

Jürgen Stoffregen

Motorradtechnik

**Handbuch Verbrennungsmotor**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

**Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik**

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

**Automobildesign und Technik**

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

**Bremsenhandbuch**

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

**Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion**

herausgegeben von H. Burg und A. Moser

**Fahrwerkhandbuch**

herausgegeben von B. Heiing und M. Ersoy

**Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen**

von F. Kramer

**Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung**

von G. Leister

**Grundlagen Verbrennungsmotoren**

herausgegeben von G. P. Merker und Chr. Schwarz

**Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz**

herausgegeben von U. Seiffert und G. Rainer

**Rennwagentechnik**

von M. Trzesniowski

**Handbuch Kraftfahrzeugelektronik**

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

**Handbuch Fahrerassistenzsysteme**

herausgegeben von H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf

Jürgen Stoffregen

# Motorradtechnik

Grundlagen und Konzepte von  
Motor, Antrieb und Fahrwerk

7., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 391 Abbildungen

POPULÄR | ATZ/MTZ-Fachbuch



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

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.

1. Auflage 1995
- 2., verbesserte Auflage 1996
- 3., überarbeitete und erweiterte Auflage 1998
- 4., überarbeitete und erweiterte Auflage 2001
- 5., überarbeitete und erweiterte Auflage 2004
- 6., durchgesehene und erweiterte Auflage 2006
- 7., überarbeitete und erweiterte Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg  
Satz: KLEMENTZ publishing services, Gundelfingen  
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin  
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.  
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0698-7

---

## Vorwort zur 7. Auflage

Auch im Zeitalter virtueller Welten bleibt die Faszination des Motorradfahrens, der Mechanik und der sichtbaren wie hautnah zu spürenden Technik ungebrochen. Die Unmittelbarkeit und die Dynamik der Bewegungsabläufe sowie die enge Koppelung zwischen Mensch und Maschine machen das Erlebnis auf einem Motorrad einzigartig wie bei keinem anderen Landfahrzeug. Dieses Buch möchte Einblicke in den technischen Aufbau von Motorrädern geben und die Technik sowie ihre Hintergründe in einem Gesamtzusammenhang erläutern.

Die erste Auflage des Buches *Motorradtechnik* kam 1995 auf den Markt, und dieses Buch hat sich mittlerweile als Standardwerk etabliert. Zuschriften zeigen, dass sein Konzept die Leser begeistert und das Buch seine Zielsetzung erreicht hat: Die Technik moderner Motorräder *verständlich* und fesselnd darzustellen und neben Fachleuten auch interessierte Motorradfahrer anzusprechen. Dieses war und bleibt dem Autor ein besonderes Anliegen.

In den 14 Jahren seit seinem Erscheinen wurde das Buch regelmäßig aktualisiert und erweitert. Längst überfällig war die Aufnahme eines Kapitels über elektronische Systeme und moderne Bordnetze im Motorrad. Dieses wird mit der vorliegenden **7. Auflage** nachgeholt. Die neuesten Entwicklungen bei Regelungssystemen für den Antrieb wie auch bei den Bremsen (ABS) wurden in die bisherigen Kapitel integriert.

Die seit einiger Zeit verstärkt geführte Diskussion über die Endlichkeit des Erdöls und die resultierenden Forderungen nach Senkung des Kraftstoffverbrauchs für Kraftfahrzeuge hat die motorisierten Zweiräder erneut als Individualverkehrsmittel für Transportaufgaben ins Gespräch gebracht. Motorräder mit elektrischen Antrieben machen die ersten Schritte in den Markt. Diese Entwicklungen werden im Kapitel *Zukunftsentwicklungen* kurz angerissen. Dennoch wird die Marktstellung des Motorrades als Freizeitfahrzeug auch in den nächsten 15 Jahren erhalten bleiben und der Verbrennungsmotor wird auch nach 2020 die dominierende Antriebsquelle für Motorräder sein. Deshalb wird dieses Fachbuch weiterhin seiner bisherigen Hauptausrichtung treu bleiben. Es bleibt also auch in der Zukunft bei dem, was schon in der ersten Auflage 1995 gesagt wurde:

Das Motorrad vereint auf engstem Bauraum modernste Motoren-, Fahrwerks- und Werkstofftechnologie. In vielen Bereichen des Fahrzeugbaus hat das Motorrad Schrittmacherfunktionen für die Einführung neuer Technologien geleistet. Erinnert sei hier an die Mehrventiltechnik, die, im Motorrad seit rund 30 Jahren Standard, erst viele Jahre nach dem Motorrad Einzug in die Großserienmotoren des Automobils gefunden hat. Ein weiteres Beispiel ist der Rahmenbau. Geschweißte Verbundkonstruktionen aus Aluminium-Strangpressprofilen und Aluminium-Gussteilen sind im Motorradbau längst auf breiter Basis eingeführt, während beim Automobil diese Technik nach wie vor nur in Einzelfällen angewandt wird.

Auch die moderne Forschung befasst sich seit Jahren aufgrund der Initiative einiger Hochschulinstitute intensiver mit der Technik des Motorrades. Wichtige Fragen der Fahrdynamik und der Fahrinstabilitäten konnten dadurch aufgeklärt werden, was wesentlich dazu beigetragen hat, die Hochgeschwindigkeitsstabilität moderner Motorräder zu perfektionieren.

Die Erkenntnisse moderner Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dringen über den Kreis der damit befassten Fachleute immer noch nur wenig hinaus. Gleichwohl besteht bei vielen, die sich beruflich oder auch nur privat mit dem Motorrad beschäftigen der Wunsch, die technischen

Zusammenhänge näher kennenzulernen. Dieses Buch wurde geschrieben, um dem interessierten Leser das aktuelle Wissen neuzeitlicher Motorradtechnik zugänglich zu machen. Abgeleitet aus den theoretischen Grundlagen werden die Konstruktionsprinzipien von Motor, Antrieb und Fahrwerk ausführlich erläutert und die praktische Entwicklung moderner Motorräder dargestellt. Aus dem Blickwinkel der industriellen Praxis heraus, werden dabei auch die Zielkonflikte zwischen dem technisch Möglichen und wirtschaftlich Sinnvollen nicht ausgeklammert.

Das Buch ist entstanden aus der gleichnamigen Lehrveranstaltung, die der Autor an der Hochschule München seit nunmehr 22 Jahren hält. Hauptberuflich war er viele Jahre bei BMW in der Motorradentwicklung und später als Pressesprecher für den Geschäftsbereich Motorrad tätig. Heute leitet er das Produktmanagement für Fahrerausstattung und Sonderzubehör im Hause BMW Motorrad.

Das Buch wendet sich gleichermaßen an Studierende von Fach- und Hochschulen, wie an Zweiradmechaniker und Meister sowie an alle technikinteressierten Motorradfahrer. Durch den Verzicht auf schwierige mathematische Herleitungen zugunsten anschaulicher Zusammenhänge und ausführlicher Erläuterung bleibt es auch für den Motorradfahrer mit physikalischem Grundverständnis gut lesbar. Wichtige technisch-physikalische Grundlagen können auch im *Glossar technischer Grundbegriffe* am Ende des Buches nachgeschlagen werden.

Es ist dem Verfasser als begeistertem Motorradfahrer ein besonderes Anliegen, dass statt trockener Theorie anwendbares Praxiswissen im Vordergrund steht und damit das Lesen auch Freude bereitet. Dass das gewählte Konzept eines lesbaren Fachbuchs beim Leser ankommt, zeigt sich daran, dass die bisherigen Auflagen jeweils rasch vergriffen waren. Studierende und Fachleute der Fahrzeugtechnik und verwandter Fachrichtungen, die sich an manchen Stellen vielleicht eine strenger wissenschaftliche Darstellung wünschen, seien auf die zahlreichen Literaturstellen verwiesen. Eine tiefere Einarbeitung in die Problemstellungen wird damit leicht möglich.

Für die Überlassung von Bildmaterial und Unterlagen bedanke ich mich wiederum bei allen Institutionen und Unternehmen der Motorradindustrie, sowie bei befreundeten Motorrad-Fachzeitschriften. Mein Dank gilt ebenso allen Kollegen, Studenten und Motorradfahrern, die in Gesprächen und Diskussionen mit vielen Ideen und Gedanken fortlaufend zur weiteren Gestaltung dieses Buches beigetragen haben. Namentlich erwähnen möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Thomas Ringholz, Herrn Dipl.-Ing. Claus Polap und Herrn Dipl.-Ing. Gert Fischer, die bei der Konzeption der ersten Auflage wichtige Beiträge zu einigen Kapiteln geleistet haben. Nicht vergessen möchte ich meine Frau, ohne deren Verständnis für meinen Zeitaufwand dieses Buch nie hätte entstehen und weiterentwickelt werden können.

Wie von Beginn an, hat Herr Dipl.-Ing. Ewald Schmitt auch die vorliegende 7. Auflage wieder mit großem persönlichen Engagement gefördert. Ihm und dem Verlag Vieweg+Teubner danke ich für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung und Beratung.

München und Olching, Oktober 2009

*Jürgen Stoffregen*

# Inhaltsverzeichnis

## Gesamtfahrzeug

<b>1 Einführung</b>	1
1.1 Verkehrsmittel Motorrad und wirtschaftliche Bedeutung	1
1.2 Charakteristische Eigenschaften von Motorrädern	6
1.3 Baugruppen des Motorrades und technische Trends	7
<b>2 Fahrwiderstände, Leistungsbedarf und Fahrleistungen</b>	10
2.1 Stationäre Fahrwiderstände	10
2.1.1 Rollwiderstand	10
2.1.2 Luftwiderstand	12
2.1.3 Steigungswiderstand	14
2.2 Instationäre Fahrwiderstände	15
2.2.1 Translatorischer Beschleunigungswiderstand	15
2.2.2 Rotatorischer Beschleunigungswiderstand	15
2.3 Leistungsbedarf und Fahrleistungen	16

## Motor und Antrieb

<b>3 Arbeitsweise, Bauformen und konstruktive Ausführung von Motorradmotoren</b>	21
3.1 Motorischer Arbeitsprozess und seine wichtigsten Kenngrößen	21
3.1.1 Energiewandlung im Viertakt- und Zweitaktprozess	22
3.1.2 Reale Prozessgrößen und ihr Einfluss auf die Motorleistung	28
3.2 Ladungswechsel und Ventilsteuerung beim Viertaktmotor	33
3.2.1 Ventilöffnungsdauer und Ventilsteuerdiagramm	33
3.2.2 Ventilerhebung und Nockenform	36
3.2.3 Geometrie der Gaskanäle im Zylinderkopf	47
3.3 Ladungswechsel und Steuerung beim Zweitaktmotor	49
3.3.1 Grundlagen des Ladungswechsels bei der Schlitzsteuerung	49
3.3.2 Membransteuerung für den Einlass	56
3.3.3 Schiebersteuerung für Ein- und Auslass	58
3.3.4 Externes Spülgebläse	59
3.3.5 Kombinierte Steuerungen und Direkteinspritzung	62
3.4 Zündung und Verbrennung im Motor	64
3.4.1 Reaktionsmechanismen und grundsätzlicher Verbrennungsablauf	64
3.4.2 Beeinflussung der Verbrennung durch den Zündzeitpunkt	67
3.4.3 Irreguläre Verbrennungsabläufe	72
3.4.4 Bildung der Abgasschadstoffe	77
3.5 Gas- und Massenkräfte im Motor	78
3.5.1 Gaskraft	79
3.5.2 Bewegungsgesetz des Kurbeltriebs und Massenkraft	80
3.5.3 Ausgleich der Massenkräfte und -momente	84

3.6	Motorkonzeption und geometrische Grundauslegung .....	107
3.7	Konstruktive Gestaltung der Motorbauteile .....	111
3.7.1	Bauteile des Kurbeltriebs und deren Gestaltung .....	111
3.7.2	Gestaltung von Kurbelgehäuse und Zylinder .....	129
3.7.3	Gestaltung von Zylinderkopf und Ventiltrieb .....	137
3.7.4	Beispiele ausgeführter Gesamtmotoren .....	163
3.8	Kühlung und Schmierung .....	166
3.8.1	Kühlung .....	166
3.8.2	Schmierung .....	171
3.9	Systeme zur Gemischaufbereitung und Sauganlagen .....	173
3.9.1	Vergaser .....	173
3.9.2	Einspritzung .....	179
3.10	Abgasanlagen .....	188
3.10.1	Konventionelle Schalldämpferanlagen .....	188
3.10.2	Abgasanlagen mit Katalysatoren .....	192
3.11	Elektrische Systeme – Energieversorgung, Elektronik und Bordnetz .....	196
3.11.1	Elektrische Energieversorgung .....	196
3.11.2	Bordnetz .....	198
<b>4</b>	<b>Motorleistungsabstimmung im Versuch .....</b>	<b>200</b>
4.1	Grundlagen der Gasdynamik beim Ladungswechsel .....	200
4.2	Einfluss der Steuerzeit .....	202
4.3	Auslegung der Sauganlage .....	204
4.4	Auslegung der Abgasanlage .....	209
<b>5</b>	<b>Motorentuning .....</b>	<b>211</b>
<b>6</b>	<b>Kupplung, Schaltgetriebe und Radantrieb .....</b>	<b>223</b>
6.1	Kupplung .....	223
6.2	Schaltgetriebe .....	228
6.3	Radantrieb .....	233
<b>7</b>	<b>Kraftstoff und Schmieröl .....</b>	<b>238</b>
7.1	Erdöl als Basis für die Herstellung von Kraft- und Schmierstoffen .....	238
7.1.1	Kettenförmige Kohlenwasserstoffe .....	239
7.1.2	Ringförmige Kohlenwasserstoffe .....	242
7.1.3	Weitere in der Petrochemie gebräuchliche Bezeichnungen .....	243
7.2	Rohölverarbeitung .....	244
7.2.1	Destillation .....	244
7.2.2	Konversionsverfahren .....	246
7.2.3	Entschwefeln im Hydrotreater .....	247
7.3	Ottokraftstoffe .....	247
7.3.1	Zusammensetzung von Ottokraftstoffen .....	247
7.3.2	Unerwünschte Bestandteile im Ottokraftstoff .....	248
7.3.3	Kraftstoffzusätze (Additive) .....	248
7.3.4	Wesentliche Eigenschaften von Ottokraftstoffen .....	249
7.3.5	Rennkraftstoffe .....	253

7.4	Motorenöle	253
7.4.1	Grundöle	256
7.4.2	Additive	257
7.4.3	Viskositätsindexverbesserer	259
7.4.4	Klassifizierung von Motorenölen	261
7.4.5	Zweitaktöle	265
7.4.6	Rennöle	266
7.5	Getriebeöle	268
7.6	Ölzusätze	270

## Fahrwerk

<b>8</b>	<b>Konstruktive Auslegung von Motorradfahrwerken</b>	271
8.1	Begriffe und geometrische Grunddaten	271
8.2	Kräfte am Motorradfahrwerk	273
8.3	Rahmen und Radführungen	277
8.3.1	Bauarten und konstruktive Ausführung von Motorradrahmen	277
8.3.2	Bauarten und konstruktive Ausführung der Vorderradführung	291
8.3.3	Bauarten und konstruktive Ausführung der Hinterradführung	306
8.3.4	Federung und Dämpfung	321
8.4	Lenkung	327
8.4.1	Steuerkopflenkung	328
8.4.2	Achsschenkellenkung	329
8.4.3	Radnabenlenkung	330
8.5	Bremsen	331
8.6	Räder und Reifen	333
<b>9</b>	<b>Festigkeits- und Steifigkeitsuntersuchungen an Motorradfahrwerken</b>	340
9.1	Betriebsfestigkeit von Fahrwerkskomponenten	340
9.2	Steifigkeitsuntersuchungen	344
9.3	Dauererprobung des Gesamtfahrwerks	345
<b>10</b>	<b>Fahrdynamik und Fahrversuch</b>	347
10.1	Geradeausfahrt und Geradeausstabilität	347
10.1.1	Kreiselwirkung und Grundlagen der dynamischen Stabilisierung	347
10.1.2	Fahrinstabilitäten Flattern, Pendeln und Lenkerschlagen	353
10.2	Kurvenfahrt	362
10.2.1	Einlenkvorgang und Grundlagen der idealisierten Kurvenfahrt	362
10.2.2	Reale Einflüsse bei Kurvenfahrt	364
10.2.3	Handling	367
<b>11</b>	<b>Regelungssysteme für Bremsen und Antriebsschlupf</b>	369
11.1	Grundlegende Gesetzmäßigkeiten bei der Bremsung	369
11.2	Stabilitätsverlust beim Bremsen und Grundfunktion des ABS	374
11.3	ABS-Komponenten und ausgeführte Seriensysteme	378

11.4 Kurvenbremsung .....	395
11.5 Antriebsschlupfregelung .....	397

## Karosserie und Gesamtentwurf

<b>12 Design, Aerodynamik und Karosserieauslegung</b> .....	401
12.1 Design als integraler Bestandteil der Motorradentwicklung .....	401
12.2 Aerodynamik und Verkleidungsauslegung .....	411
12.3 Fahrerplatzgestaltung und Komfort .....	418

## Individualisierung

<b>13 Zubehör, Spezialteile und technische Verfeinerung</b> .....	419
13.1 Verbesserungen und Spezialteile für Motor und Antrieb .....	419
13.2 Verbesserungen und Spezialteile für das Fahrwerk .....	424
13.2.1 Rahmen, Radführungen und Federbeine .....	424
13.2.2 Räder .....	429
13.2.3 Bremsanlage .....	430
13.2.4 Lenker, Bedienelemente, Fußrasten, Sitzbänke .....	433
13.2.5 Verkleidungen, Karosserieteile und Tanks .....	435
13.3 Gepäcksysteme und sonstiges Zubehör .....	439
13.4 Komplettumbauten .....	440

## Zukunftsentwicklungen

<b>14 Trends und zukünftige Anforderungen im Motorradbau</b> .....	443
--	-----

Literaturverzeichnis .....	455
----------------------------	-----

Anhang – Glossar technischer Grundbegriffe .....	457
--	-----

Sachwortverzeichnis .....	465
---------------------------	-----

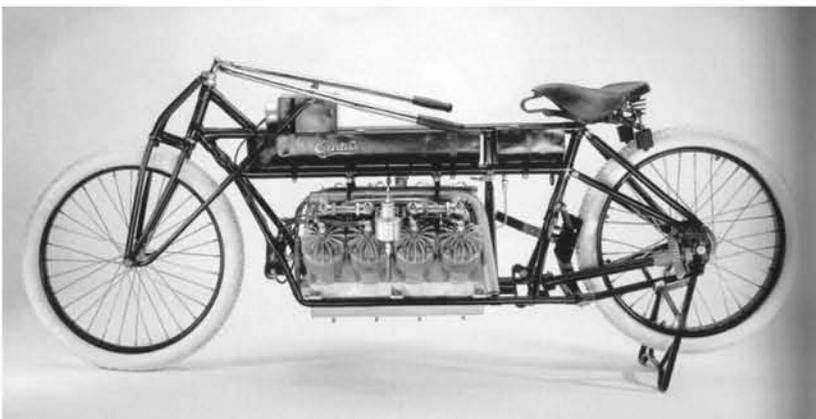
## 1 Einführung

Motorräder und Motorradfahren üben auf viele Menschen eine große Faszination aus. Sie beruht im Wesentlichen auf der Unmittelbarkeit des Fahrerlebnisses, der Dynamik und der Intensität der Sinnenbeanspruchung. Motorradfahren bedingt ein sehr enges Zusammenspiel aller Sinne und des Körpers und eine permanente Rückkoppelung und Interaktion zwischen dem Fahrer und der Technik seiner Maschine. Man kann es als sinnliches Technikerleben beschreiben und Bernt Spiegel spricht in seinem sehr interessanten Buch [1.1] von hoch entwickeltem Werkzeuggebrauch. Diese Emotionalität und die Vielfalt des Erlebens sind wesentliche Gründe, dass sich trotz einer Zeitströmung, die den Individualverkehr kritischer als früher betrachtet, Motorräder zunehmender Beliebtheit erfreuen.

Obgleich sich dieses Buch mit der Technik befasst, soll zu Beginn das Motorrad kurz in seinem wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfeld sowie in seiner Rolle als Verkehrsmittel betrachtet werden. Denn das Umfeld wirkt zusammen mit den emotionalen Faktoren auf die technische Entwicklung unmittelbar ein. Von erheblicher Bedeutung für die Technik des Motorrades sind auch seine ganz speziellen Eigenschaften, die sich z.T. erheblich von denen anderer Straßenfahrzeuge unterscheiden. Auch diese muss man sich bewusst vor Augen führen, wenn man technische Entwicklungen im Motorradbau verstehen will.

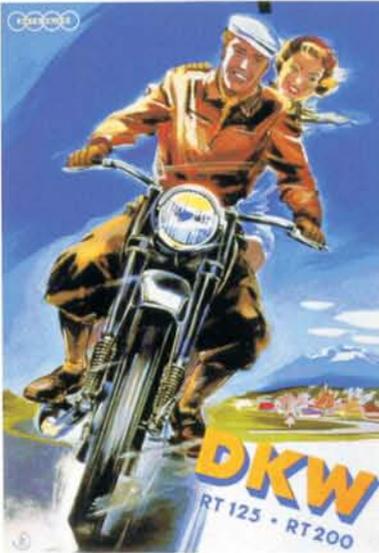
### 1.1 Verkehrsmittel Motorrad und wirtschaftliche Bedeutung

Die Bedeutung des Motorrades als Verkehrsmittel ist einem stetigen Wandel unterlegen, und dies wird auch zukünftig der Fall sein. Von den Anfangsjahren bis etwa Ende der 20er Jahre waren Motorräder exklusive Fahrzeuge, die von wohlhabenden Leuten vornehmlich für Sport- und Freizeitwecke eingesetzt wurden, **Bild 1.1**.



**Bild 1.1** Renn-Motorrad der 20er Jahre (Curtiss V-8 von 1907)

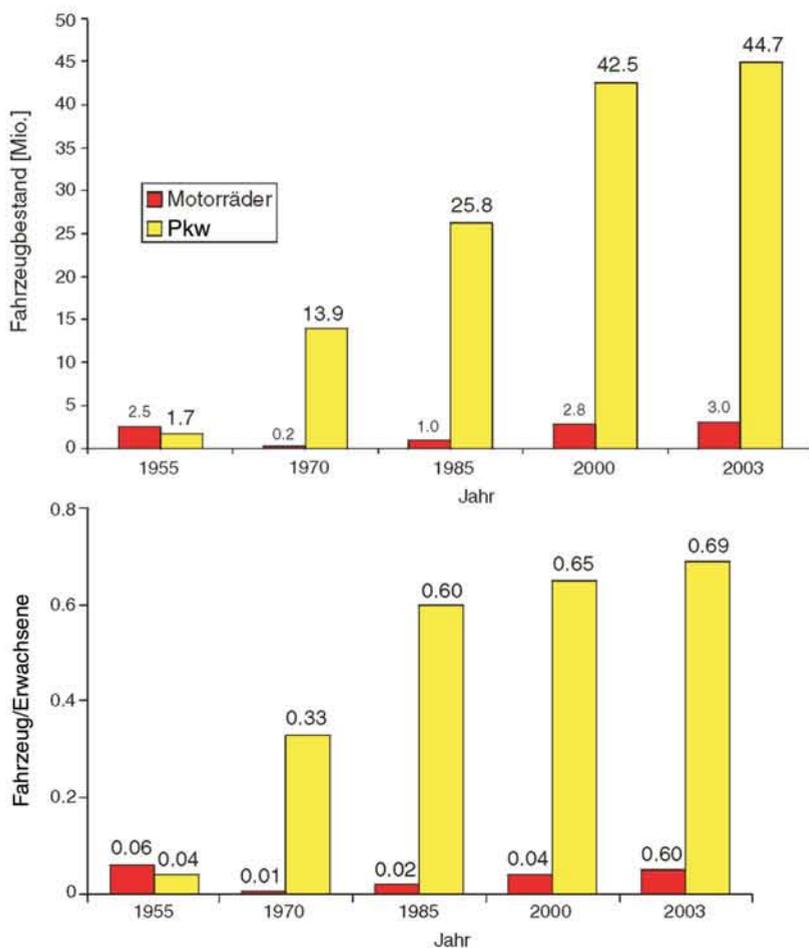
In den 30er Jahren avancierten sie aber bereits zum Individualverkehrsmittel, das einzige, das sich eine größere Bevölkerungsschicht überhaupt leisten konnte. Ein Auto war für die meisten Menschen in Europa gerade auch in der Nachkriegszeit bis gegen Ende der 50er Jahre unerschwinglich. Die verbreitetsten Motorräder jener Zeit waren zumeist einfach gebaute, leichte Maschinen mit häufig nicht mehr als 200 cm<sup>3</sup> Hubraum, **Bild 1.2**.



**Bild 1.2**  
Motorrad als Individualverkehrsmittel der 50er Jahre,  
DKW RT 125

Die Bestandszahlen von Motorrädern (ab 125 cm<sup>3</sup>) und Pkw in der Bundesrepublik Deutschland von den 50er Jahren bis in neuere Zeit spiegeln dieses eindrucksvoll wider, **Bild 1.3**. Die Grafik zeigt im oberen Teil den Fahrzeugbestand und darunter die Aufteilung der Fahrzeuge auf die erwachsene Bevölkerung (älter als 18 Jahre) als Maßstab für die Motorisierung. Der Bestand war 1955 bei Motorrädern um 50 % höher als bei Autos. Das Motorrad war das Individualfahrzeug breiter Schichten, das die Massenmotorisierung in Deutschland (West wie Ost) in der Zeit des Wiederaufbaus einleitete. Nach Motorrädern bestand ein Bedarf, sie waren nützlich und hatten ein positives soziales Prestige. Dies änderte sich bekanntermaßen rapide mit dem Anstieg des Wohlstandes in den 60er Jahren, gegen deren Ende das Motorrad in Westdeutschland ganz vom Markt zu verschwinden drohte.

Es spielte mit nicht einmal mehr 2 % des Pkw-Bestandes nur noch eine Außenseiterrolle. Von den ehemals sieben großen und bedeutenden Herstellern von Motorrädern über 125 cm<sup>3</sup> in Westdeutschland überlebten zunächst noch vier (BMW, Maico, Zündapp und die Sachs-Gruppe), wobei BMW als Einziger noch großvolumige Motorräder fertigte. Durch die besonderen Verhältnisse in der damaligen DDR vollzog sich die Entwicklung dort vollkommen anders. Das Motorrad behielt eine dominierende Stellung bis zur Wiedervereinigung bei. Der Hersteller MZ gehörte mit Produktionszahlen zwischen 80.000–100.000 Einheiten zu den großen Herstellern, **Bild 1.4**. Im übrigen Europa vollzog sich eine etwas weniger dramatische, grundsätzlich aber ähnliche Entwicklung wie in Westdeutschland.



**Bild 1.3** Bestandszahlen für Motorräder (ab 125 cm<sup>3</sup>) und Pkw relativ zur Bevölkerung in der BRD



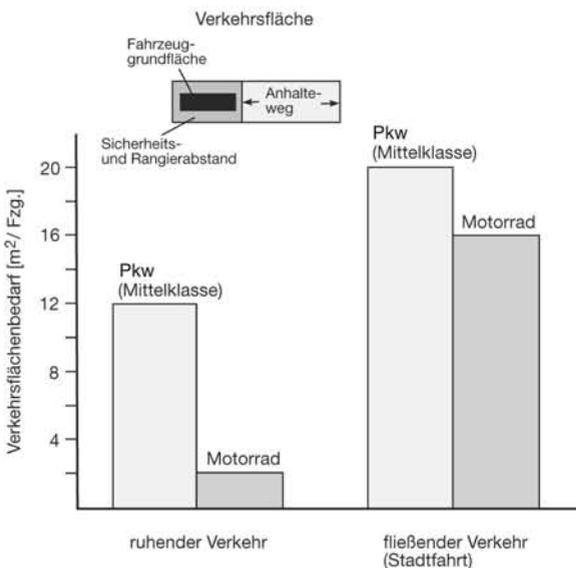
**Bild 1.4**  
MZ ETS 250

Die bekannte, unerwartete Renaissance Anfang der 70er Jahre ging von den USA aus, wo das Motorrad als Sport- und Freizeitgerät neu entdeckt wurde und auch zum Symbol der individuellen Freiheit wurde. Die Entwicklung ist bekannt, es kam zu einem Motorradboom ungeahnten Ausmaßes, der, mit den üblichen zyklischen Schwankungen, bis heute anhält. Motorräder sind zu einem Konsumartikel einer kapitalkräftigen Freizeitgesellschaft geworden, mit dem man auch seinen Lebensstil ausdrückt. Sie werden gekauft von Leuten, die ihre Faszination von der Technik mit dem unmittelbaren Fahrvergnügen verbinden, und zunehmend auch von Menschen, die keine besondere „persönliche Ideologie“ mit dem Motorrad verbindet, sondern einfach nur das Fahren genießen.

Trotz dieser insgesamt erfreulichen Entwicklung werden die Bestandszahlen der 50er Jahre erst in jüngster Zeit überschritten. Aufgrund der angestiegenen Gesamtbevölkerung bleibt die Motorisierungsquote in Bezug auf Motorräder niedrig. Immerhin erreichen Motorräder inzwischen rund 7 % der Bestandszahlen von Pkw, so dass das Motorrad seine ehemalige Außenseiterrolle verloren hat. Auswirkungen hat dieses auch auf die Gesetzgebung, die Motorräder hinsichtlich Abgas- und Geräuschemissionen zunehmend ähnlichen Bedingungen unterwirft wie die Pkw. Auch dem Unfallgeschehen bei Motorrädern wird der Gesetzgeber zukünftig mehr Aufmerksamkeit schenken. Die Zahl der bei Verkehrsunfällen Getöteten sinkt beim Pkw kontinuierlich und lag in 2008 mit rund 4.500 Personen auf dem niedrigsten Stand. Da Motorräder bauartbedingt kaum Fortschritte hinsichtlich ihrer passiven Sicherheit aufweisen, ist hier nicht solch eine positive Entwicklung aufzeigbar. Die Relation zwischen Motorrädern und Pkw verschiebt sich daher bei den Unfallfolgen ungünstig in Richtung Motorräder.

Die fortschreitende Verstopfung der Innenstädte bringt seit geraumer Zeit das Motorrad als Lösung des Verkehrsproblems für den individuellen Kurzstreckenverkehr ins Gespräch. Seine Vorteile werden in der großen Wendigkeit, im geringeren Verkehrsflächenbedarf bei niedrigen Geschwindigkeiten (und nur dort!) und insbesondere beim Parken gesehen, **Bild 1.5**.

In einigen europäischen Großstädten wie London und Paris, oder traditionell in Italien spielen motorisierte Zweiräder inzwischen wieder eine Rolle für die Fahrt zur Arbeit. Dieses könnte



**Bild 1.5**  
Verkehrsflächenbedarf von Auto und  
Motorrad im Vergleich

positive Impulse bei den aufkeimenden Diskussionen hinsichtlich der Umweltbelastungen durch Motorräder geben. Ob zukünftig neben dem Sport- und Freizeitmotorrad eine neue Motorradkategorie, möglicherweise auf Basis der bekannten Roller entsteht, kann derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden. Fortschrittliche und richtungweisende Lösungen wie der C1 von BMW mit seinem einzigartigen Sicherheitskonzept, **Bild 1.6**, wurden zwar anfänglich begeistert von Markt und Medien aufgenommen, konnten sich aber letztlich nicht wie erhofft durchsetzen. Auf weitere Aspekte und mögliche Zukunftsentwicklungen wird am Schluss des Buches im Kapitel 14 ausführlicher eingegangen.



**Bild 1.6**  
BMW C1

Der wirtschaftlichen Bedeutung des Motorrades wird aus Unkenntnis häufig nur ein geringer Stellenwert zugemessen. Unmittelbar mit der Entwicklung und Herstellung von Motorrädern haben zwar in Deutschland nur wenige tausend Menschen zu tun, doch gehen die Beschäftigungszahlen in der gesamten Motorradbranche in die Zehntausende. Dazu gehören die Beschäftigten der Bekleidungs- und Zubehörindustrie, die Händler und Reparaturbetriebe, die Reifenindustrie, Fahrschulen und die Hersteller von Kraftstoffen, Schmier- und Pflegemitteln. Hinzu kommen die Versicherungen und die Banken. Auch der Motorradrennsport bietet Arbeitsplätze, von der Organisation bis über Werbemittel und Fernsehübertragungen. Insgesamt erreicht der Umsatz dieses gesamten Bereiches allein in Deutschland pro Jahr eine Größenordnung, die deutlich über 10 Milliarden € liegen dürfte; europaweit dürfte der Betrag ein Mehrfaches dieser Summe betragen.

Die Wissenschaft nimmt sich ebenfalls des Motorrades an. Im deutschsprachigen Raum (Deutschland, Schweiz, Österreich) forschen und lehren mindestens 6 Hochschulen und Fachhochschulen direkt auf dem Gebiet der Motorradtechnik; nimmt man Randgebiete (Unfallmedizin und Psychologie) hinzu, sind es noch einige mehr. Eine Vielzahl weiterer Institutionen (DEKRA, IfZ, TÜVRheinland und Bayern-Sachsen, Versicherungen etc.) beschäftigen sich intensiv mit speziellen Problemstellungen rund um das Motorrad.

## 1.2 Charakteristische Eigenschaften von Motorrädern

Motorräder sind mit Ausnahme von Beiwagengespannen, die hier nicht behandelt werden, Einspurfahrzeuge und damit nicht eigenstabil. Das Motorrad befindet sich immer im labilen Gleichgewicht und neigt, wie jeder weiß, zum Umfallen. Es wird rein dynamisch durch die Kreiselkräfte der drehenden Räder stabilisiert. Mit der dynamischen Stabilisierung hängt auch die Eigenart der Lenkung bei der Kurvenfahrt zusammen. Motorräder werden, mit Ausnahme sehr niedriger Geschwindigkeiten, nicht durch einen Lenkeinschlag im herkömmlichen Sinne gelenkt, sondern der Lenkeinschlag dient lediglich zum Einleiten der für die Kurvenfahrt notwendigen Schräglage. In der Kurve kompensiert die Schräglage die auftretenden Fliehkräfte, d.h. Fliehkraft und Schwerkraft halten sich das Gleichgewicht. Diese besonderen Bedingungen der Stabilisierung bringen es mit sich, dass der Fahrer, anders als beim Automobil, in jegliche fahrdynamische Betrachtung mit einbezogen werden muss. Immerhin trägt schon der Fahrer allein mit über 20 % zum Gesamtgewicht bei. Fahrer wie Beifahrer sind darüber hinaus nicht bloß tote Masse. Sie beeinflussen durch ihr Gewicht, ihre Sitzposition, ihre Bewegungen und die Feder-Dämpfer-Eigenschaften des menschlichen Körpers aktiv das Fahrverhalten.

Auch bei der rein konstruktiven Auslegung des Fahrwerks spielt der Fahrer eine wichtige Rolle. Denn durch die Belastung mit Fahrer/Beifahrer ändert sich die Fahrwerksgeometrie infolge der Einfederung merklich, und der Schwerpunkt wandert durch die Masse der aufsitzenden Personen nach oben. Die dynamischen Radlastveränderungen sind beim Motorrad viel stärker ausgeprägt als beim Automobil, weil das Verhältnis von Schwerpunkthöhe und Radstand ungünstiger ist. Der Schwerpunkt liegt aufgrund der relativ hohen, aufrechten Sitzposition von Fahrer/Beifahrer gewöhnlich höher als beim Auto, und der Radstand ist deutlich kleiner. Zudem ändern sich die aerodynamischen Verhältnisse und die daraus resultierenden Kräfte am Motorrad gravierend mit der Sitzhaltung und Kleidung von Fahrer und Beifahrer.

Ein weiteres besonderes Merkmal von Motorrädern ist die freie Zugänglichkeit der Aggregate, die deshalb auch nach stilistischen Kriterien entworfen werden müssen. Darüber hinaus gelten für sie besondere Anforderungen hinsichtlich Verschmutzungsunempfindlichkeit und Korrosionsschutz. Generell ist der Bauraum für alle Aggregate sehr eingeschränkt, weshalb oft Sonderkonstruktionen notwendig werden.

Leichtbau hat beim Motorrad einen hohen Stellenwert, weil das Fahrzeuggewicht viel mehr als beim Automobil Einfluss auf die Handlichkeit und Agilität nimmt. Dafür spielen Kraftstoffverbrauch und Umweltverträglichkeit (noch) nicht eine so dominierende Rolle wie beim Automobil; zumindest ist eine besonders gute Erfüllung von Umwelтанforderungen für die Mehrzahl der Motorradfahrer kein entscheidendes Kaufkriterium. Der Bewusstseinswandel vollzieht sich hier erst langsam, hohe Priorität haben nach wie vor überlegene Fahrleistungen.

Im Gegensatz zum Automobil (auch dort gibt es allerdings Ausnahmen) richtet sich die konstruktive Ausführung von Motorrädern nicht nur vorrangig nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien. Die rein technische Unterscheidung zum Wettbewerb und die Tradition spielen bei der Gestaltung von Motorrädern eine außerordentlich wichtige Rolle. Beispiele dafür sind die Boxermotoren von BMW, die V-Motoren von Moto Guzzi und Ducati, die Chopper von Harley-Davidson, **Bild 1.7**, und sicher auch schon manche Reihen-Vierzylindermotoren japanischer Hersteller.



**Bild 1.7** Harley-Davidson V-Rod

Das Bauprinzip ist teilweise Selbstzweck, gewünscht von vielen Käufern mit Interesse und Begeisterung für die Technik. Dies erklärt die Vielfalt, besonders auf dem Motorensektor, die man in dieser Form bei kaum einer anderen Fahrzeugkategorie findet und die rein technisch auch nicht immer begründbar ist.

Die nachstehende Tabelle fasst die wichtigen, charakteristischen Eigenschaften von Motorrädern noch einmal kurz zusammen.

**Tabelle 1.1** Wichtige charakteristische Eigenschaften von Motorrädern

- Fehlende Eigenstabilität, rein dynamische Stabilisierung
- Erheblicher Fahrereinfluss auf die Fahrwerksauslegung
- Erheblicher Fahrereinfluss auf die Aerodynamik
- Fahrer stellt über 20 % des Gesamtgewichts
- Ungünstiges Verhältnis Schwerpunkthöhe zu Radstand
- Hoher Stellenwert des Leichtbaus
- Eingeschränkte Bauraumverhältnisse
- Freie Zugänglichkeit der Aggregate
- Technik als Selbstzweck

### 1.3 Baugruppen des Motorrades und technische Trends

Motorräder bestehen aus einer Vielzahl von Bauteilen, die üblicherweise funktional in Gruppen zusammengefasst werden, **Bild 1.8**.

<b>Antrieb</b>		<b>Fahrwerk</b>
<b>Motor</b>	<b>Kraftübertragung</b>	Rahmen
Grundmotor	Kupplung	Radführungen
Zylinderkopf	Getriebe	Feder-Dämpfersysteme
Kühlsystem	Hinterradantrieb	Lenkung
Motorschmierung		Bremsen
Sauganlage		Räder und Reifen
Gemischaufbereitung		
Abgasanlage		



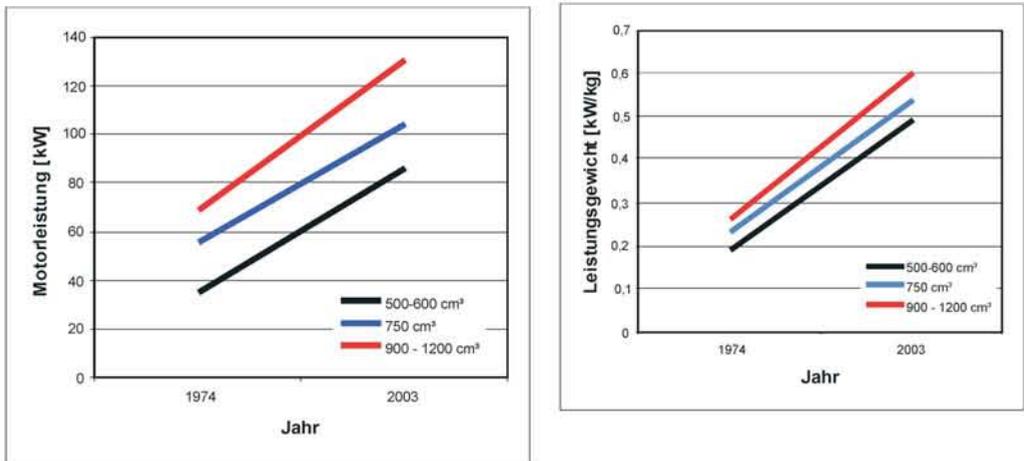
<b>Karosserie</b>		<b>Elektrik und Elektronik</b>
Verkleidung	Kotflügel	Energieversorgung
Tank	Sitzbank	Bordnetzsysteme
Blenden	Lenker	Instrumente
Handhebel	Fußrasten	Leuchten
Gepäckhalterungen und Gepäcksysteme		Hardware- und Software Regelsysteme

**Bild 1.8** Funktionale Baugruppen am Motorrad

Elektrische Funktionen mit elektronischen Komponenten gewinnen auch bei Motorrädern an Bedeutung. Elektronische Regelungen für Bremsen (ABS) und Motor (Einspritzung, Zündung, Leerlaufregelung) werden mit den mechanischen oder hydraulischen Betätigungen zu Gesamtsystemen vernetzt. Elektrik und Elektronik bilden mittlerweile eine eigenständige Funktionsgruppe.

Im Gegensatz zu früher sind die meisten Motorräder heute mit Teil- oder Vollverkleidungen ausgerüstet, die mehr und mehr integraler Bestandteil des Fahrzeugs geworden und nicht mehr nachträglich adaptiert sind. Abdeckungen, Blenden und Stylingelemente haben an Bedeutung gewonnen, so dass man heute zu Recht auch bei Motorrädern von *Karosserieumfängen* sprechen kann.

Haupttrends, die den Motorradbau dominieren, sind die Modellverschiebungen zu größeren Hubräumen, mehr Leistung und Leichtbau. Die Leistungen wie auch das Leistungsgewicht in den jeweiligen Hubraumklassen haben sich in 30 Jahren mehr als verdoppelt, **Bild 1.9**. Die Leistungsgewichtssteigerung ist umso beeindruckender, wenn man bedenkt, dass heutige Fahrzeuge sehr viel steifer dimensionierte Fahrwerke mit aufwändigeren Hinterradfürungen, großdimensionierte Bremsen sowie sehr viel breitere Räder und Reifen aufweisen und in der Regel mit Verkleidungen und erheblich mehr Ausstattung versehen sind.

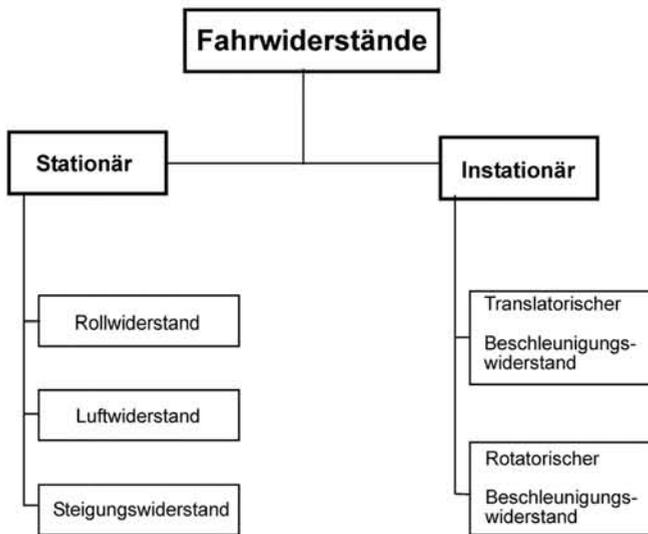


**Bild 1.9** Entwicklung von Motorleistung und Leistungsgewicht von 1974 bis 2003

Die Modellvielfalt nimmt weiterhin zu. Auf dem deutschen Markt werden von insgesamt 19 namhaften Herstellern aus Europa, Japan und USA heute rund 180 verschiedene Motorradmodelle im Hubraumsegment ab 125 cm<sup>3</sup> angeboten. Diese Zahlen umfassen nur die in Serie produzierten Maschinen mit Straßenzulassung. Würde man die Hersteller und Angebote aus Russland, China, Korea und Brasilien hinzuzählen sowie die Motorräder von Kleinherstellern, Spezialumbauten und Maschinen für Sport- und Rennzwecke, wäre die Zahl der angebotenen Modelle noch erheblich größer.

## 2 Fahrwiderstände, Leistungsbedarf und Fahrleistungen

Bei der Geradeausfahrt eines Motorrads treten wie bei jedem Fahrzeug Widerstände auf, die die Fortbewegung hemmen wollen und überwunden werden müssen. Die zusätzlichen Widerstände bei der Kurvenfahrt werden üblicherweise vernachlässigt, weil sie insbesondere beim Motorrad betragsmäßig klein sind und ihre genaue Berücksichtigung unverhältnismäßig kompliziert wäre. Die Höhe der Fahrwiderstände bestimmt die Motorleistung, die zur Erzielung einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit erforderlich ist. Man unterscheidet zwischen den Widerständen, die bei stationärer Fahrt (Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit) und instationärer Fahrt (Beschleunigung) auftreten, **Bild 2.1**.



**Bild 2.1** Fahrwiderstände

### 2.1 Stationäre Fahrwiderstände

Die Fahrwiderstände für die stationäre Geradeausfahrt sind, mit Ausnahme des Steigungswiderstandes, geschwindigkeitsabhängig. Die Fahrwiderstände werden in der Dimension einer Kraft (also in Newton) angegeben. Rollwiderstand, Luftwiderstand und Steigungswiderstand addieren sich zum gesamten stationären Fahrwiderstand.

#### 2.1.1 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand eines luftbereiften Rades setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. In der Hauptsache entsteht Rollwiderstand, weil sich der Luftreifen (und theoretisch auch die Fahrbahn) unter dem Gewicht des Fahrzeugs in der Aufstandsfläche elastisch verformt. Es bildet sich ein sogenannter Anlaufwulst, der überwunden werden muss. Hinzu kommen Adhäsionskräfte.

sionskräfte, die beim Ablauf des Reifens versuchen, das Abheben der Profiltelchen von der Fahrbahn zu verhindern (der Reifen klebt an der Fahrbahn). Die fortlaufende Verformung des Reifens in der Aufstandsfläche bei der Raddrehung stellt den größten Anteil des Rollwiderstandes dar (*Walkwiderstand*). Damit ist der Rollwiderstand vor allem eine konstruktive Kenngröße des Reifens (Bauart, Karkassensteifigkeit, Gummihärte, Profilform usw.), und er hängt in hohem Maße vom Reifenfülldruck ab.

Zum Rollwiderstand tragen in weit geringerem Maße auch noch die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, die Dämpfungsverluste beim Überfahren von Unebenheiten und, bei nasser Fahrbahn, die Verluste aus der Verdrängung des Wasserfilms bei. Der Anteil durch den Reifenschräglauf ist beim Motorrad vernachlässigbar.

Die Fahrbahnverformung spielt für den Rollwiderstand bei normalen, festen Straßenbelägen keine messbare Rolle. Bei weichem Untergrund im Geländebetrieb allerdings, nimmt der Widerstand beträchtliche Größen an. Die Anstrengung beim Schieben eines Motorrads im Gelände gibt einen spürbaren Eindruck von dieser Widerstandserhöhung. Bei weichem Boden, der sich plastisch verformt, tritt zusätzlich noch die seitlich an den Reifenflanken angreifende Spurrillenreibung auf.

Auch die Ventilationsverluste, die das drehende Rad verursacht, kann man dem Rollwiderstand zurechnen, da sie von Reifenform, Profil usw. abhängen. Je nach Sichtweise könnte man sie aber auch dem Luftwiderstand zurechnen (sie sind dann allerdings messtechnisch im normalen Windkanal nicht ohne Weiteres zu ermitteln!). Auch diese Verluste sind vergleichsweise klein gegenüber dem Walkwiderstand.<sup>1</sup>

Der Rollwiderstand  $F_R$  wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$F_R = f_{R0} \cdot G_{\text{ges}} \quad (2-1)$$

$G_{\text{ges}}$  Fahrzeuggesamtgewicht [N]  
 $f_{R0}$  Rollwiderstandsbeiwert [-]

Im Rollwiderstandsbeiwert sind die Reifeneigenschaften und alle weiteren Einflussfaktoren für den Rollwiderstand zusammengefasst. Der Rollwiderstandsbeiwert kann näherungsweise als konstant angesehen und auf der Straße im Wertebereich zwischen 0,015–0,02 angenommen werden. Bei weichem Untergrund im Gelände kann der Rollwiderstandsbeiwert bis über den 20-fachen Wert ansteigen.

Für genauere Betrachtungen muss der Rollwiderstandsbeiwert in aufwändigen Versuchen am Reifen oder am Komplettfahrzeug ermittelt werden. Der Rollwiderstand steigt bei höheren Geschwindigkeiten an. Dies hängt damit zusammen, dass die Verformungsarbeit im Reifen in Wärme umgewandelt wird und diese Eigenerwärmung naturgemäß mit der Fahrgeschwindigkeit zunimmt. Dadurch ändern sich einige temperaturabhängige, physikalische Eigenschaften der verwendeten Reifenmaterialien.

Vereinfacht, und unter Vernachlässigung der Geschwindigkeitsabhängigkeit, lässt sich der Rollwiderstand eines Fahrzeugs durch Schleppversuche in der Ebene ermitteln. Es wird dabei

<sup>1</sup> In der Literatur wird manchmal noch eine Unterscheidung zwischen dem Radwiderstand und dem Rollwiderstand getroffen. Der Radwiderstand ist dann die Summe aller am Rad angreifenden Widerstände, also alle oben beschriebenen Anteile des Rollwiderstandes, die Ventilationsverluste und die Reibung in den Radlagern. Da wie oben beschrieben der Rollwiderstand und insbesondere der Walkwiderstand die dominierende Rolle spielt, wird hier in zulässiger Vereinfachung nur der Rollwiderstand betrachtet.

einfach bei niedrigen, konstanten Geschwindigkeiten (zur Ausschaltung des Luftwiderstandes) die notwendige Schleppkraft gemessen. Bei gleichzeitiger Kenntnis des Fahrzeuggewichts kann mittels Gleichung (2-1) der Rollwiderstandsbeiwert leicht errechnet werden.

$$f_{R0} = F_R / G_{\text{ges}} \quad (2-1a)$$

### 2.1.2 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand ist aus der Erfahrung jedermann geläufig und wird nach folgender Gleichung berechnet

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \rho / 2 \cdot v^2 \quad (2-2)$$

$\rho$  Luftdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$v$  Anströmgeschwindigkeit der Luft [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$A$  Querspanntfläche des Fahrzeug (Projektionsfläche) [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$c_w$  Luftwiderstandsbeiwert [-]

Die Anströmgeschwindigkeit wird gebildet aus der Differenz von Fahrzeuggeschwindigkeit und Geschwindigkeit der Luft. Gegen- bzw. Rückenwind müssen also beachtet und entsprechend zur Fahrzeuggeschwindigkeit hinzu- bzw. abgerechnet werden. Wegen der quadratischen Abhängigkeit des Widerstandes von der Geschwindigkeit führt die Vernachlässigung dieser Windeinflüsse zu besonders großen Fehlern. Das Produkt aus halber Luftdichte und quadratischer Anströmgeschwindigkeit wird auch als Staudruck bezeichnet.



**Bild 2.2** Luftwiderstandsmessung im Windkanal

Die sogenannte Querspanfläche des Fahrzeugs ist die vom größten Fahrzeugumriss inkl. Fahrer gebildete Frontfläche (vgl. Anhang). Der dimensionslose Luftwiderstandsbeiwert ist nichts anderes als eine Formzahl, die die Strömungsgüte des Fahrzeugs kennzeichnet. Der Luftwiderstandsbeiwert hängt von der Fahrzeuggrundform und der Feingestaltung der Fahrzeugaußenhaut ab. Wegen der Vielfalt der Einflussfaktoren kann der  $c_w$ -Wert nicht vorherbestimmt werden, sondern muss aus Messungen ermittelt werden. Dazu wird im Windkanal, **Bild 2.2**, die Luftwiderstandskraft  $F_L$  gemessen (mittels einer Messeinrichtung für Längskräfte in der Bodenplatte, auf der das Fahrzeug steht, vgl. Kap. 12) und der  $c_w$ -Wert aus den Messgrößen nach Gl. (2-2) wie folgt bestimmt:

$$c_w = \frac{F_L}{A \cdot \rho / 2 \cdot v^2} \quad (2-2a)$$

Mittels des  $c_w$ -Wertes wird es möglich, verschiedenartige und unterschiedlich große Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Form- bzw. Strömungsgüte zu vergleichen. Wegen der zerklüfteten Außenkontur haben Motorräder meist schlechtere  $c_w$ -Werte als Automobile. Vollverkleidungen bringen eine deutliche Verbesserung, doch bleibt als unvermeidbarer Nachteil der Strömungsabriss hinter Fahrer und Verkleidung bzw. an den Verkleidungsrändern. Für den Luftwiderstand ist nach Gl. (2-2) das Produkt aus Projektionsfläche und  $c_w$ -Wert maßgebend. Durch ihre kleinere Projektionsfläche wird der Nachteil der Motorräder im  $c_w$ -Wert kompensiert, so dass ein Luftwiderstand ähnlich oder sogar besser als beim Auto erreicht wird. **Tabelle 2.1** zeigt beispielhaft Messwerte für den Luftwiderstandsbeiwert und den Luftwiderstand einiger Fahrzeuge. Weil die Fahrerhaltung beim Motorrad sowohl den  $c_w$ -Wert als auch die Fläche beeinflusst, sind in der Tabelle Werte für zwei Fahrerpositionen angegeben.

Neben der Verbesserung des Luftwiderstands und des Fahrkomforts kommt die Verkleidung beim Motorrad auch der Fahrsicherheit zugute. Bei entsprechender Gestaltung kann der aerodynamische Auftrieb am Vorderrad vermindert werden, wodurch sich die Geradeaus-Fahrstabilität im Hochgeschwindigkeitsbereich erheblich verbessert. Die Möglichkeiten der aerodynamischen Beeinflussung werden im Kapitel 12 behandelt.

**Tabelle 2.1** Messwerte für Luftwiderstandsbeiwerte und Luftwiderstand

Fahrzeug	$c_w$ -Wert		Luftwiderstand
	Fahrer liegend	Fahrer aufrecht sitzend	$c_w \cdot A$ [m <sup>2</sup> ]
BMW K 1 (Modelljahr 1998)	k.A.	k.A.	0,38
BMW K 1200 RS (Modelljahr 1998)	0,521	0,523	0,424
BMW K 1200 S (Modelljahr 2004)	–	–	0,4
YAMAHA FZ 750 (Modelljahr 1992)	k.A.	k.A.	0,52
YAMAHA YZF 1000 (Modelljahr 1998)	0,506	0,545	0,414
SUZUKI GSX-R 750 (Modelljahr 1998)	0,508	0,582	0,442
SUZUKI GSF 1200 (Modelljahr 1998)	0,627	0,704	0,549
Ducati 916 (Modelljahr 1998)	0,485	0,571	0,394
Moderner Mittelklasse Pkw	0,31 ... 0,28		0,683

k.A. = keine Angabe

Wegen der aufwändigen Ermittlung der Querschnittsfläche wird in vielen Veröffentlichungen oft nur der im Windkanal direkt gemessene Luftwiderstand ( $c_w \cdot A$ ) angegeben. Die Querschnittsfläche bei verkleideten Motorrädern mit Fahrer liegt etwa bei  $0,6\text{--}0,8\text{ m}^2$ . Wegen unvermeidbarer Unterschiede in den Messbedingungen (u.a. Fahrerpositionierung) weichen veröffentlichte Angaben über den Luftwiderstand voneinander ab.

Aufgrund des dominanten Einflusses und der großen Unterschiede im Luftwiderstand sind die benötigten Motorleistungen zum Erreichen einer bestimmten Geschwindigkeit sehr unterschiedlich. Legt man die Werte aus der vorstehenden Tabelle zugrunde, so liegt die rechnerisch notwendige Hinterradleistung für eine Geschwindigkeit von  $200\text{ km/h}$  zwischen  $37\text{ und }50\text{ kW}$  ( $50\text{--}69\text{ PS}$ ), vgl. auch Kapitel 2.5. Umgekehrt unterstützt natürlich der Luftwiderstand auch einen gewünschten Geschwindigkeitsabbau. Jenseits von  $200\text{ km/h}$  bedeutet bereits „Gaswegnehmen“ schon eine erhebliche Verzögerung und diese Verzögerung addiert sich zur Radverzögerung beim Bremsen, was bei einer Vollbremsung aus diesen Geschwindigkeiten höchst willkommen ist.

### 2.1.3 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand ist eine Komponente der Schwerkraft, die beim Befahren einer Steigung oder eines Gefälles zusätzlich auf das Fahrzeug einwirkt. Er nimmt im Gefälle negative und in der Steigung positive Werte an und errechnet sich wie folgt:

$$F_{\text{st}} = m_{\text{ges}} \cdot g \cdot \sin \alpha_{\text{st}} = G_{\text{ges}} \cdot \sin \alpha_{\text{st}} \quad (2-3)$$

$G_{\text{ges}}$  Fahrzeugesamtgewicht [N]

$m_{\text{ges}}$  Fahrzeugesamtmasse [kg]

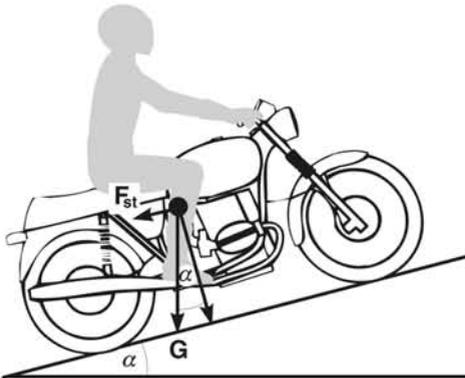
$g$  Erdbeschleunigung =  $9,81\text{ [m/s}^2]$

$\alpha_{\text{st}}$  Steigungswinkel [ $^\circ$ ]

Der Steigungswiderstand steigt demnach unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit mit dem Fahrzeuggewicht und dem Steigungswinkel an, **Bild 2.3**. Da für kleine Steigungswinkel die Beziehung  $\sin \alpha_{\text{st}} \approx \tan \alpha_{\text{st}}$  gilt, kann im Straßenbetrieb mit kleinen Winkeln (bei  $20\%$  Steigung ist  $\alpha_{\text{st}} = 11^\circ$ ) vereinfacht mit folgender Beziehung gerechnet werden

$$F_{\text{st}} = G_{\text{ges}} \cdot \tan \alpha_{\text{st}} = G_{\text{ges}} \cdot q \quad (2-3a)$$

$q$  Steigung in Prozent ( $15\%$  Steigung  $\rightarrow q = 0,15$ )



**Bild 2.3**  
Steigungswiderstand

## 2.2 Instationäre Fahrwiderstände

Um ein Fahrzeug aus dem Stand oder einer gleichmäßigen Geschwindigkeit heraus zu beschleunigen, müssen ebenfalls Kräfte aufgewendet werden, weil das Fahrzeug aufgrund seiner Massenträgheit das Bestreben hat, in seinem ursprünglichen Fahrzustand zu beharren. Diese Kräfte werden als instationäre Fahrwiderstände oder auch als Beschleunigungswiderstände bezeichnet. Es wird unterschieden zwischen dem translatorischen Widerstand für die geradlinige Beschleunigung des gesamten Fahrzeugs und dem rotatorischen Widerstand zur Beschleunigung aller drehenden Teile im Antrieb. Beide Widerstände überlagern sich und müssen addiert werden.

### 2.2.1 Translatorischer Beschleunigungswiderstand

Der translatorische Widerstand zur geradlinigen Fahrzeugbeschleunigung entlang der Fahrbahn berechnet sich wie folgt:

$$F_{a,tran} = m_{ges} \cdot a \quad (2-4)$$

$a$  Beschleunigung [m/s<sup>2</sup>].

(Mit dieser Gleichung kann auch die Verzögerungskraft bei der Bremsung berechnet werden, wenn man die Beschleunigung negativ ansetzt, was aber an dieser Stelle nicht weiter interessieren soll.)

### 2.2.2 Rotatorischer Beschleunigungswiderstand

Wenn das Motorrad beschleunigt wird, müssen auch die Bewegungen aller Teile des Antriebsstrangs, also Kurbelwelle, Kupplung, Getrieberäder, Kettenräder etc. sowie die Drehung der Räder beschleunigt werden. Dazu ist ein Drehmoment erforderlich, das allgemein folgendermaßen berechnet wird:

$$M_a = \sum \Theta_i \cdot \alpha_i \quad (\text{Summe der Einzeldrehmassen bzw. -beschleunigung}) \quad (2-5)$$

$\Theta_i$  Massenträgheitsmoment (Drehmasse) [kgm<sup>2</sup>]  
 $\alpha_i$  Winkelbeschleunigung [1/s<sup>2</sup>]

Da die drehenden Teile von Motor und Antriebsstrang unterschiedliche Massenträgheitsmomente und wegen der Übersetzungen (Getriebe) unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten aufweisen, muss die Drehmomentberechnung für jedes Bauteil einzeln vorgenommen werden, was durch den Index  $i$  in der Gleichung symbolisiert wird. Man kann jedoch Massenträgheitsmomente unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Winkelbeschleunigungen zu einem einzigen Ersatz-Trägheitsmoment (reduziertes Trägheitsmoment  $\Theta_{red}$ ) auf einer Ersatzdrehachse zusammenfassen:

$$M_{a,red} = \Theta_{red} \cdot \alpha_{red} \quad (2-5a)$$

Zweckmäßigerweise werden die Trägheitsmomente von Motor- und Antriebsstrang so zusammengefasst, dass deren Ersatz-Trägheitsmoment ( $\Theta_{red,AS}$ ) um die Hinterradachse wirkt. Bezieht man dieses Ersatz-Massenträgheitsmoment auf den dynamischen Hinterradradius  $R_{dyn,H}$ , ergibt sich aus dem Drehmoment eine Kraft im Berührungspunkt zwischen Reifen und Fahrbahn. Dies ist dann der rotatorische Beschleunigungswiderstand von Motor und Antriebsstrang:

$$F_{a,AS} = \frac{\Theta_{red,AS} \cdot \alpha_{red}}{R_{dyn,HR}} \quad (2-6)$$

Damit errechnet sich der gesamte rotatorische Beschleunigungswiderstand des Motorrads zu

$$F_{a,rot} = \frac{\Theta_{red,AS} \cdot \alpha_{red}}{R_{dyn,HR}} + \frac{\Theta_{HR} \cdot \alpha_{HR}}{R_{dyn,HR}} + \frac{\Theta_{VR} \cdot \alpha_{VR}}{R_{dyn,VR}} \quad (2-7)$$

Da in die Berechnung des reduzierten Trägheitsmomentes die Übersetzung eingeht, ist der rotatorische Beschleunigungswiderstand abhängig von der gewählten Getriebestufe bzw. der wirksamen Gesamtübersetzung. Mit der allgemein gültigen Beziehung

$$a = \alpha \cdot R_{dyn} \quad (2-8)$$

wird der Zusammenhang zwischen Winkelbeschleunigung und translatorischer Beschleunigung für das rollende Rad beschrieben, so dass Gl. (2-7) umgeschrieben werden kann

$$F_{a,rot} = \frac{\Theta_{red,AS} \cdot a}{R_{dyn,HR}^2} + \frac{\Theta_{HR} \cdot a}{R_{dyn,HR}^2} + \frac{\Theta_{VR} \cdot a}{R_{dyn,VR}^2} \quad (2-9)$$

Nach dieser Umrechnung lassen sich translatorischer und rotatorischer Beschleunigungswiderstand leicht addieren, und der gesamte Beschleunigungswiderstand kann errechnet werden:

$$F_{a,ges} = F_{a,tran} + F_{a,rot} \quad (2-10)$$

bzw. als ausführliche Gleichung

$$F_{a,ges} = a \cdot \left[ m_{ges} + \frac{\Theta_{red,AS}}{R_{dyn,HR}^2} + \frac{\Theta_{HR}}{R_{dyn,HR}^2} + \frac{\Theta_{VR}}{R_{dyn,VR}^2} \right] \quad (2-10a)$$

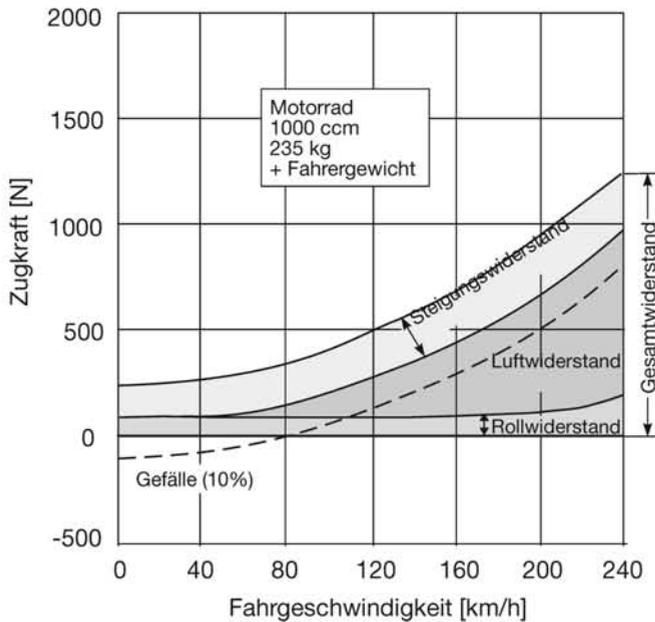
Die rotatorischen Massen wirken beim Beschleunigen demnach so, als ob die Gesamtmasse des Motorrads sich erhöhen würde. Dies bedeutet in der Praxis, dass eine Gewichtsreduzierung der drehenden Teile im Antriebsstrang sowie der Räder sich bezüglich der Beschleunigung zweifach auswirkt. Es vermindert sich die Motorradgesamtmasse als solche und zusätzlich der Beschleunigungswiderstand.

### 2.3 Leistungsbedarf und Fahrleistungen

Aus der Kenntnis aller Fahrwiderstände des Motorrads lassen sich Fahrleistungen und der Bedarf an Motorleistung ermitteln. Bei der unbeschleunigten Geradeausfahrt muss die Summe der stationären Fahrwiderstände überwunden und als Kraft vom Motor an das Hinterrad geliefert werden:

$$F_{ges} = F_R + F_L + F_{st} \quad (2-11)$$

Die Auftragung des gesamten Fahrwiderstandes über der Fahrgeschwindigkeit ergibt wegen der Geschwindigkeitsabhängigkeit (vgl. Kap. 2.1) einen progressiv ansteigenden Verlauf, das sogenannte Fahrwiderstandsdiagramm, **Bild 2.4**. Die Anteile der Einzelwiderstände am Gesamtwiderstand sind mit unterschiedlich grau gefärbten Flächen im Diagramm gekennzeichnet.



**Bild 2.4**  
Fahrwiderstände in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit

Man erkennt, dass der Rollwiderstand nur bei geringen Geschwindigkeiten eine Rolle spielt, aber natürlich nie Null wird (die Verformung der Aufstandsfläche ist auch im Stillstand vorhanden). Bei Geschwindigkeiten ab ca. 40 km/h wirkt sich der Luftwiderstand spürbar aus. Er übersteigt den Rollwiderstand ab ca. 60 km/h und wird zum dominierenden Widerstand bei höheren Fahrgeschwindigkeiten. Der Steigungswiderstand schließlich addiert sich zu den anderen Widerständen als konstante Größe. Er wird bei Gefälle negativ, d.h. er wirkt als antreibende Kraft und ist anfänglich deutlich größer als die anderen Fahrwiderstände („Hangabtriebskraft“).

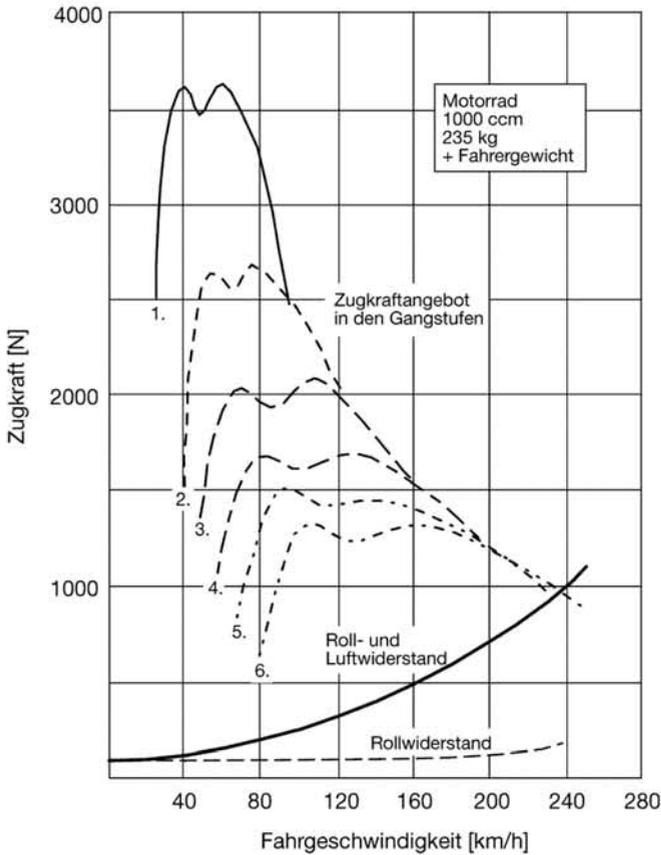
Die Antriebskraft am Hinterrad, die sogenannte Zugkraft zur Überwindung der Fahrwiderstände, kann aus dem Drehmoment des Motors leicht errechnet werden :

$$Z = M_{\text{mot}} \cdot i_{\text{ges}} / R_{\text{dyn,HR}} \quad (2-12)$$

$i_{\text{ges}}$  Gesamtübersetzung [-]

Die Gesamtübersetzung errechnet sich aus dem jeweiligen Getriebegang und der Hinterradübersetzung. Das Motordrehmoment muss aus der Drehmomentkurve nach Umrechnung der Fahrgeschwindigkeit in Motordrehzahl entsprechend abgelesen werden.

Die Zugkraft ist damit gangabhängig. Trägt man die nach Gl. (2-12) berechnete Zugkraft des Motors für jeden Getriebegang in das Fahrwiderstandsdiagramm ein, **Bild 2.5**, erhält man das Zugkraftdiagramm. Wegen der größeren Übersetzung steigt die Zugkraft mit dem jeweils nächstkleineren Gang an, gleichzeitig nimmt der nutzbare Geschwindigkeitsbereich wegen der Drehzahlgrenzen des Motors ab. Der Fahrwiderstand ist nur für die Konstantfahrt in der Ebene (Steigung = 0) dargestellt.

**Bild 2.5**

Fahrwiderstand und Zugkraft in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Gangstufe

Aus dem Zugkraftdiagramm lässt sich leicht ablesen, dass in weiten Geschwindigkeitsbereichen und besonders in den niedrigen Gängen, die Zugkraft (nicht die Leistung!) erheblich größer ist als der Fahrwiderstand. Dieser Zugkraftüberschuss kann für die Bergfahrt und die Beschleunigung ausgenutzt werden. Diese ist, wie aus der Erfahrung geläufig, in den unteren Gängen besonders groß und nimmt in höheren Gängen und mit steigender Geschwindigkeit ab. Würde man in das Diagramm zusätzlich noch die Beschleunigungswiderstände in Abhängigkeit verschiedener Beschleunigungswerte eintragen, könnte man am Schnittpunkt der Widerstandskurve mit den Zugkraftkurven die möglichen Beschleunigungen im jeweiligen Gang ablesen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden und sich die weitere Betrachtung auf den stationären Fall beschränken.

Mit Zunahme der Fahrgeschwindigkeit nähern sich Zugkraftangebot und Fahrwiderstand einander an und schneiden sich bei einer bestimmten Geschwindigkeit. Dieser Schnittpunkt kennzeichnet die erreichbare Höchstgeschwindigkeit des Motorrades. Bei einer weiteren Geschwindigkeitssteigerung wird der Fahrwiderstand größer als die angebotene Zugkraft. Für eine exakte theoretische Ermittlung der Höchstgeschwindigkeit muss noch der Reifenschlupf berücksichtigt werden (vgl. Anhang und Kap. 9.2). Dieser nimmt bei hohen Geschwindigkeiten Werte bis zu 20 % an, wodurch die erreichbare Höchstgeschwindigkeit etwas absinkt. Dies soll jedoch hier vernachlässigt werden.

Anhand des Zugkraftdiagramms lassen sich die Auswirkungen von Variationen an Motor, Getriebe und Hinterradübersetzung sowie am Fahrzeug vorhersagen. Die Übersetzungsabstimmung sowohl der einzelnen Getriebegänge als auch die Hinterrad- und damit die Gesamtübersetzung wird mit Hilfe des Zugkraftdiagramms vorgenommen. Die Schaltstufen im Getriebe sollten beispielsweise so gelegt werden, dass möglichst keine Zugkraftsprünge nach dem Gangwechsel auftreten, d.h. die Zugkraftkurven der einzelnen Gänge sollten sich idealerweise schneiden. Die Hinterradübersetzung sollte so mit dem letzten Getriebegang und der Drehmomentcharakteristik des Motors abgestimmt werden, dass beim Absinken der Fahrgeschwindigkeit infolge einer leichten Steigung ein genügend großer Zugkraftanstieg auftritt, um die Steigung ohne Zurückschalten zu bewältigen.

Bisher wurden nur die zur Fahrzeugbewegung notwendigen Kräfte betrachtet. In vielen Fällen ist eine Leistungsbetrachtung zweckmäßiger. Die Fahrwiderstandsleistung (Bedarfsleistung) für die Stationärfahrt erhält man aus dem Fahrwiderstand durch Multiplikation mit der Fahrgeschwindigkeit:

$$P_{FW} = F_{ges} \cdot v = (F_R + F_L + F_{st}) \cdot v \quad (2-13)$$

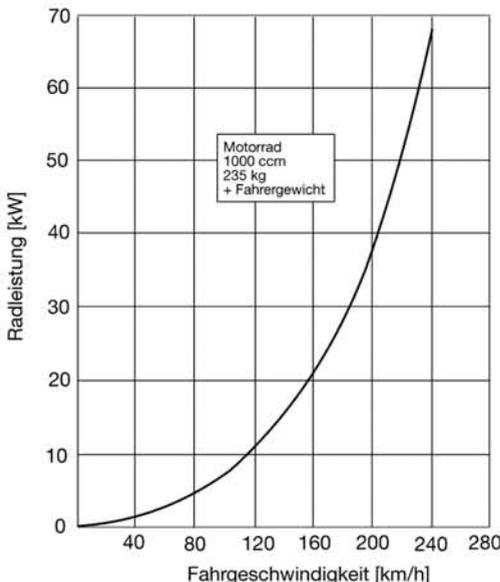
$v$  Geschwindigkeit [m/s]

Sie muss vom Motor an das Hinterrad geliefert werden (Radleistung). Entsprechend errechnet sich die Leistung, die der Motor an der Kupplung abgeben muss zu:

$$P_{mot} = (F_R + F_L + F_{st}) \cdot v / \eta_{AS} \quad (2-13a)$$

$\eta_{AS}$  mechanischer Wirkungsgrad des Antriebsstrangs [-]

Der mechanische Wirkungsgrad berücksichtigt die gesamten Reibungsverluste, die bei der Leistungsübertragung zum Hinterrad durch das Getriebe und den Ketten- bzw. Kardanantrieb verursacht werden. Er liegt üblicherweise zwischen 90 und 96 %. Der Leistungsbedarf in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ist im **Bild 2.6** dargestellt.



**Bild 2.6**  
Leistungsbedarf am Hinterrad (Radleistung) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit

Die dargestellten Werte wurden an einem Supersportmotorrad mit Verkleidung ermittelt. Der Leistungsbedarf bei Geschwindigkeiten unter 100 km/h ist überraschend gering, steigt dann aber zu hohen Fahrgeschwindigkeiten steil an. Der Grund ist sofort erkennbar, wenn man in Gl. (2-13) die komplette Berechnungsformel (Gl. 2-2) für den Luftwiderstand einsetzt. Dann ergibt sich, dass die Bedarfsleistung in der 3. Potenz mit der Fahrgeschwindigkeit ansteigt. Für eine Verdoppelung der Geschwindigkeit ist demnach, wenn man nur den Luftwiderstand betrachtet, die achtfache Motorleistung erforderlich. Im realen Fall, d.h. bei Berücksichtigung der gesamten Fahrwiderstände, beträgt der Leistungsbedarf bei einer Geschwindigkeitsverdoppelung etwa das 5- bis 6-fache des Ausgangswertes (die Bedarfsleistung ist ja wegen des Rollwiderstands anfänglich größer).