

Helmut Lehmann

# Fahrdynamik der Zugfahrt

– Theorie und Anwendung –

4. überarbeitete Auflage

Helmut Lehmann

# Fahrdynamik der Zugfahrt

## Theorie und Anwendung

**einschließlich einer Einführung in einige Aspekte der Fahrplankonstruktion  
und der Leistungsfähigkeit von Bahnanlagen.**

Mit 208 Abbildungen, zahlreichen Tabellen, Übersichten  
und einer Formelsammlung

4. überarbeitete Auflage

Frankfurt am Main  
2020

Alle in dieser Schrift wiedergegebenen Informationen wurden mit der gebotenen Sorgfalt ermittelt und überprüft. Aus Gründen, die u.a. aus dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt herrühren, unterliegen sie jedoch Veränderungen. Daher wird weder eine Garantie, noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen für einen bestimmten Zweck übernommen.

In allen Teilen und Verzeichnissen erwähnte Handels- und Gebrauchsnamen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Inhaber aller dadurch begründeten Rechte, ohne Ausnahme bekannter oder noch zu entwickelnder Vervielfältigungs-, Kommunikations- und Speicherverfahren, sind Autor und Verlag. Zitate nur mit ausführlicher Quellenangabe.

Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Auszügen daraus ist, auch im Einzelfall, nur in den Grenzen der Bestimmungen des Gesetzes über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (UrhG) der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965, einbegriffen alle Änderungen und Novellierungen, zulässig, bedarf aber in jedem Fall der schriftlichen Genehmigung von Autor und Verlag.

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

**Helmut Lehmann**

**Fahrdynamik der Zugfahrt**

– Theorie und Anwendung –

4. überarbeitete Auflage

Shaker Verlag  
Düren 2020

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7512-0

ISSN 0945-0742

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>0. Vorwort</b>	<b>6</b>
<b>1. Grundlagen der Fahrdynamik in der klassischen Physik</b>	<b>8</b>
1.1. Einordnung der Fahrdynamik und die Besonderheiten der Eisenbahnfahrzeuge	8
1.2. Kinematische Grundlagen der Fahrzeugbewegung	11
1.2.1. Beschreibung und Darstellung der Bewegung des Punktes	11
1.2.2. Sonderfälle der Bewegung des Punktes und spezielle Betrachtungen	17
1.2.3. Beschreibung und Darstellung der Bewegung starrer Körper	21
1.3. Dynamik der Fahrzeugbewegung - Grundlagen -	22
1.4. Kinetik	24
1.5. Kräfte am Fahrzeug/Fahrzeugverband	25
1.6. Thermodynamische Grundlagen	27
1.7. Elektrik	29
1.8. Strömung der Flüssigkeiten und Gase	31
1.9. Zur Geschichte der Fahrdynamik der Zugfahrt	33
<b>2. Antriebskräfte der Eisenbahnfahrzeuge und deren Leistung</b>	<b>61</b>
2.1. Das Erzeugen der Antriebskräfte	61
2.2. Arten und Bezugspunkte der Antriebskräfte nach Traktionsarten	64
2.2.1. Dampftraktion	64
2.2.2. Traktion durch Brennkraftmaschinen	74
2.2.3. Elektrische Traktion	114
2.3. Der Massenfaktor als „Energiespeicher“	126
2.4. Fahrdynamische Charakteristiken der einzelnen Traktionsarten	127
2.5. Alternative Antriebsarten	134
<b>3. Fahrwiderstandskräfte</b>	<b>150</b>
3.1. Widerstandskräfte durch den Fahrweg	150
3.2. Widerstandskräfte durch den Wagenzug	153
3.3. Triebfahrzeug-Widerstandskräfte	174
3.4. Aerodynamische Widerstandskräfte	175
<b>4. Verzögerungskräfte und deren Leistung</b>	<b>180</b>
4.1. Einteilung der Bremssysteme nach ihrer Wirkungsweise und dem Erzeugen der Bremskräfte	180
4.2. Modelle zur Bremswegberechnung	191
<b>5. Grundphasen der Bewegung von Eisenbahnfahrzeugen</b>	<b>196</b>
5.1. Fahrleistungsgleichgewicht und spezifische Fahrkräfte	196
5.2. Beschleunigungsfahrt	199
5.3. Beharrungsfahrt und antriebslose Schwungfahrt	208
5.4. Bremsfahrt	210
5.5. Wechselwirkung der Phasen infolge der Strecken- und Betriebsverhältnisse	211

<b>6.</b>	<b>Traktionsvermögen der Triebfahrzeuge und Anforderungen des Eisenbahnbetriebes</b>	<b>214</b>
6.1.	Traktionsvermögen und Leistungsspektrum der Traktionsarten	214
6.2.	Die Aufstellung von Leistungstafeln für Triebfahrzeuge	219
6.2.1.	Grundsätzliches Verfahren	219
6.2.2.	Ermittlung mit Hilfe eines Personalcomputers	224
6.3.	Die Berechnung von Grenzlasten	228
6.3.1.	Grundlagen, Begriffe und betriebliche Erfordernisse	228
6.3.2.	Mechanische Grenzlasten und „Schlepplasten“	233
6.3.3.	Die Besonderheit der Anlaufsteigung	242
6.3.4.	Thermische Einflüsse und Belastungsgrenzen	249
6.4.	Die automatisierte Grenzlastermittlung	266
6.4.1.	Erfordernis und Anforderungen	266
6.4.2.	Allgemeine Verfahrensbeschreibung	267
6.4.3.	Verfahren bei der Deutschen Bahn	268
<b>7.</b>	<b>Energiebedarf und Energieumsetzung durch Eisenbahnfahrzeuge</b>	<b>269</b>
7.1.	Allgemeine Betrachtungen	269
7.2.	Autonome Triebfahrzeuge	270
7.3.	Netzabhängige Triebfahrzeuge	284
7.4.	Speichertriebfahrzeuge und alternative Antriebe	288
7.5.	Energieumsetzung durch Triebfahrzeuge	295
7.6.	Der Nutzen von Energiebedarfsrechnungen	298
<b>8.</b>	<b>Der Fahrweg und dessen digitale Nachbildung</b>	<b>302</b>
8.1.	Das Vorbild – Trassierung und Durchbildung	302
8.2.	Datenmodell und Ablage	304
<b>9.</b>	<b>Die Nachbildung der Fahrten von Eisenbahnfahrzeugen</b>	<b>308</b>
9.1.	Definition der Simulation von Zugfahrten und praktizierte Verfahren	308
9.2.	Die Realisierung: Einfache Routinen oder Projekte?	320
9.3.	Wertung und Verwertung der Ergebnisse	327
<b>10.</b>	<b>Der Nutzen der Zugfahrtsimulation für die Fahrplankonstruktion</b>	<b>337</b>
10.1.	Fahrpläne und Zeitelemente – Begriffsbestimmungen	337
10.2.	Streckenbelegung und Zugtrassen	339
10.3.	Streckenfahrpläne für den gemischten Betrieb	345
10.4.	Einlegen von Zügen	347
10.5.	Die Rolle der Grenzlasten im Fahrplangeschäft	354
10.6.	„Trassenmanagement“	362
10.7.	Vereinfachtes Verfahren zur Fahrzeitermittlung	366
<b>11.</b>	<b>Das Leistungsvermögen der Eisenbahnanlagen für den Zugverkehr</b>	<b>381</b>
11.1.	Die Leistungsfähigkeit der Eisenbahnstrecken und deren Grenzen	381

11.2.	Die Verarbeitung der Streckenleistungen in den Knoten und Leistungsgrenzen	396
11.3.	Zur Einschätzung von Eisenbahnnetzen	408
<b>Schrifttum</b>		<b>409</b>
<b>Bildnachweis</b>		<b>419</b>
<b>Personen- und Sachwortverzeichnis</b>		<b>420</b>
<b>Formelsammlung</b>		<b>427</b>
- Größen, Einheiten und Indizes		
- Gleichungen und Erläuterungen		

## 0. Vorwort zur 1. bis 3. Auflage

Eisenbahnunternehmen erfolgreich zu führen und Leistungen der Eisenbahn wirksam zu verkaufen, setzen voraus, die Vorteile des *Systems Bahn* zu erkennen, zur Geltung zu bringen und sie täglich in richtige Entscheidungen umzusetzen. Dazu bedarf es des angeeigneten Fachwissens und der Erfahrung. Wesentliche Grundlagen hierfür bietet die *Fahrdynamik der Zugfahrt*.

„Die Aufgaben der Fahrdynamik sind im letzten Grunde wirtschaftlicher Natur.“ [1] Sie haben die Ermittlung der Kosten für die Benutzung und Unterhaltung des Verkehrsmittels Eisenbahn, in Abhängigkeit von dessen technischer Funktion, also der *Betriebskosten*, zum wesentlichen Inhalt. Deren Ermittlung über fahrdynamische Modelle wird derzeit nur in wenigen Bereichen verfolgt, dennoch hat die Fahrdynamik der Zugfahrt eher an Bedeutung gewonnen. Die Betrachtung betrieblich-technischer Vorgänge und die Ableitung von Schlussfolgerungen für den einzelnen Zug, bis hin zu solchen für ganze Betriebsgebiete, sind ihr gegenwärtiger Inhalt.

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. *Wilhelm Müller*, der Nestor der Fahrdynamik der Verkehrsmittel in Deutschland, und dessen Schüler schufen die systematischen Grundlagen für die wirtschaftliche Beurteilung und zur effizienten Planung und Steuerung betrieblich-technischer Vorgänge der Eisenbahnen. Es ist ein Erfordernis unserer Zeit, jenes Wissen, welches die Erkenntnis des wesentlichen Vorzuges der Eisenbahn beinhaltet, auch in neuen Publikationen zu verbreiten:

*Geringer Fahrwiderstand und also geringer Energiebedarf je Transporteinheit*. Genau hierdurch ist die Zukunftsfähigkeit des Verkehrsmittels Eisenbahn dauerhaft begründet.

Das Buch wendet sich an diejenigen, welche sich fahrdynamische Grundlagen erarbeiten wollen bzw. als Praktiker des Eisenbahnbetriebes ihr Wissen vertiefen oder erweitern möchten. In gestraffter Form werden zunächst einige physikalische Grundlagen vermittelt. Ein kurzer historischer Abriss schafft das Verständnis für das Werden und die heutige Stellung der Fahrdynamik der Eisenbahnfahrzeuge. Die Beschreibung der Kräfte am Fahrzeugverband, der Phasen der Fahrzeugbewegung und der Leistungseinschätzung der Triebfahrzeuge geschieht ausführlich, wobei der Leser die meisten Herleitungen verfolgen kann.

Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt auf Computeranwendungen. Dazu gehören insbesondere die Zugfahrtsimulation, die eng damit verbundene Grenzlastrechnung und die Leistungseinschätzung der Eisenbahnanlagen sowie Betrachtungen über die hochaktuelle Problematik der Energiebedarfsprognosen im Betrieb. Die Verwendung von Ergebnissen aus der Zugfahrtrechnung und deren Nutzen für den Bahnbetrieb werden aufgezeigt. Der Orientierung und Übersichtlichkeit dienen ein Sachwort- und ein Literaturverzeichnis sowie eine integrierte Formelsammlung.

Besonderer Dank gebührt Herrn Bundesbahndirektor Dipl.-Ing. *Hartmuth Sonntag* für die wertvollen fachlichen Hinweise und die kritische Durchsicht des Manuskripts. Der Shaker-Verlag Aachen ermöglichte auf unkomplizierte Weise das Erscheinen dieses Buches. Frau *Heike Jansen* danke ich ganz herzlich für die freundliche und aufgeschlossene Zusammenarbeit.

Die nun vorliegende 3. Auflage berücksichtigt aktuelle Entwicklungen und die zahlreichen Hinweise aus der Leserschaft. Das hierdurch dokumentierte Interesse, wozu inzwischen auch Mitteilungen über den Nutzen des Buches gehören, ist beachtlich und beweist den Bedarf an der Vermittlung des dargebrachten Inhalts.

*Helmut Lehmann*

## Vorwort zur 4. Auflage

Am Sinn und Zweck der vorliegenden Arbeit hat sich gegenüber den bisherigen Auflagen nichts geändert: Vermittlung von Grundlagen der *Fahrdynamik der Zugfahrt* und unmittelbar angrenzender Fachgebiete. Die Entwicklung des Systems Bahn aber vollzieht sich adäquat zum technischen Fortschritt und ist ihrem Charakter nach evolutionär. Am Rad-Schiene-System änderten sich Details, das Prinzip jedoch nicht. Wohl aber sind Entwicklungen wesentlich, welche die Antriebstechnik, die Trieb- und Laufwerke der Fahrzeuge, aber auch die Sicherungstechnik und Betriebsorganisation betreffen.

Längst sind der Einsatz an Traktionsenergie, das Traktionsvermögen der Triebfahrzeuge, die Flexibilität der Zugkonfigurationen, Umweltschutz und Reisekomfort keine bloßen Eigenschaften der Bahn mehr, sondern harte Wettbewerbsfaktoren. Die Bahn hat es inzwischen immer schwerer, sich am Verkehrsmarkt zu behaupten. Allzu forsche Zeitgenossen negieren gar die Zukunftsfähigkeit der Eisenbahn. Doch nähert man sich gewisser Grenzen, die alltäglich durch Verkehrsmeldungen der Rundfunkanstalten dokumentiert werden.

Nur zu offensichtlich präferiert die Verkehrspolitik, nicht allein hierzulande, die Straße. Die Folgen sind, neben dem täglichen Verkehrschaos, spürbare Umweltprobleme und ein hoher personeller und materieller Aufwand in Transport und Logistik, dem Postulat der Politik diametral entgegenstehend!

Immer noch aber hat die Eisenbahn den besonderen Vorteil des *geringen Fahrwiderstands und also geringen Energieverbrauchs je Transporteinheit*. Das allein, verbunden mit der Eigenschaft, das geeignetste Transportmittel für die Beförderung großer Fahrgastzahlen bzw. Gütermengen über mittlere bis große Entfernungen zu sein, sichert ihre Zukunft. Auch und gerade die Entfaltung eines hohen Reisekomforts und dessen Unabhängigkeit von der Fahrzeugsteuerung ist das Angenehme einer Bahnreise.

Der Leser wird feststellen, dass alternative Antriebstechnik, näheres Eingehen auf Fahrwiderstände, die Rolle des Rad-Schiene-Kontaktes, die Grenzlastproblematik sowie die Energiebedarfsprognose (Alternative Antriebe) neu bzw. vertieft in den Text Eingang gefunden haben.

Das Anliegen der vorliegenden Schrift ist es also nicht allein, den Inhalt der Fahrdynamik der Zugfahrt zu vermitteln. Sie soll vielmehr dazu beitragen, Managemententscheidungen zu stützen, Kenntnisse, die vorhanden sind, vertiefen und auch eine Wegleitung sein, die Eisenbahn als unverzichtbaren Bestandteil des Verkehrswesens unseres Landes zu entwickeln.

Mein aufrichtiger Dank gilt den vielen Hinweis- und Ideengebern aus der eigenen beruflichen Praxis, von Fahrzeugherstellern, aus der Lehre sowie aus der Leserschaft.

Ein besonderes Bedürfnis ist es mir, dem Verlag für das Verständnis und die Hilfe zu danken, die das Erscheinen des vorliegenden Bandes ermöglichten.

*Helmut Lehmann*