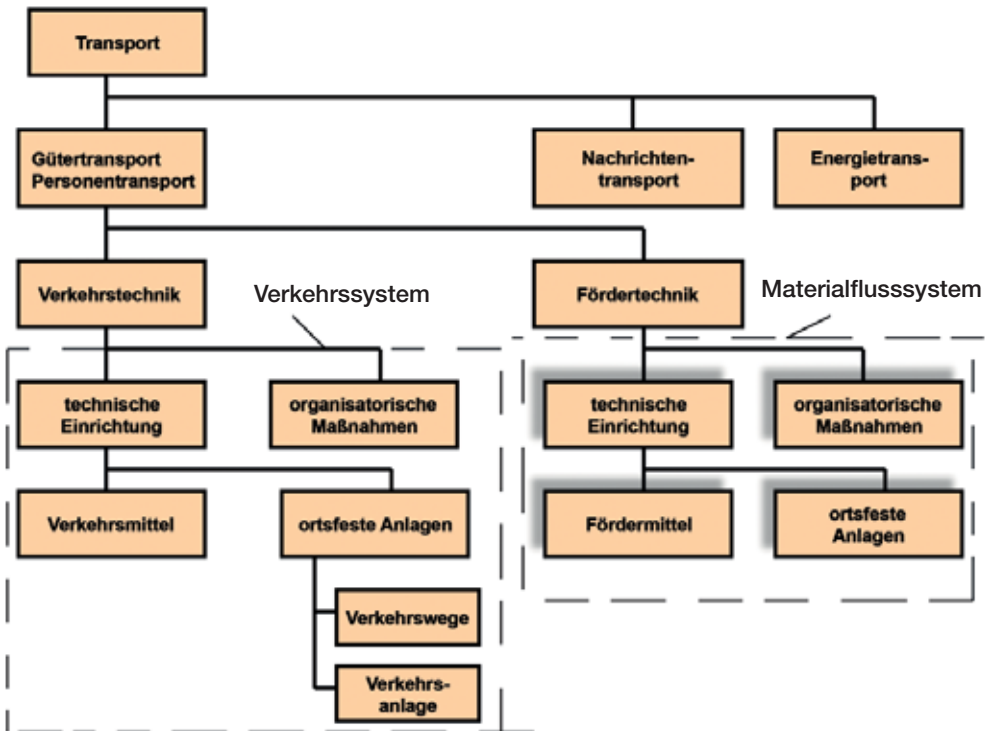


Abb. 2.1-1: Überblick und Abgrenzungen in der Transporttechnik [2-1]

## 2.2 Zugfördertechnik

Torsten Dellmann

### 2.2.1 Fahrzeuggrundfunktionen

Technisch fundamentale Aufgaben eines Fahrzeugs sind:

1. das Tragen (Abstützung des Fahrzeuggewichts in vertikaler Richtung (z),
2. das Führen (Spurhalten und horizontale (y) Führung des Fahrzeugs),
3. das Antreiben/das Bremsen (Übertragung der Kraft in Längsrichtung des Fahrzeugs (x) zur Zustandsänderung).

Physikalisch muss die Summe aller Kräfte und Momente bei einem spurgebundenen Fahrzeug derart vorliegen, dass es einem vorgegebenen Kurs folgen kann, ohne den Kontakt mit dem Fahrweg zu verlieren, *Abb. 2.2-1*. Zur Erfüllung dieser Grundaufgabe steht gemäß *Abb. 2.2-2* eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung.

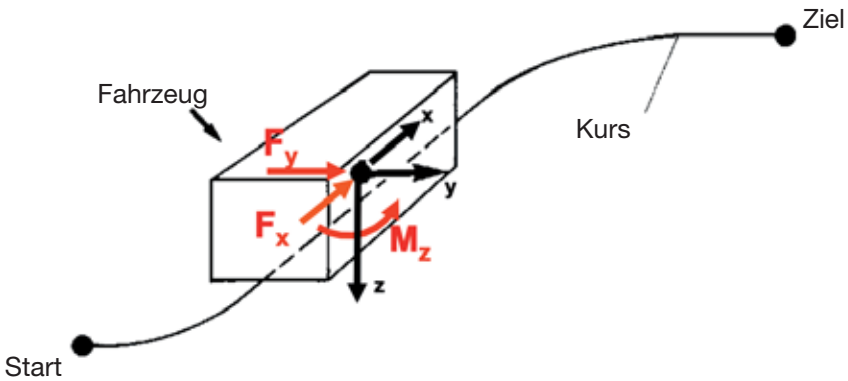


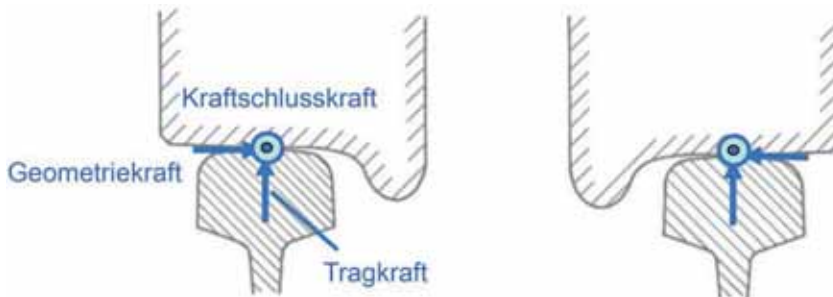
Abb. 2.2-1: Kräfte und Momente bei einem spurgeführten Fahrzeug

Möglichkeit / Funktion	1	2	3	4	5	6	7
<b>Tragen</b>	 starr	 elastisch	 pneumatisch	 permanent magnetisch	 elektromagnetisch	 elektrodynamisch	 hydraulisch
<b>Führen</b>	 formschlüssig	 kraftschlüssig	 pneumatisch	 permanent magnetisch	 elektromagnetisch	 elektrodynamisch	 hydraulisch
<b>Treiben / Bremsen</b>	 formschlüssig	 kraftschlüssig	 rückstoßend	 permanent magnetisch	 elektromagnetisch	 elektrodynamisch	 hydraulisch

Abb. 2.2-2: Realisationsmöglichkeiten der Grundfunktionen geführter Fahrzeuge

Fahrzeuge können anhand dieser Elemente klassifiziert und geordnet werden. Ein Schienenfahrzeug ist dadurch gekennzeichnet, dass das Tragen über ein abrollendes Stahlrad auf einer Stahlschiene, das Führen durch eine Kombination von Kraftschluss- und Geometrie Kräften in der Berührfläche zwischen Rad und Schiene und das Antreiben und Bremsen durch Kraftschlusskräfte (Reibkräfte) zwischen Stahlrad und Schiene erfolgt, *Abb. 2.2-3*.

Gemäß *DIN 25003* sind Schienenfahrzeuge als spurgebundene Fahrzeuge mit Spurkranz definiert, welche im Gleis über eine gleichbleibende Spurweite und ein gleichbleibendes Spurspiel geführt werden [2-2].



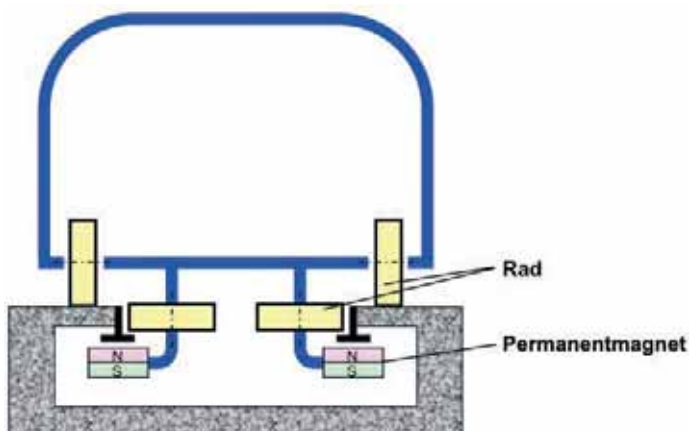
**Abb. 2.2-3: Spurführungsprinzip für Schienenfahrzeuge**

### 2.2.1.1 Andere spurgeführte Fahrzeuge

Entsprechend der Realisationsmöglichkeiten dieser Grundfunktionen aus *Abb. 2.2-2* haben sich neben den reinen Schienenfahrzeugen nach *DIN 25003* eine Reihe weiterer spurgebundener Fahrzeuge entwickelt. Stellvertretend für die unterschiedlichen Umsetzungen seien folgende Beispiele genannt:

#### *Permanentmagnetgleiter (M-Bahn 1991)*

Die M-Bahn (Magnetbahn) war in Berlin ein spurgebundenes Verkehrssystem auf eigenem Fahrweg, das ab 1984 im Versuchsbetrieb und von 1989 bis 1991 im Passagierbetrieb eingesetzt wurde.



**Abb. 2.2-4: Prinzip des Magnetschwebesystems**



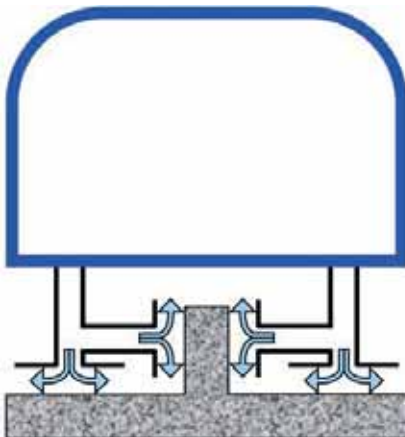
Der Fahrweg stellt einerseits die Spur zum Fahren, andererseits auch gleichzeitig einen Teil des Antriebs (Linearmotor) dar. Starke Dauermagnete im Kabineninneren tragen 85% des Fahrzeuggewichts, die verbleibenden 15% werden von Tragrollen übernommen. Die Führung ist durch seitliche Führungsrollen realisiert, *Abb. 2.2-4 und 2.2-5*.



**Abb. 2.2-5:** M-Bahn Verkehrsmuseum Nürnberg (© BVG Archiv – [www.berliner-verkehrsseiten.de](http://www.berliner-verkehrsseiten.de))

*Aerodynamischer Gleiter (Aérotrain 1965)*

Der Aérotrain war ein Konzept einer Einschienen-Luftkissenschwebbahn, das in Frankreich von 1965 bis 1974 entwickelt wurde. Die Trag- und Führungskräfte werden über Luftkissen erzeugt. Ein Propeller- bzw. Strahltriebwerk erzeugt über Rückstoßkräfte den Antrieb. Am 22. Januar 1965 wurden mit einem derartigen Fahrzeug bereits Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 422 km/h erreicht, trotzdem kam es nie zu einer kommerziellen Realisierung, *Abb. 2.2-6 und 2.2-7*.



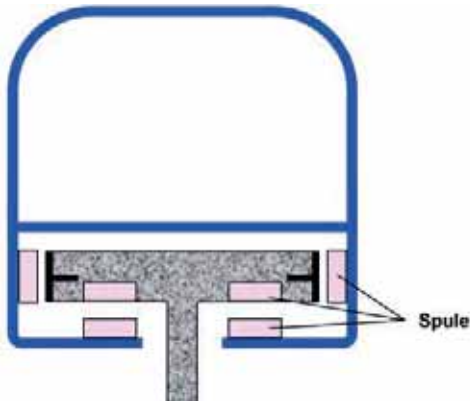
**Abb. 2.2-6:** Luftkissensystem



**Abb. 2.2-7:** Luftkissenfahrzeug Experimental 02 (© Jürgen Körner)

*Elektromagnetischer Gleiter (Transrapid)*

Der Transrapid ist eine in Deutschland für den Hochgeschwindigkeitsverkehr entwickelte Magnetschwebebahn. Er wird nach dem Langstatorprinzip angetrieben. Das Primärteil (der Stator) wird verlängert und damit Teil der Fahrbahn. Die Spurführung erfolgt über seitliche elektrische Spurführungsmagnete, *Abb. 2.2-8* und *2.2-9*.



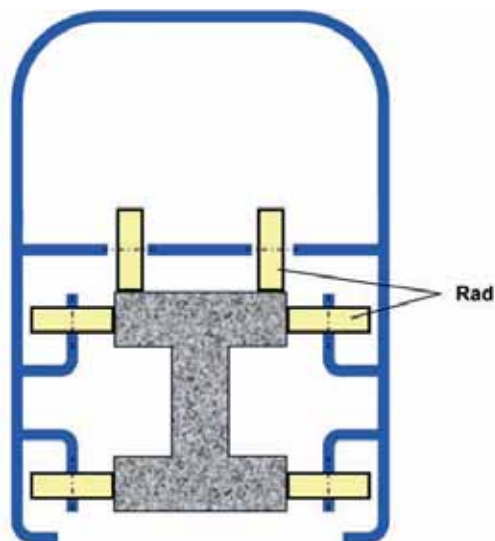
**Abb. 2.2-8:** Prinzip des Langstators



**Abb. 2.2-9:** Transrapid (© IFS)

*Standbahn (Alwegbahn)*

Das Konzept der Alwegbahn findet vor allem in Asien (Tokio-Flughafen, Kuala Lumpur, Singapur) und in den USA (Disneyworld) Anwendung. Es werden Drehgestellwagen verwendet, die mit luftbereiften Zwillingstragrädern und ebenfalls luftbereiften Führungsrädern ausgerüstet sind. Die Wagen sitzen auf aufgeständerten Fahrbalken aus Beton oder Stahlprofilen und umschließen den Fahrweg teilweise, *Abb. 2.2-10* und *2.2-11*.



**Abb. 2.2-10:** Trag- und Führungsprinzip Alwegbahn



Abb. 2.2-11: BOMBARDIER INNOVIA Monorail 200 System Las Vegas, USA  
(© Bombardier Inc.)

### Hängebahn (SkyTrain Flughafen Düsseldorf)

Die Fahrzeuge der Hängebahn hängen mit je zwei Fahrwerken an einem unten offenen Hohlkastenträger, in dessen Innerem der Antrieb, das Fahrwerk und die Stromversorgung wettergeschützt untergebracht sind. Trag- und Antriebsfunktion werden von zwei links und rechts der Öffnung auf dem Boden des Hohlträgers laufenden vollgummibereiften Rädern erbracht. Führungsrollen am unteren und oberen Rand der Trägerinnenseiten sorgen für horizontale Führung, Abb. 2.2-12 und 2.2-13.

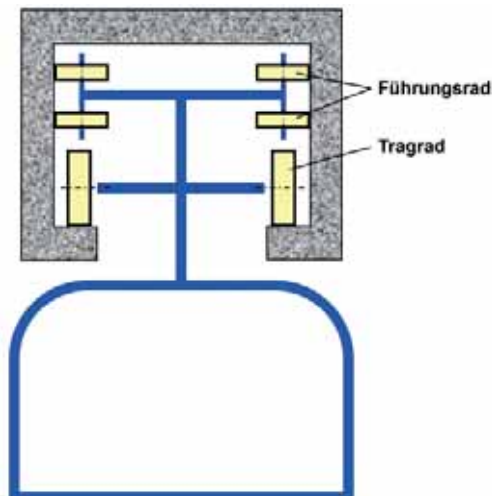


Abb. 2.2-12: Trag- und Führungsprinzip der Hängebahn (H-Bahn)



Abb. 2.2-13: SkyTrain Flughafen Düsseldorf (© IFS)

#### Seilstandbahn (Cable Car, San Francisco, USA)

Bei diesem System erfolgt die Fahrzeugführung nach dem Spurführungsprinzip der klassischen Eisenbahn; der Antrieb erfolgt durch ein Seil, welches in einem Schacht unterhalb der Straße verläuft. Das Seil ist endlos und immer mit gleichbleibender Geschwindigkeit umlaufend. Beim Anfahren hängt sich der Triebfahrzeugführer über eine zangenähnliche Greifvorrichtung an das Seil (Rutschkupplungsprinzip), beim Anhalten löst er das Fahrzeug vom Seil. Einrichtungsfahrzeuge werden am Ende der Linie auf einer Drehscheibe gedreht und können auf der Gegenfahrbahn mit dem rücklaufenden Seil zurückfahren. Zweirichtungsfahrzeuge werden einfach auf das Gegengleis geschoben. Neuere Systeme befinden sich z. B. in Las Vegas, USA. Hier ist das Fahrzeug jedoch fest mit dem Seil verbunden und wird fahrerlos betrieben, Abb. 2.2-14 und 2.2-15.

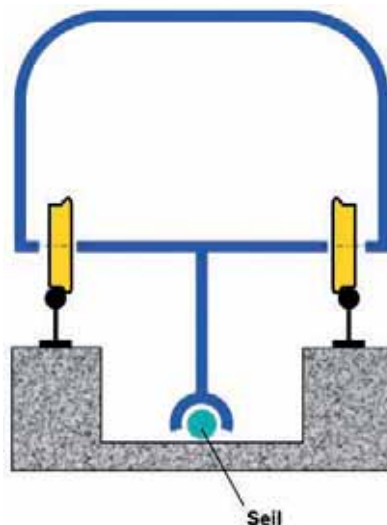


Abb. 2.2-14: Antriebsprinzip der Seilstandbahn



Abb. 2.2-15: Cable Car in San Francisco

2.2.1.2 Das Schienenfahrzeug als System

Systemtheoretisch betrachtet ist das Schienenfahrzeug als eine Funktionseinheit zu verstehen, welche aus verschiedenen Elementen mit bestimmten Eigenschaften besteht, die untereinander Wechselwirkungen ausüben. Auf dieses System wirken Aufwendungen und Störungen, welche zu Auswirkungen führen, Abb. 2.2-16. Darunter sind beabsichtigte Größen wie Raumüberwindung und Transportleistung, aber auch unerwünschte Verluste wie Verschleiß, Schwingungen oder Geräusch zu verstehen.

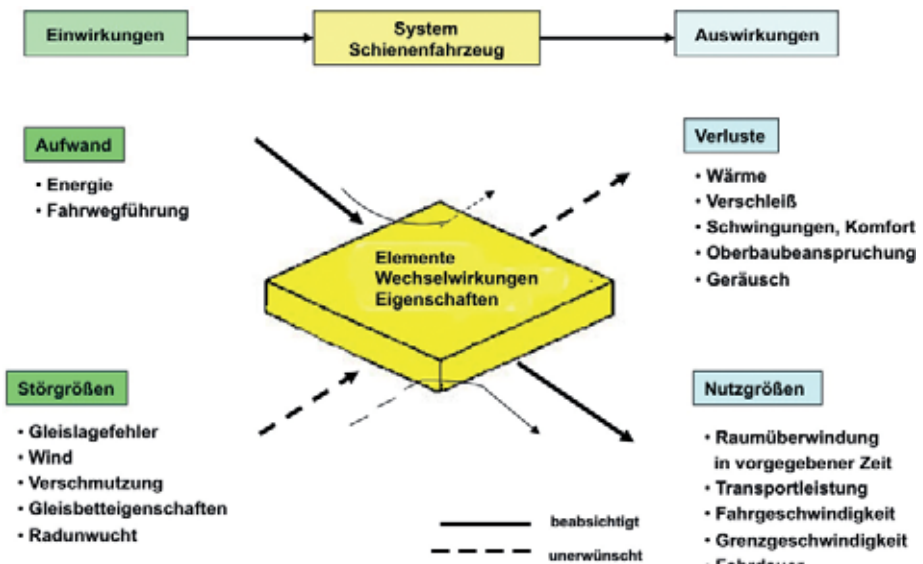


Abb. 2.2-16: Systemtheoretische Betrachtung des Schienenfahrzeugs

Die einzelnen Elemente und Baugruppen, wie Wagenkasten, Fahrwerk, Antrieb, Bremse und Innenausstattung, sind so auszulegen bzw. miteinander zu kombinieren, dass mit einem Minimum an Aufwand ein Maximum an Nutzen erzielt werden kann, *Abb. 2.2-17*.

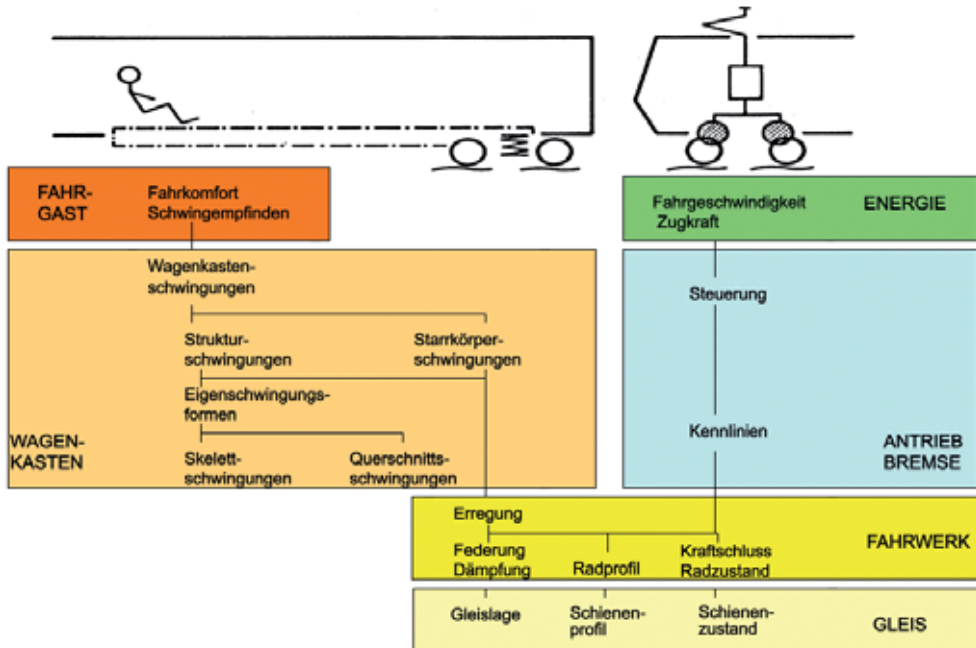


Abb. 2.2-17: Das Schienenfahrzeug und seine Hauptbaugruppen mit Funktionalitäten

## 2.2.2 Geometrie Rad/Schiene

Die notwendigen Kräfte zum Tragen, Antreiben/Bremsen und zur Führung des Fahrzeugs werden im Rad/Schiene-Kontakt aufgebracht. Ihre Größe ist unter anderem von der Kontaktgeometrie im Berührungspunkt abhängig. Je nach Einsatz ist prinzipiell zwischen Vollbahn- und Straßenbahnprofilen zu unterscheiden, *Abb. 2.2-18* [2-3]. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen in der Breite und der Spurkranzkontur.

Für Vollbahnen werden entsprechend der *UIC* bzw. *EN-Normen* [2-4] vorwiegend Schienen des Typs 60 E1 (früher UIC 60), 60 E2, sowie bei Nebenstrecken für geringere Achslasten UIC 54 oder S 49 eingesetzt. Die Zahlen geben dabei das Metergewicht (kg/m) wider.

In *Abb. 2.2-19* ist die typische Schienenform für Voll- und Straßenbahnen dargestellt. Während Vollbahnfahrzeuge ausschließlich die Breitfuß- oder Vignolschiene befahren, nutzen Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge sowohl Vignolschienen auf eigenem Gleiskörper als auch Rillenschienen im Straßenbett. Zur sicheren Führung in Weichen- und Kreuzungsbereichen werden bei der Breitfußschiene zusätzlich Radlenker eingesetzt, während diese bei der Rillenschiene im Profil integriert sind.

Die Tabelle in *Abb. 2.2-20* gibt einen Überblick der wichtigsten technischen Daten gängiger Schienentypen.



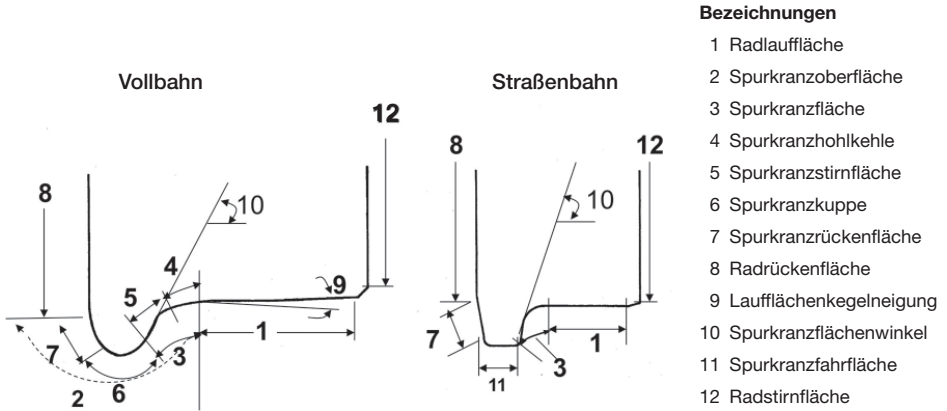


Abb. 2.2-18: Voll- und Straßenbahnprofil

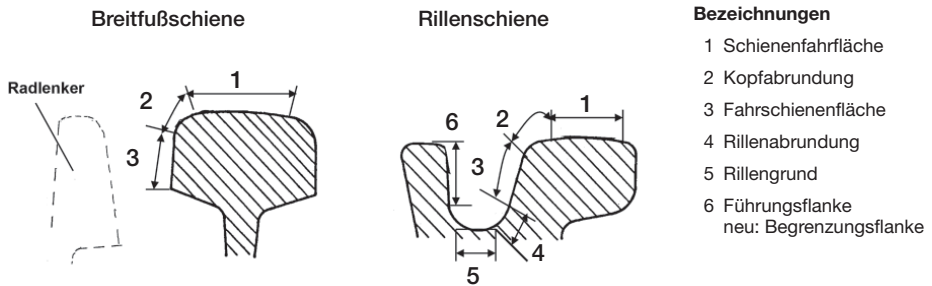


Abb. 2.2-19: Typische Schienenprofile für Voll- und Straßenbahnen



Schienenform	Profil	Höhe mm	Fußbreite mm	Kopfbreite mm	Stegstärke mm	Widerstand Wx = cm²	Gewicht kg/m
 Schwere Vignolschiene	S 41/10	138,0	125,0	67,0	12,000	196,00	41,38
	S 41/14	138,0	125,0	67,0	12,000	196,00	40,95
	S 49	149,0	125,0	67,0	14,000	240,00	49,43
	S 54	154,0	125,0	67,0	16,000	262,00	54,54
	S 64	172,0	150,0	74,0	16,000	356,00	64,92
	UIC 54 E	161,0	125,0	67,0	16,000	276,37	53,81
	UIC 54	159,0	140,0	70,0	16,000	279,19	54,43
	UIC 60 (60E1/2)	172,0	150,0	72,0	16,500	333,50	60,34
R 65	180,0	150,0	75,0	18,000	435,00	64,72	
 Rillenschiene	Ri 52/13	130,0	150,0	113,0	12,000	198,20	51,43
	Ri 53/13	130,0	150,0	113,0	12,000	199,90	52,97
	Ri 59/10	180,0	180,0	113,0	12,000	351,80	58,96
	Ri 59/13	180,0	180,0	113,0	12,000	350,70	58,20
	Ri 60/10 (Ri60N)	180,0	180,0	113,0	12,000	355,00	60,48
	Ri 60/13	180,0	180,0	113,0	12,000	353,40	59,74
	Ph 38	182,0	150,0	127,0	12,000	311,00	56,40
	Ph 37 a	180,0	180,0	135,0	13,000	377,00	66,80

Abb. 2.2-20: Hauptmaße von Vignol- und Rillenschienen [2-5]

Aus dem Zusammenspiel von Rad- und Schienengeometrie ergeben sich die für die Spurführung relevanten Größen wie Spurmaß, Leitmaß und Spurweite. Der Wortstamm Maß deutet auf die Radsatzgeometrie und der Wortstamm Weite auf die Gleisgeometrie hin, *Abb. 2.2-21*, [2-6]. Die Referenzpunkte für das Gleis liegen 14 mm (für Schienen mit Kopfabrundungsradien von 10 mm und kleiner 10 mm) unter der Schienenoberkante (SO) und für den Radsatz 10 mm unterhalb des Messkreisdurchmessers. Das Spurspiel  $2\delta$  ist durch die Differenz von Spurweite  $S$  und Spurmaß  $s$  gegeben, *Gl. (2.2-1)*. In diesem Spurkanal ist das Fahrzeug zu führen:

$$2\delta = S - s \quad (2.2-1)$$

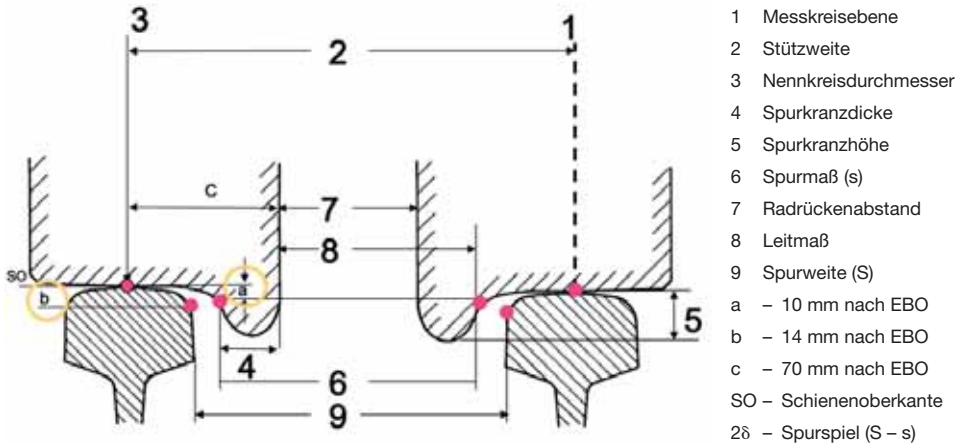


Abb. 2.2-21: Geometrie zwischen Radsatz und Gleis

Damit Fahrzeuge unterschiedlicher Bauart bzw. Verschleißzustände im Spurkanal ohne Zwängen und Entgleisung geführt werden können, sind Grenzmaße gemäß [2-6] einzuhalten. Einen Auszug zeigt die Tabelle in *Abb. 2.2-22*.

	Nennmaß (mm)	Grenzmaß (mm)	
Spurweite $S$	1435	1465 Hauptgleis 1470 Nebengleis 1430	max max min
Spurmaß $s$ (Räder > 840 mm)		1410 1426	min max
Stützweite (Deutschland)	1500		
Spurkranzdicke (Räder > 840 mm)		22 33	min max
Spurkranzhöhe (Räder > 760 mm)		26 36	min max

Abb. 2.2-22: Nenn- und Grenzmaße für Gleise und Fahrzeuge



In den zurückliegenden fast 190 Jahren Eisenbahngeschichte hat sich die **Technik der Schienenfahrzeuge** stets weiterentwickelt. Heute ist das für die Entwicklung, den Bau, den Betrieb und die Instandhaltung notwendige Technikwissen so komplex und umfangreich, dass es von einem Fachmann allein nicht mehr umfassend beherrscht werden kann. Die Fahrzeuge sind je nach Einsatzzweck stark spezialisiert und damit höchst unterschiedlich in ihrer Ausführung. Sie bestehen zudem aus vielen verschiedenen Subsystemen, von denen wiederum jedes Einzelne nur durch Spezialwissen und viel Erfahrung hergestellt werden kann. Neben dem Spezialisten, der sich hauptsächlich mit seinem Gewerk auskennt, sind aber nach wie vor die Generalisten gefragt, wenn es darum geht, ein Schienenfahrzeug in Gänze zu verstehen.

Die Zahl der jährlich ausgebildeten Schienenfahrzeugingenieure ist relativ gering und liegt deutlich unter dem Bedarf von Industrie, Betreibern und Behörden. So werden viele Fachleute aus anderen Branchen rekrutiert und über „Learning by Doing“ zu Experten in ihrem Tätigkeitsbereich ausgebildet. Gerade diesen Quereinsteigern fehlt oft das nötige Grundlagen- und Systemwissen über das Schienenfahrzeug. Dadurch wird die heutzutage unbedingt notwendige Zusammenarbeit mit den Experten anderer Schienenfahrzeuggewerke erschwert.

Dieses Buch schließt die Lücke zwischen den zahlreichen auf dem Markt verfügbaren theoretischen Werken, die sich auf ein Thema oder wenige spezielle Themen der Schienenfahrzeugtechnik beschränken, und den ebenfalls am Markt verfügbaren Büchern für Praktiker. Zielgruppe sind Studierende der Eisenbahn- und Schienenfahrzeugtechnik sowie Fachleute aus der Industrie, die ihr Wissen auffrischen bzw. ergänzen möchten.

ISBN 978-3-7771-0427-0



9 783777 104270